



**INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA**  
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão



# **MODELOS DE AVALIAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS: UMA ABORDAGEM ENERGÉTICA, FINANCEIRA E AMBIENTAL**

**MARCELA DA SILVA GAYER**

Dissertação Final apresentada à

**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**

**Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia da Construção**

Outubro de 2018



# **MODELOS DE AVALIAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS: UMA ABORDAGEM ENERGÉTICA, FINANCEIRA E AMBIENTAL**

**MARCELA DA SILVA GAYER**

Dissertação Final apresentada à  
**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**  
**Instituto Politécnico de Bragança**

Para obtenção do grau de Mestre em  
**Engenharia da Construção**

Orientador: Professor Doutor Luís Manuel Frólén Ribeiro

Co-orientadores: Professor Doutor Jorge Lopes e Professor Doutor Arthur Medeiros

Outubro de 2018

## **Dedicatória**

*Aos meus pais, João Carlos e Teka, e  
às minhas irmãs, Renata e Roberta.*

## **Agradecimentos especiais para:**

### **Professor Doutor Luís Frölen**

Pelo incentivo e parceria durante todo o desenvolvimento da tese. Agradeço à orientação exemplar e organizada. Foi uma honra poder trabalhar ao seu lado e poder levar para vida tantos aprendizados.

### **Professor Doutor Jorge Lopes**

Por compartilhar seus conhecimentos sobre análise financeira e fornecer ajuda valiosa para avaliação e conclusão dos resultados.

### **Professor Doutor Arthur Medeiros**

Pela motivação e apoio iniciais e fundamentais para participação do programa de mestrado e dupla diplomação. Também pela atenção de sempre e co-orientação a distância.

### **Minha família**

Por todo o apoio e suporte que vocês me deram durante todo o período de vida acadêmica. Obrigada por entenderem minha ausência, por me incentivarem mesmo à distância, por acreditarem em mim. Sem vocês nada disso seria possível.

### **As demais pessoas**

Aos amigos com quem compartilhei essa trajetória, obrigada por terem sido, durante algum momento, fundamentais para mim e por me ajudarem a encontrar o melhor rumo em cada fase desta caminhada.

## Resumo

Esse trabalho inclui um estudo comparativo de 4 diferentes modelos de tomada de decisão através de critérios energéticos. Estes foram escolhidos dentre os diversos tipos de modelos existentes no mercado por abranger diferentes níveis de complexidade, partindo do mais simples para o modelo mais complexo: *System Advisor Model (SAM)*, *EnergyPLAN*, *Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER)* e *PRIME*. Esses modelos energéticos servem para otimizar sistemas de energia através da avaliação do potencial energético de cada região. Também servem para analisar tanto o impacto do uso e a eficiência energética de tecnologias, como os recursos financeiros envolvidos.

Esta tese refere-se também ao caso de estudo dum aeroporto internacional que enfrentava problemas devido à falha de fornecimento de eletricidade advinda da rede concessionária local. Devido a esse problema em 2005 foi instalado neste aeroporto um sistema de cogeração para que este pudesse gerar sua própria energia de maneira estável, utilizando a concessionária apenas como *backup*. Contudo este sistema parou de operar 7 anos depois. Neste trabalho inicialmente foram analisados os possíveis motivos pelo qual o sistema tenha vindo a falhar. Depois foram estudados outros três diferentes cenários com o propósito de comparar com a situação atual (em que a eletricidade é fornecida exclusivamente pela concessionária local), a fim de avaliar e verificar qual a melhor solução para abastecimento elétrico do aeroporto no ponto de vista técnico, econômico e ambiental. A primeira proposta foi o estudo de reutilização dos aparelhos de cogeração. A segunda proposta foi desenvolvida através do software SAM e propõem a instalação de painéis fotovoltaicos para a cobertura de automóveis no estacionamento do aeroporto. Por fim, a terceira proposta, também simulado pelo SAM, propõem a instalação de uma turbina eólica numa região perto do aeroporto.

Para as análises econômico-financeiras foi utilizado o *Levelized Cycle Cost (LCC)*, método que utiliza a avaliação sistemática dos custos totais de um sistema durante o seu período de vida útil. Também foram realizadas análises de sensibilidade para determinar o efeito que as variações do custo de compra de eletricidade da rede e compra de gás natural (combustível da cogeração) provocariam nos cenários. As análises ambientais foram feitas através da comparação de CO<sub>2</sub>e (equivalente de dióxido de carbono) emitida. Quanto às questões técnicas, foram analisados os parâmetros envolvidos na utilização destas diferentes tecnologias para o caso de estudo específico.

O cenário com instalação de energia eólica apresentou-se o mais viável no ponto de vista financeiro, uma vez que o LCC seria 45% mais econômico do que o cenário atual e 40% mais econômico do que os cenários dos sistemas de cogeração e fotovoltaico. No quesito ambiental, o sistema de energia eólica também é o mais viável. Isso porque além de se tratar de uma fonte de energia renovável, foi a opção que com menor dependência de compra de eletricidade da rede, necessitando

comprar apenas 3% da energia elétrica que consome o cenário atual. Porém, questões técnicas tornam a instalação do sistema eólico em infraestruturas aeroportuárias uma opção arriscada. Os cenários de reutilização da cogeração e de instalação fotovoltaica apresentaram custos de investimento próximos e, em termos ambientais, a solução que sugere a utilização de tecnologia com fonte de energia fotovoltaico produziria apenas 22% a menos de CO<sub>2</sub>e do que o cenário atual, uma vez que ainda seria dependente 78% da compra de eletricidade rede. Ainda assim, apresentaria uma produção 29% menor de CO<sub>2</sub>e do que o sistema de cogeração. As duas opções mostraram-se válidas quanto aos requisitos técnicos necessários para instalação num aeroporto. A situação atual mostrou-se insatisfatória tanto no ponto de vista ambiental e econômico, quanto estratégico. A dependência da concessionária para o abastecimento de eletricidade é um tanto arriscada na ausência de concorrentes para o fornecimento de eletricidade.

**Palavras chaves:** Modelação energética; Infra-estruturas; Análise económico-financeira; Análise energética e ambiental; Análise de Sensibilidade; Energias renováveis; Cogeração e trigeração.

## Abstract

This thesis includes a comparative study of 4 different models of decision-making through energy criteria. These were chosen from among the various types of models that exist in the market because these cover different levels of complexity, from the simplest to the most complex model: System Advisor Model (SAM), EnergyPLAN, Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER) and PRIME. These energy models are used to optimize energy systems by assessing the energy potential of some region. They help to analyze not only the impact of the use and the energy efficiency of technologies, but also the financial resources involved.

This thesis also refers to the case study of an international airport that faced problems due to the shortage of electricity supply from the local electricity grid. Due to this problem in 2005, a cogeneration system was installed in this airport in order to generate its own energy in a stable way, using the grid only as a backup. However, this system stopped operating 7 years later. The possible reasons for the system failure were analyzed in the first part of this document. Subsequently, four different scenarios were studied in order to evaluate and verify the best solution for the airport's electricity power supply from a technical, economic and environmental point of view. The first proposal was the cogeneration equipment reuse. The second proposal refers to the analysis of the current scenario, whereby electricity is provided exclusively by the local electricity grid. The third scenario was modelled with SAM and proposes covering the airport parking lot with solar panels. The fourth scenario, also modelled with SAM, proposes a wind turbine installation in a region near the airport.

The Life Cycle Cost (LCC) was used for the financial and economic analyzes. That method is a tool to determine the amongst cost-effective option among competing alternatives of systems during their life-cycles. Sensitivity analysis was also used to determine the effect of changes in electricity prices from the grid and of changes in natural gas prices (cogeneration fuel) in the scenarios. The environmental analysis was made by comparing CO<sub>2</sub>e (emitted carbon dioxide equivalent). Regarding the technical questions, the involved parameters in the use of these different technologies were analyzed for this case study.

The scenario with the wind energy system was the most viable from the financial point of view, since the Life Cycle Cost would be 45% lower than the current scenario and 40% lower than the scenarios with the cogeneration and photovoltaic systems. Environmentally, the wind power system is also the most viable. This is because in addition to being a source of renewable energy, this option was the one that had less dependence on the purchase of electricity from the grid, needing to buy only 3% of the electricity that consumes the current scenario. Nevertheless, technical issues turn the installation of a wind energy system on airport infrastructures a risky option. The scenarios for reusing cogeneration and for the photovoltaic system perform similar investment costs. The comparison of environmental aspects shows that the PV system solution would produce only 22% less CO<sub>2</sub>e than the current scenario once which

would still be dependent on 78% of the electricity purchase network. Even so, it would present a 29% lower production of CO<sub>2</sub>e than the cogeneration system. Both options proved to be valid for technical requirements for installation at an airport. The current situation expressed unsatisfactory results not only environmentally, as well as economically and strategically. The utility's dependence on electricity supplies is a hazardous strategy in front of the absence of competitors for the electricity supply.

**Keywords:** Energy modeling; Economic and financial analysis; Energy and environmental analysis; Renewable energy; Cogeneration and trigeneration.

# Conteúdo

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>                                 | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivação e Objetivos                             | 1         |
| 1.2      | Contribuição da Tese                              | 2         |
| 1.3      | Estrutura da Tese                                 | 3         |
| 1.4      | Estado da arte                                    | 4         |
| 1.4.1    | Enquadramento dos Modelos                         | 4         |
| 1.4.2    | Sistemas de Produção de Eletricidade              | 8         |
| 1.4.3    | Método de Avaliação Econômica                     | 14        |
| 1.4.4    | Método de Avaliação Ambiental                     | 16        |
| <b>2</b> | <b>Descrição e Comparação Crítica dos Modelos</b> | <b>19</b> |
| 2.1      | Parte 1   | 19        |
| 2.2      | Parte 2   | 22        |
| 2.2.1    | SAM - <i>System Advisor Model</i>                 | 22        |
| 2.2.2    | EnergyPLAN  | 30        |
| 2.2.3    | HOMER   | 33        |
| 2.2.4    | PRIMES  | 37        |
| <b>3</b> | <b>Caso de Estudo</b>                             | <b>41</b> |
| 3.1      | Sistema de Cogeração no passado                   | 43        |
| 3.2      | Situação Atual                                    | 45        |
| 3.3      | Cenários Comparativos                             | 48        |
| 3.3.1    | Reutilização do sistema de cogeração              | 48        |
| 3.3.2    | Simulações  | 52        |
| <b>4</b> | <b>Discussão dos Resultados</b>                   | <b>65</b> |
| 4.1      | Análise Econômico-Financeira                      | 66        |
| 4.2      | Análises Ambientais e Técnicas                    | 67        |
| <b>5</b> | <b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>              | <b>71</b> |
| 5.1      | Conclusões  | 71        |
| 5.2      | Trabalhos Futuros                                 | 73        |

## Lista De Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Comparação entre (a) Sistema convencional de produção de eletricidade e calor, (b) Sistema de cogeração e (c) Sistema de trigeriação. ....                                     | 10 |
| Figura 2 - Esquema de <i>inputs</i> e <i>outputs</i> de dados do SAM. ....  | 28 |
| Figura 3 - Relação entre aumento da movimentação de passageiro no aeroporto e aumento no consumo de energia. ....   | 41 |
| Figura 4 - Comparação entre a eletricidade comprada da concessionária e do sistema de cogeração. ....   | 44 |
| Figura 5 – Geração de Energia solar em estruturas de estacionamento em <i>New Jersey</i> nos Estados Unidos. ....   | 53 |
| Figura 6 – Imagem do estacionamento no aeroporto e ampliação do estacionamento (abaixo). Na imagem ampliada as fileiras do estacionamento estão indicadas com a numeração de 1 a 21. .... | 54 |
| Figura 7 – Representação gráfica da turbina instalada no aeroporto num local próximo ao terminal de passageiros. ....   | 61 |

## Lista De Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Sistema de conversão de GEEs para equivalente de carbono.....  | 18 |
| Tabela 2 – Síntese das características gerais das ferramentas de modelação de energia renovável.....  | 20 |
| Tabela 3 - Utilizadores do SAM e suas respectivas finalidades.....  | 29 |
| Tabela 4 - Valores considerados para análise econômico-financeira do Situação atual. ....   | 46 |
| Tabela 5 – Cálculo pelo método LCC para o custo de energia elétrica no Situação atual. ....   | 47 |
| Tabela 6 - Valores considerados para análise econômico-financeira no cenário de Reutilização do Sistema de Cogeração. ....  | 49 |
| Tabela 7 - Cálculo do LCC para o custo total de investimento, O&M e compra de energia elétrica através da reutilização do Sistema de Cogeração.....   | 51 |
| Tabela 8 – Parâmetros técnicos do sistema referentes a 1 fileira da simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica. ....   | 56 |
| Tabela 9 – Parâmetros financeiros do sistema referentes à simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica. ....   | 56 |
| Tabela 10 – Dados de output referente a 1 fileira da Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica. ....  | 57 |
| Tabela 11 – Dados do sistema inteiro da Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica.....  | 57 |
| Tabela 12 – Cálculo do LCC para o custo total de investimento, O&M e compra de energia elétrica da Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica. ....  | 59 |
| Tabela 13 - Parâmetros técnicos do sistema referentes à Simulação de Utilização de Energia Eólica. Apenas 1 aerogerador foi considerado. ....   | 62 |
| Tabela 14 - Parâmetros financeiros do sistema referentes à Simulação de Utilização de Energia Eólica. ....  | 62 |
| Tabela 15 – Dados de output referente à Simulação de Utilização de Energia Eólica. ....   | 63 |
| Tabela 16 - Cálculo do LCC para o custo total de investimento, O&M e compra de energia elétrica da Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica. ....  | 64 |
| Tabela 17 – Comparação de custos dos sistemas (situação atual e simulações realizadas).....   | 65 |
| Tabela 18- Análise de sensibilidade dos 4 cenários em 3 diferentes situações: a. Diminuição do custo do gás natural em 2,5% ao ano a partir do sexto ano; b. Aumento do custo da energia elétrica em 2,5% ao ano a partir do sexto ano; c. Ocorrência das situações a e b simultaneamente. .... | 66 |

## Nomenclatura

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>ACV</b>             | Avaliação do ciclo de vida                              |
| <b>CO<sub>2</sub>e</b> | Equivalente de Dióxido de carbono                       |
| <b>GEEs</b>            | Gases de Efeito Estufa                                  |
| <b>GW</b>              | Gigawatt  |
| <b>GWh</b>             | Gigawatt hora   |
| <b>HOMER</b>           | <i>Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources</i> |
| <b>IRENA</b>           | <i>International Renewable Energy Agency</i>            |
| <b>LCA</b>             | <i>Life Cycle Assessment</i>                            |
| <b>LCC</b>             | <i>Life Cycle Cost</i>                                  |
| <b>LCOE</b>            | <i>Levelized Cost of Energy</i>                         |
| <b>MW</b>              | Megawatt  |
| <b>MWh</b>             | Megawatt hora   |
| <b>NREL</b>            | <i>National Renewable Energy Laboratory</i>             |
| <b>NTUA</b>            | <i>National Technical University of Athens</i>          |
| <b>O&amp;M</b>         | Operação e Manutenção                                   |
| <b>PPA</b>             | <i>Power Purchase Agreement</i>                         |
| <b>SAM</b>             | <i>System Advisor Model</i>                             |
| <b>TR</b>              | Tonelada de Refrigeração                                |
| <b>USD</b>             | <i>United State Dollar</i>                              |

# Capítulo 1

## 1 Introdução

### 1.1 Motivação e Objetivos

A indústria de energia tem uma grande importância na infraestrutura e manutenção da sociedade a nível mundial. A sociedade utiliza recursos energéticos para todas as atividades no setor econômico, seja para fornecer transporte, fabricar bens, operar computadores e outras máquinas. Produzir e distribuir energia (em forma de eletricidade, gás ou calor útil) é caro e tem um forte impacto em nosso meio ambiente. Sendo assim, é fundamental projetar e operar sistemas de energia para que estes não apenas cubram as necessidades de energia dos consumidores, mas que também façam isso com o consumo mínimo de recursos ou mitigando os efeitos adversos sobre o meio ambiente.

Este trabalho se diz respeito ao caso de estudo com análises comparativas de 4 cenários de compra e/ou geração de energia elétrica num aeroporto internacional. O propósito do estudo é comprovar que a eficiência energética, sistematicamente aplicada, traz uma série de vantagens, não só ecológicas, como também tecnológicas e econômicas.

Foram desenvolvidos 4 cenários para o consumo do aeroporto: um cenário de reutilização de equipamentos já instalados no aeroporto para geração de energia; um outro cenário utilizando apenas energia elétrica da concessionária local e 2 cenários em que de parte da eletricidade necessária seria produzida por fontes de energias renováveis. Esses 2 últimos cenários foram simulados por 1 dos softwares de auxílio à tomada de decisão apresentados nesta tese.

Os softwares utilizados para este tipo de simulações são conhecidos como modelos energéticos. Os modelos presentes neste trabalho foram escolhidos dentre os diversos tipos existentes no mercado por abranger diferentes níveis de complexidade. Esses modelos energéticos servem não só para otimizar sistemas de energia através da avaliação do potencial energético de cada região, como também para analisar o impacto do uso, a eficiência energética dessas tecnologias e recursos

financeiros envolvidos. O modelo mais apropriado para avaliar uma oportunidade de implementação de um sistema específico dependerá do objetivo pretendido, do tipo de tecnologia considerada, da complexidade do projeto, da formatação e desenvoltura do utilizador e dos dados disponíveis.

Foi objetivo deste estudo obter um conjunto de dados, nomeadamente para:

- Avaliar e comparar as características de 4 modelos disponíveis no mercado, incluindo as tecnologias que estes avaliam, a escala e o nível de análise, sua abordagem e limitações de modelação, *inputs* de dados necessários e *outputs* típicos;
- Analisar o cenário em que foi instalado um sistema de cogeração, mas que parou de operar. Também serão estudados os possíveis motivos pelos quais o sistema tenha vindo a falhar;
- Analisar a viabilidade de reutilização dos equipamentos de cogeração ainda instalados no aeroporto;
- Expor aspectos ambientais e financeiros da situação atual real, em que o aeroporto compra toda a energia elétrica que utiliza da rede concessionária local;
- Utilizar um dos modelos para gerar simulações para o caso de estudo com tecnologias distintas e citar aspectos ambientais, técnicos e económicos dessas simulações;
- Comparar os cenários tecnicamente, ambientalmente e economicamente;
- Perceber qual a importância e sensibilidade dos modelos na tomada de decisões para projetar ou otimizar sistemas de geração de energia;
- Contribuir com os resultados finais para a melhoria da eficiência de projetos no setor energético.

## 1.2 Contribuição da Tese

O presente trabalho oferece comparações e análises, tanto detalhada quanto sintética sobre 4 modelos de tomada de decisão através de critérios energéticos. Poderá, portanto, vir a servir como apoio para conhecimento dos modelos, bem como

auxiliar na escolha do modelo mais adequado para estudo de sistemas de energia em infraestruturas.

Além disso, o trabalho sugere quatro resoluções ao problema do estudo de caso exposto, que se refere a compra e/ou geração de energia elétrica num aeroporto internacional. As propostas foram analisadas, comparando dados técnicos, financeiros e ambientais. Foi feito o passo-a-passo desde o começo até o fim, com o fornecimento de informações como: a maneira como os cenários foram elaborados; como os cálculos foram realizados; onde encontrar as fontes da base de dados necessária; como analisar os parâmetros técnicos, financeiros e econômicos de um projeto; e como comparar os resultados. Essas informações poderão auxiliar em trabalhos futuros servindo este como base para avaliações semelhantes.

### 1.3 Estrutura da Tese

Esta dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos. No Capítulo 1, **Introdução**, são apresentados os principais objetivos para este projeto bem como o contexto e estado da arte relativo ao tema. O Capítulo 2, **Descrição e Comparação Crítica dos Modelos**, foram feitas análises dos modelos em duas partes, a primeira mais sucinta e a segunda mais detalhada. O **Caso de Estudo** está descrito no Capítulo 3, dando nome a este capítulo. Também estão expostas as opções de sistemas para fornecimento de eletricidade disponíveis na situação atual, a reutilização do sistema de cogeração e as simulações geradas pelo modelo SAM. Neste capítulo as simulações foram contextualizadas e os sistemas propostos foram descritos, com de informações como as fontes de base de dados fornecidas como *input* e considerações sobre os *outputs*. As análises técnicas, econômicas e ambientais de todos os cenários (real e simulados) apresentados no capítulo anterior estão apresentadas no Capítulo 4, que se intitula: **Discussão dos Resultados**. Este capítulo também expõe os resultados finais e comparação de todas as soluções. As **Conclusões e Trabalhos Futuros** estão expostos no Capítulo 5, dando nome a este capítulo. Trabalhos futuros relacionados com o tema também estão descritos neste último capítulo da dissertação.

## 1.4 Estado da arte

### 1.4.1 Enquadramento dos Modelos

O planeamento de sistemas energéticos a nível internacional, nacional ou local tem se tornado importante devido a fatores que variam desde assuntos ambientais como a crescente atenção dada à redução das emissões de gases de efeito estufa, a exploração ótima dos recursos energéticos ou até assuntos econômicos, como as consequências na indústria e na segurança de suprimentos energéticos.

É necessário fazer análises técnicas fundamentadas para justificar a implementação de novas tecnologias e então indicar quais serão os benefícios que tais mudanças trarão para o sistema, tanto no ponto de vista ambiental, como financeiro e social. Tais análises requerem ferramentas numéricas que podem criar soluções mais rápidas e completas para esses problemas modelando sistemas de energia (Connolly, et al. 2010).

Desenvolvidos ao longo da segunda metade do século XX, os modelos de sistemas de energia são métodos de análise usados para gerar informações sobre a oferta e a demanda de energia. Essas ferramentas para tomada de decisão estão tendo, gradualmente, uma maior relevância e têm sido cada vez mais utilizadas como apoio para ajudar a solucionar os desafios crescentes correspondente à natureza mutável do sistema energético do século XXI (Pfenninger, Hawkes and Keirstead 2014).

É difícil identificar qual ferramenta é a mais adequada para avaliação do potencial das fontes de energia uma vez que a quantidade de modelos no mercado é muito grande (Connolly, et al. 2010). Esses modelos distinguem-se em escala de aplicação, disponibilidade, complexidade, *inputs* e *outputs* fornecidos pelo software. Enfim, são numerosas as ferramentas dentro de cada modelo. Os modelos devem equilibrar simplicidade e facilidade de uso, acuidade e representatividade, além de dispersão dos dados.

Neste trabalho, foram selecionados quatro modelos existentes para serem analisados e comparados. Os quatro diferem pelo nível de complexidade, partindo de um modelo mais simples (ainda que completo) para o modelo mais complexo. Esses

modelos são: *System Advisor Model (SAM)*, *EnergyPLAN*, *Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER)* e *PRIME*. Foram escolhidos devido às diferentes ferramentas que cada um possui e respectiva aplicabilidade. Nesta seção do trabalho, será feita uma breve apresentação dos modelos e os estudos de caso correspondentes a cada um.

#### 1.4.1.1 SAM - *System Advisor Model*

O modelo SAM é um modelo financeiro e de desempenho energético projetado para facilitar a tomada de decisões de pessoas envolvidas no setor de energia renovável e pode ser aplicado em escala local ou municipal. O software faz previsões de desempenho e estimativas de custo de eletricidade para projetos de energia conectados à rede elétrica. Modela uma variedade de tecnologias: sistemas solares fotovoltaicos; armazenamento de baterias; aquecimento solar de água; sistemas de energia eólica; sistemas de energia geotérmica e sistemas de energia de biomassa (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014).

Há várias publicações que aprofundaram a análise de projetos com ajuda do SAM. Silva, *et al.* (Silva and Souza 2016) utilizaram o modelo para fazer uma comparação entre três grandes cidades brasileiras, a fim de descobrir qual delas teria melhores condições para aproveitamento fotovoltaico. Guzman, *et al.* (L.Guzman, Henao and R.Vasquez 2013) utilizaram o software para realizar uma simulação anual de uma usina solar de concentradores parabólicos na cidade de Barranquilla, Colombia. Blair, *et al.* (Blair, Dobos and Sather 2012) coletaram dados de quatro sistemas fotovoltaicos em três diferentes cidades dos Estados Unidos (Washington, Golden e Oklahoma). Estes autores compararam posteriormente os dados de desempenho medidos com os resultados de desempenho simulados utilizando o SAM e uma base de dados climáticos apropriados. Este estudo de caso mostrou uma boa correspondência entre os dados medidos e os simulados (diferença menor que 6% para qualquer mês).

#### 1.4.1.2 *EnergyPLAN*

O *EnergyPLAN* tem como principal objetivo auxiliar o projeto de estratégias

regionais ou nacionais de planeamento energético através da análise de consequências das diferentes estratégias de investimento e da simulação de todo o sistema energético (que inclui desde o fornecimento de calor e eletricidade, até os setores de transporte e indústria). Alguns *inputs* gerais são: demandas elétricas; capacidades e eficiência do sistema; estratégias opcionais diferentes de regulação (enfatizando a importação e exportação) e a produção excedente de eletricidade. Os *outputs* são: balanços energéticos e produções anuais resultantes; consumo de combustível; importação e exportação. O modelo foi projetado para fazer dois tipos diferentes de análises. A primeira é uma análise técnica baseada tanto na quantidade de energia (calor ou eletricidade) que o sistema necessita, quanto na capacidade de produção. A segunda faz uma otimização econômica do comportamento baseado em mais *inputs* dos custos marginais e das premissas de preço hora a hora no mercado internacional de eletricidade (Aalborg University 2006).

Já foram feitos inúmeros estudos de caso com o EnergyPLAN. Em 2004, Lund (Lund, Large-scale integration of wind power into different energy systems 2004) utilizou o software para comparar os potenciais de curto e longo prazo de diferentes estratégias de integração em grande escala da energia eólica na Dinamarca. Em 2005 (Lund, Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply 2005), o EnergyPLAN foi utilizado por Lund para analisar combinações ideais de fontes de energia renováveis. Para tanto, foi feita integração em larga escala de energia eólica, fotovoltaica e energia das ondas num sistema energético de referência da Dinamarca. A ideia foi aproveitar os diferentes padrões nas flutuações das diferentes fontes renováveis e o objetivo foi identificar combinações ótimas do ponto de vista técnico. Em 2008, o software foi usado por Lund, *et al.* (Lund and Kempton, Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G 2008) para avaliar a integração de energia eólica com tecnologia do tipo veículo à rede (V2G). Além disso, o EnergyPLAN também já foi utilizado em 2006 por Lund, *et al.* para simular um sistema de energia 100% renovável para a ilha de Mljet, na Croácia (Lund, Duić, et al. 2006).

#### 1.4.1.3 HOMER - Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources

O HOMER é um software de simulação e otimização de sistemas de energia tanto autônomos quanto conectados à rede. Este modelo inclui qualquer combinação de turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, pequenas centrais hidrelétricas, energia de biomassa, geradores de motores de combustão interna, microturbinas, células de combustível, baterias e armazenamento de hidrogênio, servindo cargas elétricas e térmicas (por sistemas de aquecimento individual ou urbano). O HOMER modela o comportamento físico de um sistema de energia e seu custo total de instalação e operação ao longo de sua vida útil. O software permite que o utilizador compare muitas opções diferentes de projeto com base em seus méritos técnicos e econômicos. Também auxilia a compreensão e quantificação da incerteza ou alterações nas variáveis de *input* (análise de sensibilidade). O objetivo da simulação de otimização é avaliar a viabilidade econômica e técnica de um grande número de opções tecnológicas, considerando variações nos custos de tecnologia e disponibilidade de recursos energéticos (Lambert, Gilman and Lilienthal 2006).

Há uma lista de publicações que envolvem a utilização do HOMER como ferramenta de análise e está disponível em sua página online em (HOMER Energy n.d.). Foi utilizado por Mendes (Mendes 2008) para fazer simulações, com objetivo de avaliar a melhor combinação para um sistema híbrido na ilha de Boa Vista, em Cabo Verde. Foi aplicado também para fazer um estudo de sensibilidade e verificar quais as implicações num sistema híbrido, na existência de alterações em algumas das variáveis de entrada. Shahzad, *et al.* (Shahzad, et al. 2017) utilizaram o HOMER num estudo cujo objetivo era propor um projeto econômico e otimizado para a produção de eletricidade utilizando fontes de energia híbrida fotovoltaica e de biomassa para uma fazenda agrícola e uma comunidade residencial localizada num vilarejo no Paquistão. Khan e Iqbal (Khan and Iqbal 2004) utilizaram o software como ferramenta de dimensionamento e otimização para simular um sistema autônomo com hidrogênio no Canadá. Ma, Yang e Lu (Ma, Yang and Lu 2014) fizeram um estudo de viabilidade detalhado e uma avaliação técnico-econômica de um sistema de energia solar híbrido autônomo com acumulação para uma ilha remota. O software permitiu que fossem feitas as avaliações econômicas e técnicas desse projeto.

#### 1.4.1.4 PRIMES

O software PRIMES fornece projeções detalhadas da demanda de energia, fornecimento, preços e investimento para o futuro, cobrindo todo o sistema elétrico, incluindo as emissões individuais para cada país europeu e para o comércio de commodities de energia em toda a Europa. Difere de outros modelos uma vez que sua combinação de modelação comportamental segue uma base microeconômica com aspectos técnicos e financeiros, cobrindo todos os setores e mercados com um alto nível de detalhes. O software concentra-se nos preços como um meio de equilibrar a demanda e a oferta simultaneamente em vários mercados de energia e emissões. O modelo determina os volumes de equilíbrio de mercado, encontrando os preços de cada forma de energia de tal modo em equilibrar a produção com a procura (E3M Lab 2014).

O PRIMES foi anteriormente utilizado por Capros, Mantzos, Papandreou e Tasios (Capros, Mantzos, et al. 2008) para criar perspectivas energéticas para a União Europeia para até 2030. Também foi utilizado pela Comissão das Comunidades Europeias (Commission of the European Communities 2008) em 2008 para desenvolver uma ação em matéria de alterações climáticas e um pacote de políticas de energias renováveis para a União Europeia para 2020. Em 2017, Capros, *et al.* (Capros, Tasios, et al. 2017) aplicaram como ferramenta de suporte para avaliação de impacto da estratégia de mercado da Comissão Europeia. Contemplou a avaliação de opções de política, análise do comportamento dos investidores e da capacidade dos mercados para sustentar níveis adequados de investimentos nos próximos anos. O PRIMES tem sido usado por vários governos da UE, bem como por empresas privadas.

#### 1.4.2 Sistemas de Produção de Eletricidade

Nesta seção do trabalho será feita uma breve abordagem aos conceitos de sistemas de cogeração, fotovoltaicos e eólicos, uma vez que essas tecnologias foram utilizadas no nosso caso de estudo.

#### 1.4.2.1 Cogeração

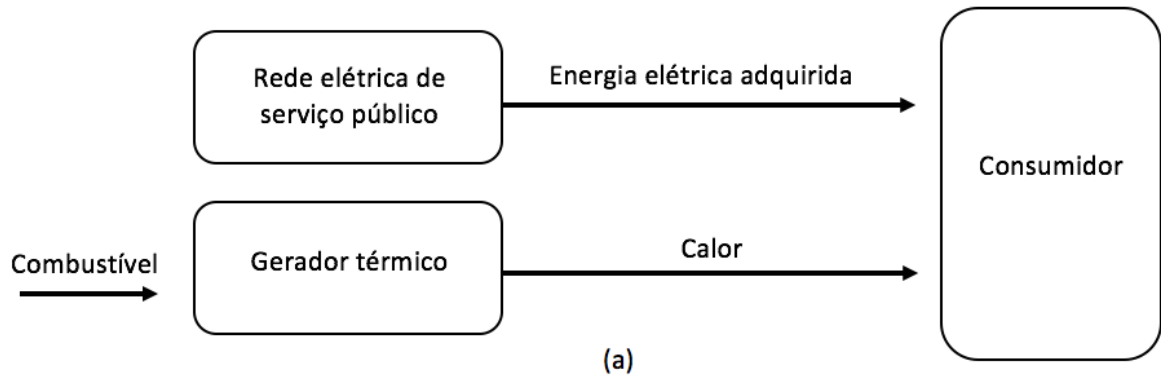
A cogeração, também conhecida pelo acrônimo CHP (*Combined Heat and Power*) tem como princípio a produção simultânea e sequencial de duas formas de energia (térmica e elétrica) a partir de uma única fonte de energia primária (combustível). O propósito dos sistemas de cogeração é aumentar a produção de eletricidade a partir do uso mais eficiente do combustível utilizado. Tradicionalmente a produção de eletricidade e de calor é feita em separado. As tecnologias convencionais de produção de energia elétrica e térmica têm eficiências de aproximadamente 40%. Sendo assim, cerca de 60% da energia contida no combustível é rejeitada sob a forma de calor. Nos sistemas de cogeração o aproveitamento da energia dissipada para produção de eletricidade faz com o que o sistema atinja eficiências com valores superiores a 75% (cerca de 35% usada na produção de energia elétrica, 50% transformado em energia térmica) (Castro 2012).

A energia térmica produzida pode ser reutilizada no processo industrial, ser recuperada e convertida para utilização em aquecimento de espaços ou de água, ou pode ainda ser recuperada e utilizada para produzir frio. A produção simultânea de eletricidade, calor e frio a partir de um único combustível foi designada com o nome de trigeração, que compreende sistemas de CHP combinados com *chillers* de absorção, que são máquinas resfriadoras de água. A água produzida por estes é utilizada com o objetivo de arrefecer o ar, produtos ou equipamentos, de acordo com a necessidade. A potência medida pelos *chillers* é em tonelada de refrigeração (TR) (Sá 2012, Silva and Costa 2005).

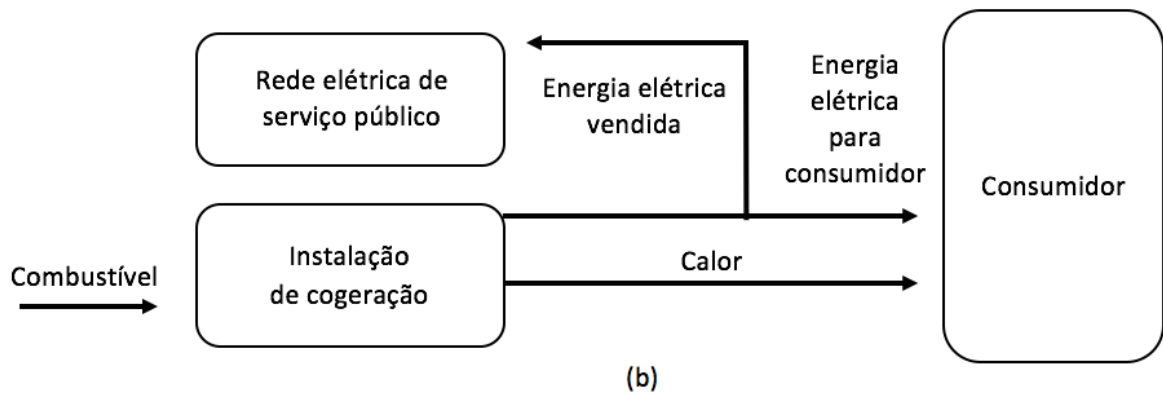
A cogeração é vista como um conceito que engloba várias tecnologias: o princípio é baseado na combinação de um motor térmico e de um sistema que aproveite o calor dissipado. As usinas de CHP mais modernas alcançam eficiências de 90% ou mais. Além disso, geralmente as instalações de cogeração estão situadas o mais próximo possível do local de consumo, o que reduz ainda mais as perdas de transporte (IEA - International Energy Agency 2008).

Na Figura 1 estão representados três tipos de sistemas de instalação.

### SISTEMA CONVENCIONAL DE PRODUÇÃO SEPARADA DE ELETRICIDADE E CALOR



### SISTEMA DE COGERAÇÃO



### SISTEMA DE TRIGERAÇÃO

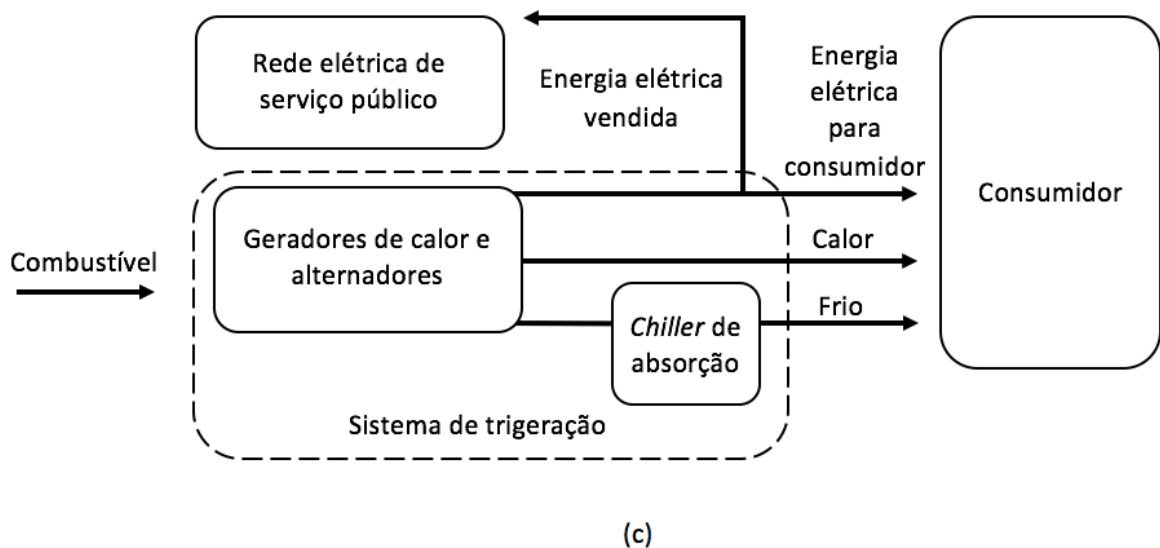


Figura 1 - Comparação entre (a) Sistema convencional de produção de eletricidade e calor, (b) Sistema de cogeração e (c) Sistema de trigeração.

Na Figura 1, a primeira representação (a) é baseada num sistema convencional em que eletricidade e de calor são produzidos separadamente. A segunda (b) representa o princípio de cogeração, em que através de um mesmo combustível é possível produzir simultaneamente energia elétrica (que pode ser consumida ou vendida para a rede) e energia térmica (utilizada pelo consumidor). A terceira (c) representa o princípio de trieração, que implica a produção simultânea de eletricidade, calor e frio a partir de um único combustível.

#### *1.4.2.2 Fotovoltaico*

A energia solar é a energia radiante produzida no Sol através de reações nucleares de fusão. A intensidade de energia solar disponível depende de fatores como: o dia do ano; a hora; a latitude e a orientação e inclinação do receptor. A recolha de energia se dá por dispositivos chamados coletores solares, projetados para captar energia, com ou sem concentração de raios solares (RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. 2007).

Segundo Castro (Castro 2012) há dois propósitos em que a radiação solar é utilizada para a conversão de energia: obtenção de energia elétrica e obtenção de energia térmica. Neste capítulo vamos abordar o primeiro caso: sistemas fotovoltaicos.

A conversão fotovoltaica aproveita a radiação solar para produzir eletricidade através da utilização de painéis fotovoltaicos. Esses painéis são constituídos com materiais semicondutores em face à radiação solar um fluxo de elétrons é gerado. O movimento orientado dos elétrons possibilita o estabelecimento de uma corrente elétrica (Castro 2012, RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. 2007).

Há vários tipos de painéis fotovoltaicos no mercado. A escolha do tipo de painel fotovoltaicos, bem como a quantidade a ser utilizada são características a serem determinadas pelo tipo de aplicação e pelas necessidades energéticas envolvidas, assim como pelos critérios do projeto, que envolve fatores como preço e espaço disponível (RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. 2007).

Há dois tipos de sistemas fotovoltaicos: os sistemas isolados (*off-grid*) e os sistemas conectados à rede elétrica (*on-grid*). Os sistemas isolados não são conectados à rede pública, ou seja, a produção de eletricidade obtida se emprega para autoconsumo da instalação. As instalações que estão conectadas à rede elétrica geralmente injetam a produção elétrica obtida pelas células fotovoltaicas na rede pública elétrica. Esse tipo de instalação é uma forma de amortizar uma instalação fotovoltaica e obter benefícios (RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. 2007).

Os sistemas *on-grid* podem ser centrais fotovoltaicas, em que a energia elétrica gerada é direcionada à rede elétrica como noutra central convencional de geração elétrica. Podem ser também sistemas fotovoltaicos em edificações em que uma parte da energia gerada é utilizada para o consumo próprio do edifício, enquanto que a energia excedente é entregue à rede elétrica (RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. 2007).

#### 1.4.2.3 Eólico

A energia eólica é a energia cinética associada ao ar em movimento e pode ser aproveitada diretamente, como por exemplo o aproveitamento de corrente de ar para ventilação de ambientes, ou ser transformada noutros tipos de energia, como a elétrica. A conversão de energia cinética em elétrica é efetuada em equipamentos próprios, designador por geradores eólicos<sup>1</sup>. Geralmente o rotor é composto é composto por três pás que rodam devido à ação do vento incidente. A energia mecânica obtida nesse processo é transmitida a um gerador elétrico nos terminais onde é realizado o recolhimento de energia elétrica. O rendimento de conversão de um gerador moderno pode atingir um valor máximo próximo de 50% (Castro 2012).

Os geradores eólicos devem ser instalados em locais com o potencial eólico adequado. A avaliação do potencial eólico de uma região requer trabalhos

---

<sup>1</sup> Conforme Castro (Castro, 2012) esses equipamentos também são conhecidos como turbinas eólicas. O autor considera que a denominação possa ser redutora, uma vez que tradicionalmente o nome turbina é indicado para equipamentos em que se processa a transformação de energia primária em mecânica, preferindo, portanto, a designação “gerador eólico”.

sistemáticos de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime de ventos. A partir dessas medidas de velocidade é possível determinar a distribuição de velocidade de vento numa deslocação, ou seja, o número de horas por ano com uma determinada velocidade de vento. Dessa maneira pode determinar-se a energia que se disporá ao longo do ano. As centrais eólicas são geralmente instaladas em locais cuja velocidade média anual do vento excede 6 m/s (RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. 2007, Castro 2012, APREN - Associação de energias renováveis 2018).

Assim como nos sistemas fotovoltaicos, os sistemas eólicos podem ser isolados ou conectados à rede elétrica. Os sistemas isolados não são conectados à rede elétrica e são construídos com um propósito local e específico. É uma solução geralmente utilizada em locais remotos, uma vez que se torna o modo mais prático e econômico de obter eletricidade nestes lugares. A energia produzida é armazenada em baterias para caso de período sem geração de energia. Os sistemas conectados à rede elétrica não utilizam baterias e controladores de carga, o que os torna cerca de 30% mais eficientes. Estes sistemas são utilizados tanto para abastecer uma edificação como também são injetados na rede no caso da geração maior que o consumo (ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica 2005, RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. 2007).

A intermitência do vento é uma das desvantagens dessa tecnologia, uma vez que o sistema depende da ocorrência de vento em densidade e velocidade ideais, e esses parâmetros sofrem variações anuais, sazonais e diárias. Essa variabilidade do vento e a dificuldade para prever a potência gerada a cada momento, cria problemas para inclusão de eletricidade de maneira controlada em sistemas ligados à rede elétrica. Tais problemas são, entretanto, resolvidos com modelos de previsão (RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. 2007, ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica 2005, WindEurope 2018).

### 1.4.3 Método de Avaliação Econômica

#### 1.4.3.1 Método Life Cycle Cost (LCC)

Nesta seção será apresentado apenas o método escolhido para análise econômico-financeira do caso de estudo: o *Life Cycle Cost* (LCC).

O método LCC é uma ferramenta desenvolvida para auxiliar os gestores de ativos na tomada de decisões com base na realização de uma avaliação sistemática dos custos total de um sistema durante o seu período de vida útil. Alguns custos incluídos são os custos de: aquisição; instalação; operação e manutenção (preventiva e corretiva). A solução com o menor custo global é a solução considerada mais eficiente na perspectiva de custos (Ruegg and Marshall 1990).

O método LCC é dado pela Equação 1 (Ruegg and Marshall 1990):

$$LCC = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+d)^t} \quad (1)$$

Em que:

$C_t$  – Soma de todos os custos significativos ajustados no tempo, relevantes para um determinado curso de ação durante o período de estudo  $t$ ;

$n$  – Número de períodos que compreendem o período de estudo;

$d$  – Taxa de atualização para ajustar os fluxos de caixa (*cash-flows*) ao valor atual.

O método é simples e requer a execução dos seguintes passos (Ruegg and Marshall 1990):

- Definir um arranjo com diferentes soluções;
- Definir os custos significativos associados a cada solução, ajustados no tempo, durante o período de tempo relevante. Incluem custos iniciais e futuros;
- Subtrair dos custos os fluxos de caixa positivos, tais como valores residuais ou de revenda que são importantes na tomada de decisão;
- Repetir o cálculo do LCC para outras alternativas;

- Comparar os resultados de cada uma das alternativas e escolher o projeto mais viável (cujo LCC mínimo).

#### 1.4.3.2 Método Levelized Cost of Energy

O método de custos nivelados de eletricidade (tradução para a expressão inglesa *Levelized Cost of Energy*, LCOE) permite comparar o custo da eletricidade produzida em usinas de energia por diferentes tecnologias (por exemplo, eólica, solar, gás natural) cujos períodos de vida, tamanho do projeto, custo de capital, risco, retorno e capacidades podem ser diferentes (Fraunhofer ISE 2015).

Esse método permite determinar quanto dinheiro deve ser produzido por unidade de eletricidade (KWh, MWh, ou outro tipo de energia, como aquecimento doméstico) para recuperar os custos do período de vida do sistema. Isso inclui o investimento de capital inicial, os custos de manutenção, o custo do combustível necessário para o sistema (se houver), quaisquer custos operacionais e a taxa de desconto (Sayigh 2012).

O cálculo do LCOE médio é feito com base no método do valor presente líquido, no qual a soma de todos os custos (investimento, combustível, emissões, operação e manutenção, desmatamento, etc.) durante a vida útil da usina são calculados com base na aplicação de desconto de uma data de referência mútua. Os valores das despesas são divididos pelos valores da geração de energia da usina. Nesse método a energia gerada corresponde implicitamente aos lucros da venda dessa energia. Quanto mais esses rendimentos forem substituídos no futuro, menor será seu valor presente líquido (Fraunhofer ISE 2015, IEA - International Energy Agency and NEA - Nuclear Energy Agency 2015).

Os LCOE são calculados usando a Equação 2 (Fraunhofer ISE 2015):

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+d)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{M_{t,el}}{(1+d)^t}}$$

Em que: (2)

$I_0$  – Despesas de investimento (em EUR, USD, ou qualquer outra moeda);

$C_t$  – Custos anuais totais (combustível, custo de O&M) no ano  $t$  (unidade deve ser a mesma da moeda utilizada nas despesas de investimento);

$M_{t,el}$  – Quantidade de eletricidade produzida no ano  $t$ ;

$d$  – Taxa de desconto real (em %);

$n$  – Vida útil econômica em anos ;

$t$  – Ano de vida (1, 2, 3, ...  $n$ ).

O método LCOE é uma abstração da realidade e tem como objetivo comparar diferentes tipos de plantas de geração. Isso não inclui outros aspectos, como a capacidade de reagir à demanda de eletricidade e não é um método adequado para determinar a viabilidade financeira de uma usina de energia específica. Para isso, um cálculo de financiamento deve ser concluído levando em conta todas as receitas e despesas com base em um modelo de fluxo de caixa (Fraunhofer ISE 2015).

#### 1.4.4 Método de Avaliação Ambiental

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), mais conhecida como LCA (*Life Cycle of Assessment*) é uma técnica desenvolvida para mensurar os possíveis impactos ambientais causados como resultado da fabricação e utilização de determinado produto ou serviço, com base na identificação de insumos e emissões de energia e materiais liberados para o meio ambiente (IEA - Bioenergy 2011).

Os impactos ambientais são calculados ao longo de todas as fases do ciclo de vida útil do produto, sendo, por isso, conhecido como tendo uma abordagem "do berço ao túmulo". O ciclo de vida é referente a todas as etapas de produção e uso do produto, desde a extração das matérias-primas, passando pela produção, distribuição até o consumo e disposição final, contemplando também reciclagem e reuso quando for o caso (IEA - Bioenergy 2011, Rocco, Colombo and Sciubba 2014).

Há muitas discussões quanto às mudanças climáticas e emissões de CO<sub>2</sub>, entretanto esses tipos de impacto ambientais não são os únicos possíveis no processo

produtivo. Os fluxos de matéria e energia envolvidos no ciclo de vida de um produto devem ser medidos e relacionados a várias categorias de impacto ambiental, para que seja possível compreender as consequências da fabricação e uso de um produto no meio ambiente (IEA - Bioenergy 2011).

A Organização Internacional para Padronização, também conhecida como ISO (*International Standards Organization*) publicou uma série de normas que determinam a estrutura, os princípios, os requisitos e as diretrizes que devem constar em um estudo de LCA. Conforme definido na ISO 14040 (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas 2001), um estudo típico de LCA é dividido em quatro fases, com a seguinte estrutura:

1. **Definição dos Objetivos e Escopo:** Definição e descrição do objetivo da análise. Nessa fase estabelece-se o contexto em que a avaliação é desenvolvida.
2. **Análise de Inventários:** É a fase em que os dados que representam os fluxos de massa e energia de todo o ciclo de vida são coletados, dentro do que foi estabelecido na fase anterior.
3. **Avaliação dos Impactos:** Os fluxos definidos no inventário são associados em termos de categorias de impactos ambientais. É feita uma multiplicação dos valores brutos por fatores de equivalência que remetem a resultados em unidades comuns. Um exemplo é quando o impacto é determinado pela soma das emissões de todos os gases do efeito estufa (GEEs), cada um expresso em termos equivalentes ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>e), calculado a partir de seu aquecimento global reativo.
4. **Interpretação:** Por fim busca-se identificar as questões significativas do estudo, bem como a integridade, a sensibilidade e a consistência dos resultados. Só então são definidas conclusões, as limitações e as recomendações do estudo.

O CO<sub>2</sub>e, ou equivalente de dióxido de carbono, é uma unidade padrão para medir pegadas de carbono (do inglês *carbon footprints*). A ideia é expressar o impacto de cada gás de efeito estufa em termos da quantidade de CO<sub>2</sub> que criaria a mesma quantidade de aquecimento. Dessa forma, a pegada de carbono que consiste em vários gases de efeito estufa pode ser expressa como um único número. Cada gás de efeito estufa tem um potencial de aquecimento global diferente e persiste por um período diferente na atmosfera. Uma quantidade de GEE pode ser expressa como CO<sub>2</sub>e pela multiplicação da quantidade de GEE pelo seu potencial de aquecimento global. Através da Tabela 1 é possível converter os GEE em equivalentes de CO<sub>2</sub> para que possam ser comparados (Brander 2012).

**Tabela 1 – Sistema de conversão de GEEs para equivalente de carbono.**

| <b>GEEs</b>                    | <b>Fórmula</b>                  | <b>Potencial de aquecimento global (horizonte de 100 anos)</b> |
|--------------------------------|---------------------------------|--|
| <b>Dióxido de carbono</b>      | CO <sub>2</sub>                 | 1,00   |
| <b>Metano</b>                  | CH <sub>4</sub>                 | 25,00  |
| <b>Óxido nitroso</b>           | N <sub>2</sub> O                | 298,00   |
| <b>Hexafluoreto de enxofre</b> | SF <sub>6</sub>                 | 22,80  |
| <b>Hidrofluorocarbono-23</b>   | CHF <sub>3</sub>                | 14,80  |
| <b>Hidrofluorocarbono-32</b>   | CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>  | 675,00   |
| <b>Perfluorometano</b>         | CF <sub>4</sub>                 | 7,39   |
| <b>Perfluoroetano</b>          | C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>   | 12,20  |
| <b>Perfluoropropano</b>        | C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>   | 8,83   |
| <b>Perfluorobutano</b>         | C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>  | 8,86   |
| <b>Perfluorociclobutano</b>    | c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> | 10,30  |
| <b>Perfluoropentano</b>        | C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>  | 13,30  |
| <b>Perfluorohexano</b>         | C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>  | 9,30   |

**Fonte: (IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change 2007).**

Por exemplo, 1 kg de metano emitido pode ser expresso como 25 kg de CO<sub>2</sub>e (1 kg de CH<sub>4</sub> \* 25 = 25 kg CO<sub>2</sub>e).

## Capítulo 2

### 2 Descrição e Comparação Crítica dos Modelos

Neste capítulo serão feitas comparações e análises dos modelos. A pesquisa foi dividida em duas partes: Parte 1 - Apresentação e comparação das características relevantes dos modelos abordados de maneira sintética (em tabela); Parte 2 - Explicação detalhada (em texto) com base em perguntas pré-estabelecidas e que serão apresentadas no decorrer do capítulo.

#### 2.1 Parte 1

As características relevantes dos modelos abordados nesse trabalho estão representadas na Tabela 2. Essas características estão subdivididas em 6 grupos:

1. Escala temporal;
2. Escala espacial;
3. Otimização;
4. Tipo de tecnologia;
5. Complexidade na parametrização;
6. Disponibilidade.

**Tabela 2 – Síntese das características gerais das ferramentas de modelação de energia renovável.**

| <b>Grupo</b> | <b>Característica</b>                       | <b>SAM</b> | <b>EnergyPLAN</b> | <b>HOMER</b>   | <b>PRIME</b> |
|--------------|---|------------|-------------------|----------------|--------------|
| <b>1</b>     | a. Simulação                                | X          | X                 | X              | X            |
|              | b. Cenário                                  |            | X                 | X              | X            |
| <b>2</b>     | c. Escala local                             | X          |                   | X              |              |
|              | d. Escala distrital                         | X          |                   | X              |              |
|              | e. Escala nacional                          |            | X                 |                | X            |
| <b>3</b>     | f. Otimização de operação                   | X          | X                 | X              | X            |
|              | g. Otimização de investimento               | X          | X                 | X              | X            |
| <b>4</b>     | h. Energia fotovoltaica                     | X          | X                 | X              | X            |
|              | i. Energia eólica                           | X          | X                 | X              | X            |
|              | j. Energia de biomassa                      | X          | X                 | X              | X            |
|              | k. Armazenamento em bateria                 | X          | X                 | X              |              |
| <b>5</b>     | l. Modelação de centrais elétricas extensas | X          | X                 | X              | X            |
|              | m. Ferramentas iniciantes                   | X          |                   |                |              |
|              | n. Ferramentas avançadas                    | X          | X                 | X              | X            |
| <b>6</b>     | o. Versão Gratuita                          | X          | X                 | X <sup>2</sup> |              |

### **Grupo 1. Escala temporal**

- a. Simulação: É uma ferramenta que tem como objetivo simular a opção de um determinado conjunto de demandas de energia. É capaz de modelar uma variedade de opções para que essas possam ser comparadas entre si, ao invés de modelar apenas uma solução otimizada com base nos dados pré-definidos. Normalmente essa ferramenta é operada em intervalos de tempo por hora durante um período de um ano.
- b. Cenário: Essa é uma ferramenta de simulação, mas que combina uma série de anos num cenário de longo prazo. Em geral, esse tipo de ferramenta funciona em intervalos de tempo de 1 ano e combinam esses resultados anuais dentro de um cenário entre 20 a 50 anos.

<sup>2</sup> A versão utilizada neste trabalho foi gratuita.

## **Grupo 2. Escala espacial**

- c. Escala local: Esses tipos de modelo têm a capacidade de modelar edifícios residenciais e comerciais e também em escala de serviço público.
- d. Escala distrital: As ferramentas de nível distrital exigem um utilizador que possa fornecer um conjunto de dados mais detalhados para o resultado. Podem analisar sistemas com mais detalhes do que os modelos que possuem ferramentas de múltipla escala. Essas ferramentas podem modelar prédios residenciais e comerciais.
- e. Escala nacional: Ferramenta focadas em projetos de grande escala. Esses modelos exigem conjuntos de dados mais avançados para obter resultados mais precisos.

## **Grupo 3. Otimização**

- f. Otimização de operação: São ferramentas utilizadas para potencializar o trabalho de uma determinada solução energética através de soluções associadas a questões técnicas. São, de modo geral, também são ferramentas de simulação.
- g. Otimização de investimento: É uma ferramenta que permite melhorar os investimentos num sistema de energia. Geralmente são ferramentas de cenário e otimizam aplicação de bens em novas tecnologias e centrais de energia a fim de maximizar o desempenho financeiro de todo sistema.

## **Grupo 4. Tipo de Tecnologia**

- h. Energia fotovoltaica: Sistema cuja energia é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade.
- i. Energia eólica: Sistema em que o vento é transformado em energia cinética para produzir eletricidade.
- j. Energia de biomassa: Produção de energia através de matéria orgânica de origem vegetal ou animal.
- k. Armazenamento em bateria: Baterias utilizadas para armazenar o excesso de energia elétrica produzida.

## **Grupo 5. Complexidade na parametrização**

- l. Modelação de centrais elétricas extensas: Capacidade de criar sistemas de energia complexos
- m. Ferramenta iniciante: Ferramenta simplificada e de fácil utilização. Não requer formação avançada.
- n. Ferramenta avançada: Requer um utilizador com conhecimento técnico, com capacidade de fornecer maior quantidade de dados.

## **Grupo 6. Disponibilidade**

- o. Versão Gratuita: Quando modelo requer pagamento ou não.

## 2.2 Parte 2

Essa parte da pesquisa consistiu em comparar e estudar os modelos através das respostas às seguintes questões:

- A. Que tipo de modelo é e para que serve?
- B. Quais são suas aplicações e quando é normalmente usada?
- C. Quais são as principais propriedades da ferramenta (características básicas sobre o tipo de ferramenta em questão)?
- D. Quem e quantos são os utilizadores que já usaram a ferramenta?
- E. Como a ferramenta pode ser obtida?
- F. Como a ferramenta foi usada anteriormente (estudo de caso) e qual foi o foco específico? (Já explicado no Capítulo 1, 1.2. Enquadramento dos Modelos).

As respostas sobre cada um modelo são apresentadas seguidamente.

### 2.2.1 SAM - *System Advisor Model*

#### **A. Que tipo de modelo é e para que serve?**

O SAM é um modelo financeiro e de desempenho projetado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), com apoio do Departamento de Energia dos

Estado Unidos (DOE) (OpenEI 2014). Foi desenvolvido em 2004 e serve tanto para modelação detalhada de desempenho, quanto para modelação financeira de fluxo de caixa (ISES - International Solar Energy Society 2018). Esse modelo foi criado para facilitar a tomada de decisões de pessoas envolvidas no setor de energia renovável (OpenEI 2014).

Quanto a parte de desempenho, o modelo faz cálculos por hora de um sistema de energia e gera 8760 valores, que representam todas as horas de um ano. São gerados gráficos e tabelas com as características de desempenho do sistema (por hora e mensalmente). Informações de desempenho para produção anual total do sistema e o fator de capacidade para avaliações mais genéricas também são disponibilizadas (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014). Blair, *et al.* (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014) mencionam que o modelo pode ser utilizado em projetos de grande escala para comparar os preços de compra de eletricidade e verificar a rentabilidade de um projeto de energia eólica, fotovoltaica ou de energia solar concentrada num determinado local. Os autores afirmam ainda que o SAM não modela sistemas de energia híbridos, ou seja, não se pode modelar um único projeto que combine turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos. Entretanto é possível comparar vários tipos de projetos ao criar diferentes arquivos de um caso de estudo.

No que toca à parte financeira, Blair, *et al.* (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014) explicam que o SAM calcula métricas financeiras para vários tipos de projetos de energia com base nos fluxos de caixa de um projeto durante um período de análise (especificado pelo utilizador). O modelo financeiro usa a produção elétrica do sistema calculada pelo modelo de desempenho para calcular a série de fluxos de caixa anuais.

A maioria dos projetos residenciais e comerciais são financiados por meio de empréstimos. O investimento é recuperado pelas economias resultantes da redução das compras de eletricidade à concessionária. Para a precificação de eletricidade, o SAM pode modelar taxas de compra e venda simples, medidas líquidas mensais ou estruturas de taxas complexas com preços escalonados de tempo de uso. Para esses projetos, o SAM informa as seguintes métricas: Custo normalizado de eletricidade (*Levelized Cost of Electricity*, LCOE); custo de eletricidade com e sem sistema de energia renovável; economia de eletricidade; valor presente líquido após impostos e período de retorno (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014).

Acordos de compra e venda de energia elétrica, em inglês *Power Purchase Agreement* (PPA) são contratos financeiros entre duas partes, uma que produz e outra que compra eletricidade limpa a uma taxa predeterminada. Nesses tipos de projeto, o modelo faz uma suposição que a eletricidade seja vendida por meio de um contrato de compra de energia a um preço fixo, com fatores anuais de escalonamento e de entrega de tempo (*Time-of-delivery*, TOD) opcionais. Para esses projetos, o SAM calcula: LCOE; preço de venda de eletricidade; taxa interna de retorno; valor presente líquido e fração da dívida ou índice de cobertura do serviço da dívida (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014).

Para projetos que usam tarifas de eletricidade de varejo, sejam residenciais ou comerciais, o SAM calcula o LCOE dos fluxos de caixa após impostos de forma que o LCOE representa o custo de geração de eletricidade durante a vida do projeto, contabilizando impostos e incentivos. Já para projetos que vendem eletricidade de acordo com um contrato de compra de energia, o modelo calcula o LCOE do fluxo de caixa da receita, para que também seja incluída a margem do promotor (definida pela taxa interna de retorno do projeto). Os fluxos de caixa anuais do projeto incluem: receitas de vendas de energia elétrica e pagamentos de incentivo, custos de instalação, custos de operação, manutenção e substituição, principal de empréstimos e pagamentos de juros, benefícios e obrigações fiscais (contabilizando quaisquer créditos fiscais para os quais o projeto é elegível), pagamentos de incentivo e requisitos internos de taxa de retorno do projeto e do parceiro (para projetos de PPA) (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014).

O modelo financeiro pode representar uma ampla gama de pagamentos de incentivo e créditos fiscais: incentivos baseados no investimento, na capacidade ou na produção, créditos tributários de investimentos, créditos fiscais de produção e depreciação (sistema de recuperação de custo acelerado modificado, depreciação linear, etc.) (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014).

## **B. Quais são suas aplicações e quando é normalmente usada?**

O software pode simular o desempenho de sistemas fotovoltaicos, de energia solar concentrada, de aquecimento solar de água, energia eólica, energia geotérmica,

energia de biomassa e de energia convencional. Cada tecnologia é modelada separadamente, uma vez que o SAM não consegue modelar a integração de múltiplas tecnologias, o que podem limitar seu uso. As opções avançadas de simulação do modelo facilitam análises paramétricas e de sensibilidade, e recursos de análise estatística. O SAM também pode ler variáveis de entrada de planilhas do Microsoft Excel. Para desenvolvedores de software, o kit de desenvolvimento de software SAM (*software development kit*, SDK) possibilita o uso de módulos de simulação SAM em seus aplicativos escritos em C/C ++, C#, Java, Python e MATLAB. O NREL fornece também o SDK como download gratuito no site oficial (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014).

A parte do modelo que é usada para análise financeira é adequada tanto para projetos de energia distribuída que compram e vendem eletricidade a preços de varejo (residenciais e comerciais) como para projetos em que a eletricidade é vendida a um preço fixo através de um PPA. O SAM faz previsões de desempenho e estimativa de custo de energia para projetos elétricos conectados à rede com base tanto nos custos de instalação e operação, como nos parâmetros de projeto do sistema especificados nos *inputs* (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014).

O software também possui uma parte referente à produção de energia elétrica, assumindo que o sistema de energia renovável fornece eletricidade a um sistema isolado ou ligado à rede. O software não modela sistemas de energia térmica que atendam a cargas de processos térmicos, sistemas de energia isolados e sistemas com baterias de armazenamento de eletricidade (N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014).

Para criar um arquivo no SAM é necessário escolher um modelo de desempenho e um modelo financeiro que represente o projeto em questão. O software preenche automaticamente as variáveis de entrada (*inputs*) com um conjunto de valores padrão com base nas escolhas do utilizador. Depois de criar o arquivo, poderão ser feitas modificações nos *inputs* para fornecer informações sobre a localização do projeto, o tipo de equipamento do sistema, os custos de instalação e operação e as hipóteses financeiras e de incentivos. O utilizador tem a responsabilidade de rever e modificar todos os dados de *input* conforme for apropriado para cada análise. Em síntese, uma análise típica envolve executar simulações, examinar resultados, reler entradas e repetir esse processo até que se tenha confiança nos resultados (N. Blair, A. P. Dobos,

et al. 2014, OpenEI 2014).

### **C. Quais são as principais propriedades da ferramenta (características básicas sobre o tipo de ferramenta em questão)?**

O modelo exige *inputs* que descrevam o clima na localização do sistema, informações sobre os custos ou pressupostos financeiros do projeto e as especificações das características de desempenho do sistema. As variáveis de entrada são preenchidas com valores de amostra pelo padrão (OpenEI 2014):

- **Dados meteorológicos:** o mecanismo de simulação do SAM usa dados climáticos horários para modelar o recurso solar num determinado local. O arquivo meteorológico fornece dados de radiação para cálculos de energia, velocidade do vento, temperatura, cobertura de neve e outros dados para modelar os efeitos da temperatura e da refletância do solo no desempenho do sistema. Os dados climáticos devem ser fornecidos no formato específico adotado pelo NREL. O software fornece os dados de algumas regiões. Caso a região desejada não esteja disponível direto no modelo, é possível obter no pelo site do NREL.
- **Dados financeiros e econômicos:** Os cálculos do fluxo de caixa do SAM dependem de um conjunto de variáveis de *inputs* que descrevem as finanças do projeto, como o período de análise equivalente ao tempo de vida do sistema, taxa de desconto, taxa de inflação e valor e taxa do empréstimo. O modelo permite o recurso de diferentes opções de financiamento com diferentes conjuntos de variáveis de entrada.
- **Incentivos:** O software modela dois tipos de incentivos: créditos fiscais e pagamentos de incentivos (subsídios). Os créditos fiscais podem ser fornecidos por um governo estadual ou federal. Os pagamentos de incentivo podem ser fornecidos por um governo estadual ou federal, concessionária ou outra entidade. Um incentivo ou crédito fiscal baseado no investimento é um pagamento único para o projeto feito no primeiro ano do fluxo de caixa do projeto que é um valor fixo, porcentagem do total de custos instalados ou uma função do tamanho do sistema. Um incentivo ou crédito fiscal é um pagamento

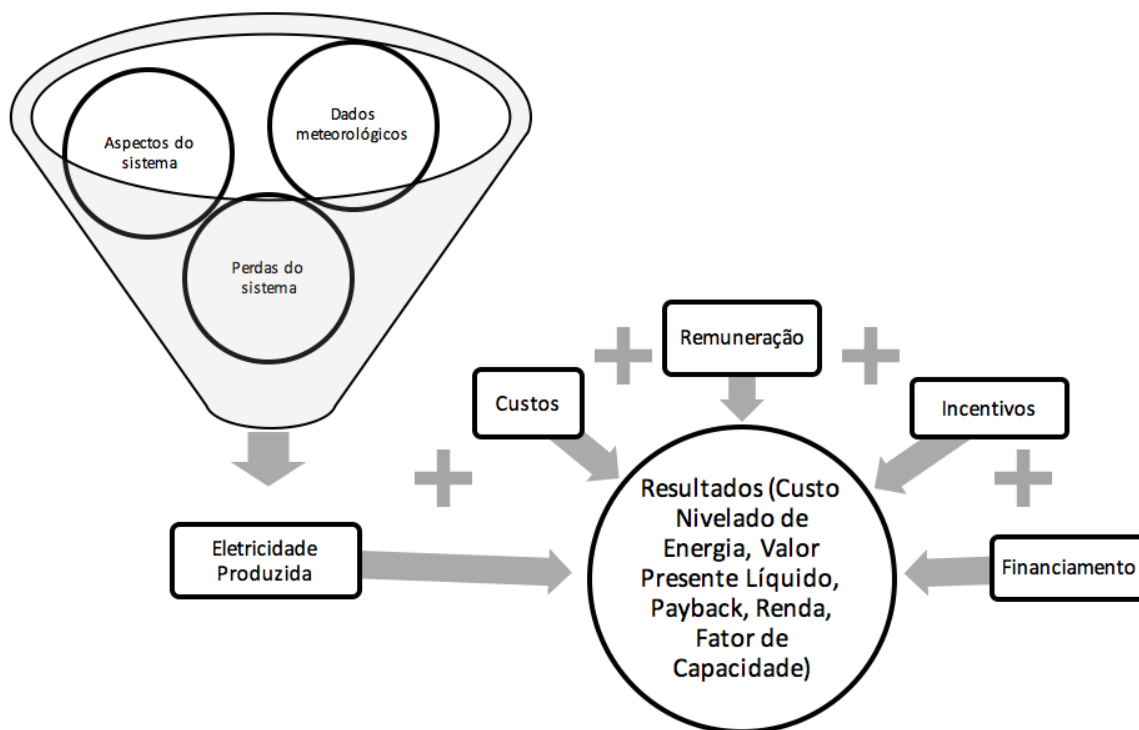
anual baseado na produção e na quantidade de energia produzida pelo sistema em cada ano. Os pagamentos de incentivos podem ou não ser tributáveis pelo governo federal ou estadual.

- **Desempenho do sistema:** O SAM simula o desempenho horário do sistema de energia, usando algoritmos desenvolvidos no NREL, no Laboratório Nacional Sandia e na Universidade de Wisconsin para converter dados climáticos/hora em estimativas de corrente elétrica alternada/hora como dados de *output*. O SAM adiciona os 8.760 (365 x 24) valores por hora para calcular a saída anual total do sistema.
- **Custos:** O software calcula o fluxo de caixa e as métricas econômicas resultantes com base em duas categorias de custos. Os custos de capital representam o custo de instalação de módulos, inversores e componentes de operação do sistema. Os custos de operação e manutenção representam os custos recorrentes de manutenção, reparo e substituição de equipamentos. Para projetos residenciais e comerciais, o SAM permite que os custos de operação e manutenção sejam atribuídos a anos específicos, o que possibilita a análise de projetos com substituições periódicas de inversores ou outros custos periódicos.

As variáveis de *output* fornecidas pelo sistema são (OpenEI 2014):

- Custo normalizado de eletricidade (LCOE);
- Preço de compra de eletricidade, taxa de retorno e outras metas financeiras para projetos em escala de utilidade;
- Período de retorno e valor presente líquido para projetos residenciais e comerciais;
- Previsões médias horárias, mensais e anuais do desempenho do sistema, incluindo saída líquida e eficiências de componentes;
- Tabela de fluxo de caixa anual com detalhes de custo;
- Gráficos personalizáveis.

Na Figura 2 o sistema de *inputs* e *outputs* de dados está representado de maneira resumida:



**Figura 2 - Esquema de *inputs* e *outputs* de dados do SAM.**

Além de simular o desempenho de um sistema num único ano e calcular o fluxo de caixa do projeto durante um período de vários anos, as opções de análise do SAM possibilitam a realização de estudos envolvendo várias simulações. Também é possível vincular os dados com pastas de trabalho do Microsoft Excel para calcular as variáveis de *input* do SAM (OpenEI 2014).

#### **D. Quem e quantos são os utilizadores que já usaram a ferramenta?**

Possui mais de 64 mil utilizadores e metade deles está nos EUA. (ISES - International Solar Energy Society 2018). Há utilizadores na Espanha, Índia, Austrália, Alemanha, China, Canadá, Brasil, Reino Unido, México, ou seja, o modelo pode ser usado pelos países espalhados por todos os continentes (N. Blair, System Advisor Model (SAM) Introduction Slides 2017).

O software é utilizado tanto por gestores de projetos, engenheiros,

desenvolvedores de tecnologias, analistas financeiros e políticos, fabricantes de equipamentos para avaliar opções financeiras, tecnológicas e de incentivo para projetos de energia renovável, como também por universidades e investigadores para entender os sistemas de energia renovável (ISES - International Solar Energy Society 2018, N. Blair, A. P. Dobos, et al. 2014). Os tipos de utilizadores possíveis e suas respectivas finalidades quanto ao uso do software estão resumidas no Tabela 3.

**Tabela 3 - Utilizadores do SAM e suas respectivas finalidades.**

| <b>Utilizadores</b>                   | <b>Finalidade</b>   |
|---------------------------------------|---|
| <b>Legisladores e Serviço público</b> | Estudar como uma política poderia afetar a economia de um sistema típico e analisar diferentes tipos de estruturas de taxa de serviço ( <i>utility rate structures</i> ) para renováveis. |
| <b>Desenvolvedores</b>                | Comparar tecnologias, sites ou configurações e estimar LCOE.  |
| <b>Investigadores</b>                 | Comparar o custo de energia normalizado de diferentes tecnologias convencionais e inovadoras e estimar o potencial técnico de uma tecnologia numa região.                                 |
| <b>Alunos</b>                         | Aprender sobre energia renovável e explorar estruturas de financiamento para energia renovável.   |

Fonte: Adaptado de (N. Blair, *System Advisor Model (SAM) Introduction Slides 2017*).

### **E. Como a ferramenta pode ser obtida?**

O SAM é um software gratuito e disponível para download<sup>3</sup>. A versão atual do SAM é a Versão 2017.9.5, lançada em janeiro de 2014. A equipe de desenvolvimento do SAM normalmente lança uma nova versão a cada ano, aprimorando os recursos existentes e adicionando novos recursos de modelação do sistema de energia (OpenEI 2014).

<sup>3</sup> Disponível em: <https://sam.nrel.gov/download>

## 2.2.2 EnergyPLAN

### **A. Que tipo de modelo é e para que serve?**

EnergyPLAN é um modelo computacional para análise de sistemas de energia. Foi desenvolvido pelo grupo de Pesquisa em Planejamento de Energia Sustentável da Universidade de Aalborg na Dinamarca em 1999 e desde então vem sendo expandido de forma contínua (Lund, Advanced Energy Systems Analysis Computer Model 2017).

O objetivo principal deste modelo é analisar o impacto energético, ambiental e econômico de várias estratégias energéticas. Este modelo funciona através da modelação de uma variedade de opções para que elas possam ser comparadas entre si, ao invés de modelar apenas uma solução "ótima" com base em pré-condições definidas. Usando essa metodologia, é possível ilustrar um leque de opções para o sistema de energia, em vez de uma solução básica. Isso poderia classificar o EnergyPLAN como uma ferramenta de "simulação" em vez de uma ferramenta de otimização, embora haja alguma otimização dentro do modelo (Aalborg University n.d.).

Além disso, o objetivo do EnergyPLAN é modelar o "ponto de chegada" do sistema de energia em vez do ponto de partida. Ou seja, o foco é colocado no sistema de energia futuro e como isso irá operar, ao invés do sistema de energia atual. Portanto, o EnergyPLAN inclui modelação relativamente detalhada de tecnologias futuras, como a gaseificação de biomassa e combustíveis sintéticos, mas a modelação relativamente agregada das tecnologias atuais, como usinas de energia (Aalborg University n.d.). É uma ferramenta de fácil utilização projetada numa série de planilhas e programada em Delphi Pascal (Connolly, et al. 2010). O modelo auxilia o projeto de estratégias nacionais ou regionais de planejamento energético com base em análises técnicas e econômicas, resultado dos diferentes sistemas nacionais de energia e investimentos. A análise é realizada em etapas, hora em hora durante um ano (Lund, Advanced Energy Systems Analysis Computer Model 2017). Simula todo o sistema energético: isso inclui o fornecimento de calor e eletricidade, bem como os setores de transporte e industrial (Connolly, et al. 2010).

## B. Quais são suas aplicações e quando é normalmente usada?

O software faz simulação de energia e fornece ferramentas para avaliação dinâmica dos sistemas nacionais de energia, hora a hora. Também permite uma revisão abrangente de todos os setores de energia, incluindo eletricidade, aquecimento, refrigeração, indústria e transporte. Isso ajuda a destacar padrões e tendências em relação à interação entre esses setores, o que pode ajudar na tomada de decisões para futuras estratégias nacionais do sistema de energia, avaliando os impactos energéticos, ambientais e econômicos (Aalborg University n.d.).

O modelo pode ser usado para diferentes tipos de análises de sistemas de energia (Lund, Advanced Energy Systems Analysis Computer Model 2017):

- **Análise técnica:** Desenho e análise de sistemas de energia grandes e complexos a nível nacional e sob diferentes estratégias de simulação técnica. Nesta análise, os *inputs* compõem-se da descrição das demandas de energia, capacidades de produção e eficiências e fontes de energia. Os *outputs* consistem em balanços anuais de energia, consumos de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>.
- **Análise de custos de mercado:** É uma análise adicional do comércio e do intercâmbio nos mercados internacionais de eletricidade. Nesse caso, o modelo precisa de mais informações para identificar os preços no mercado e determinar a resposta dos preços de mercado às mudanças na importação e exportação. Também é necessário um dado de *input* para determinar os custos de produção marginal das unidades individuais de produção de eletricidade. A modelação baseia-se na suposição fundamental que cada central otimiza de acordo com os lucros econômicos e comerciais, incluindo quaisquer impostos e custos de emissões de CO<sub>2</sub>. Essa estratégia de simulação econômica de mercado baseia-se num modelo de mercado de preço marginal de curto prazo e por isso se concentra apenas em ofertas ao mercado de eletricidade (minimizando os custos do consumidor de eletricidade e custos do aquecimento urbano). Como resultado, essa estratégia de simulação usa apenas custos variáveis e não otimiza com base nos custos de longo prazo de diferentes tecnologias de fornecimento de energia. Além disso, otimiza apenas o lado da oferta do sistema de energia e não o lado da demanda (embora o

utilizador possa alterar manualmente a demanda e analisar o impacto resultante de uma simulação econômica de mercado). Apesar de ser matematicamente possível usar o recurso de elasticidade de preço no EnergyPLAN para simular cenários com uso de 100% de energia renovável (nesse design de mercado atual), isso pode não representar com precisão como os mercados de oferta e demanda de energia devem ser projetados. O uso de sistemas de energia com penetrações muito grandes de energia renovável intermitente que, em combinação com os dados de custo das tecnologias, possibilita ao utilizador identificar soluções de menor custo durante sua vida útil total.

- **Estudos de viabilidade:** Cálculo da viabilidade em termos de custos anuais totais do sistema sob diferentes desenhos e estratégias de simulação. Nesse caso, *inputs* como custos de investimento e custos operacionais e de manutenção fixos devem ser adicionados juntamente com períodos de vida útil e uma taxa de juros. O modelo determina as consequências socioeconômicas das produções. Os custos são divididos em: 1) custos de combustível; 2) custos operacionais variáveis; 3) custos de investimento; 4) custos operacionais fixos; 5) custos e benefícios de troca de eletricidade e 6) possíveis pagamentos de CO<sub>2</sub>.

### **C. Quais são as principais propriedades da ferramenta (características básicas sobre o tipo de ferramenta em questão)?**

O EnergyPLAN é um modelo de *input/output* e usa simulações que permitem obter uma análise horária, durante o período de um ano. Os *inputs* do modelo são, estabelecidas, geralmente, pela procura/consumo, fontes de energia renováveis, capacidades energéticas implantadas, custos e um conjunto de estratégias de regulação opcionais enfatizadas pelos valores relativos à importação e exportação e produção excessiva de eletricidade. Os *outputs* são representados por balanços energéticos e as produções anuais resultantes destes, pelo consumo de combustível, pela importação e exportação e pelos custos totais, incluindo rendimentos provenientes da troca de eletricidade (Lund, Advanced Energy Systems Analysis Computer Model 2017).

#### **D. Quem e quantos são os utilizadores que já usaram a ferramenta?**

O modelo tem como público alvo investigadores, serviços de consultorias e pessoas com poder de decisão política em todo o mundo. Isso é possível tanto pela interface intuitiva do *software*, como por ser disponível para download gratuito. Além disso, há uma variedade de treinamentos disponíveis, incluindo fórum no site, e os modelos existentes já estão disponíveis para muitos países. Há de 500 a 600 utilizadores em mais de 50 países (Aalborg University n.d.).

#### **E. Como a ferramenta pode ser obtida?**

Aproximadamente dez versões do EnergyPLAN foram criadas e a versão atual pode ser obtida gratuitamente<sup>4</sup>. O período de treinamento necessário pode levar alguns dias até um mês, dependendo do nível de complexidade do projeto (Connolly, et al. 2010).

### 2.2.3 HOMER

#### **A. Que tipo de modelo é e para que serve?**

O HOMER é um modelo computacional de otimização de micro centrais de produção de eletricidade. Este modelo simplifica a tarefa de avaliação de projetos de sistemas de energia para várias aplicações, sejam esses sistemas conectados ou não à rede.

Com a grande quantidade de opções de tecnologia e, conseqüentemente, com a variação nos custos destas tecnologias e na disponibilidade de recursos energéticos, torna-se difícil tomar decisões quanto ao dimensionamento de um projeto. Através do algoritmo de análise de otimização e de sensibilidade do HOMER, a avaliação das possíveis configurações do sistema pode tornar-se mais fácil. Por exemplo, o modelo ajuda a tomar decisões quanto a quantidade de componentes que devem ser incluídos

---

<sup>4</sup> Disponível em: <http://energy.plan.aau.dk/>.

no projeto do sistema, quanto às dimensões a ser adotados para cada componente, se a relação custo-benefício de um projeto é vantajosa, se o projeto atenderá uma crescente demanda de energia elétrica.

O HOMER *Legacy* foi a versão utilizada no caso de estudo em questão. O modelo simplifica a tarefa de avaliar opções de projeto para sistemas de energia conectados ou não à rede para aplicações de geração remota, autônoma e distribuída. Os algoritmos de otimização e análise de sensibilidade do software permitem que o utilizador avalie a viabilidade econômica e técnica de um grande número de opções de tecnologia e leve em conta a incerteza nos custos de tecnologia, disponibilidade de recursos de energia e outras variáveis. Há outras versões, mais completas (HOMER Pro e HOMER Grid), bem como as versões *online tools* mais simples (HOMER QuickStart e HOMER QuickGrid) que também podem ser encontradas no site do HOMER.

## **B. Quais são suas aplicações e quando é normalmente usada?**

É possível explorar o efeito que mudanças em fatores como disponibilidade de recursos e condições econômicas poderiam ter sobre o custo-benefício de diferentes configurações de sistema. Ou seja, o modelo pode ser usado para realizar análises de sensibilidade. Para isso fornece-se ao HOMER valores de sensibilidade que descrevem uma série de disponibilidade de recursos e de custos de componentes. O HOMER simula cada configuração de sistema com a série de valores dada. Os resultados podem ser utilizados para identificar fatores que têm maior impacto sobre o projeto e a operação de um sistema de energia ou ainda pode auxiliar nas respostas a questões gerais sobre opções de tecnologia em decisões de planejamento e em decisões políticas.

O modelo simula a operação de um sistema efetuando cálculos do balanço de energia para cada uma das 8.760 horas do ano. Para cada hora, a demanda elétrica e térmica é comparada com a energia que o sistema pode fornecer naquela hora e os fluxos de energia que entram e saem em cada componente do sistema são calculados. Para sistemas que incluem baterias ou geradores movidos a combustível, o HOMER também decide como operar os geradores em cada hora e se carrega ou descarrega

as baterias.

O HOMER realiza cálculos de balanço de energia para cada configuração de sistema que se quer considerar. Uma configuração é então determinada pelo software que também define se é viável ou não, ou seja, se pode atender a demanda elétrica para as condições especificadas e estima o custo de instalação e operação do sistema durante a vida útil do projeto. Os cálculos de custo do sistema contabilizam custos tais como custo de capital, custo de reposição, custos de operação e manutenção, custos com combustível, entre outros.

**Otimização:** depois de simular todas as possíveis configurações de sistema, o HOMER mostra uma lista de configurações, ordenada pelo custo presente líquido (às vezes chamado de custo de ciclo de vida) para que seja possível comparar opções de projeto de sistema.

**Análise de Sensibilidade:** quando as variáveis de sensibilidade são definidas nos dados de *input*, o HOMER repete o processo de otimização para cada variável de sensibilidade especificada pelo utilizador. Por exemplo, se a velocidade do vento for definida como uma variável de sensibilidade, o modelo simulará as configurações de sistema para a gama de velocidades de vento previamente especificadas.

### **C. Quais são as principais propriedades da ferramenta (características básicas sobre o tipo de ferramenta em questão)?**

O HOMER é alimentado por dados de *input*, que descrevem as opções de tecnologia, os custos de componentes e a disponibilidade de recursos. O modelo utiliza essas entradas para simular diferentes configurações de sistema ou diferentes combinações de componentes. O modelo gera uma lista de resultados com as possíveis combinações, ordenadas pelo custo presente líquido. O HOMER exhibe os resultados de simulação através de tabelas e gráficos, para facilitar a comparação técnica e econômica das configurações propostas. Essas tabelas e gráficos podem ser exportados para uso em relatórios e apresentações (HOMER Energy & NREL 2011).

Para limitar a complexidade de dados de *input* e permitir computação rápida o

suficiente para tornar a análise de otimização e sensibilidade mais prática, a lógica de simulação do HOMER é menos detalhada do que a de vários outros modelos de simulação (Lambert, Gilman and Lilienthal 2006).

A maior incerteza do software é que o modelo assume que os utilizadores irão operar o sistema de uma maneira "ótima". Isso se refere tanto ao controle e decisão do gerador, como também quanto a problemas de manutenção. Por exemplo, os resultados de um sistema fotovoltaico diminuirão se for possível crescimento de vegetação próxima a região, sombreando os painéis. Outro exemplo é que as baterias poderão deteriorar-se caso elas sobreaqueçam ou descarregarem demais. O modelo também não considera falhas de componentes e gera uma variedade de pequenas simplificações na modelação de cada componente (HOMER Energy 2016).

O HOMER não pode modelar todos os componentes com igual precisão. As baterias são os componentes mais difíceis de modelar. A documentação do HOMER afirma claramente todas as equações e suposições usadas na modelação (HOMER Energy 2016).

#### **D. Quem e quantos são os utilizadores que já usaram a ferramenta?**

Há um total de 190 mil utilizadores registrados no site do HOMER, associados a uma variedade de organizações e funções, incluindo estudantes e faculdades, instituições comerciais, governamentais, com ou sem fins lucrativos<sup>5</sup>.

#### **E. Como a ferramenta pode ser obtida?**

A versão *Legacy* do software está disponível para download gratuito através do site oficial<sup>6</sup>, mas só pode ser obtida através de uma licença autorizada pelos desenvolvedores. Para conseguir esta licença, o utilizador deve garantir o uso restrito para fins educacionais não comerciais ou ainda para instituições não comerciais de apoio ao acesso à energia sem fins lucrativos (fornecimento de energia para serviços

---

<sup>5</sup> Fonte através de correspondência eletrônica.

<sup>6</sup> Disponível em: <https://users.homerenergy.com/homer-legacy/about>.

essenciais em países em desenvolvimento).

Também disponíveis no mesmo link estão as versões Pro e Grid que são pagas, mas podem ser obtidas gratuitamente por 21 dias para teste e as versões simplificadas QuickStart e QuickGrid (gratuitas).

Há alguns treinos on-line pagos fornecidos pelo site oficial do HOMER e há também treinos em sala de aula. Após conclusão dos cursos, recebe-se um certificado de conclusão.

É possível achar tutoriais e guias virtuais gratuitos, com o passo a passo para usar o software, como por exemplo o manual do HOMER Grid. No presente trabalho, foram utilizados vídeos em plataforma online e guias para suporte de utilização do software.

#### 2.2.4 PRIMES

O modelo PRIMES é o mais complexo dentre os escolhidos. Como essa ferramenta é utilizada a nível governamental e não foi aplicada ao caso de estudo em questão, as respostas foram respondidas de maneira resumida, dando ao leitor apenas uma noção do seu funcionamento.

##### **A. Que tipo de modelo é e para que serve?**

O modelo PRIMES foi criado pelo E3MLab da Universidade Técnica Nacional de Atenas (*National Technical University of Athens, NTUA*). Tem sido utilizado para quantificar o cenário de referência para todos os Estados-Membros da UE-27 até 2030. O PRIMES é um modelo de equilíbrio parcial de sistema de energia da união europeia e fornece projeções para médio e longo prazo, começando do ano de 2010 e até o ano de 2030, apresentando resultados para cada período de cinco anos. O modelo simula uma solução de equilíbrio de mercado para oferta e demanda de energia e determina esse equilíbrio encontrando os preços de cada forma de energia de tal forma que a quantidade que os produtores acham melhor fornecer corresponda à quantidade que os consumidores desejam usar (E3M Lab 2014).

Este modelo oferece muitos detalhes sobre um grande número de tecnologias

tanto sobre oferta quanto sobre demanda do sistema de energia e garante que a demanda de energia e comportamento de fornecimento bem como os preços de energia e investimentos sejam determinados internamente. Custo e parâmetros técnicos mudam ao longo do tempo, refletindo o progresso técnico que influencia ainda mais os custos marginais de longo prazo. Estes também dependem dos preços de combustível esperados, taxas de desconto e demanda por energia. Problemas de carga (ou seja, necessidades de carga básica, aplicações de carga de pico) e sincronização com a demanda de calor são acomodados no processo de modelação. O investimento em novos equipamentos ou usinas está entrando num mecanismo dinâmico de acumulação de capital com contabilidade explícita de safras de capital. As projeções dependem do estoque de capital existente, em todos os setores da energia, para o qual o modelo usa dados de inventário detalhados (E3M Lab 2014).

#### **B. Quais são suas aplicações e quando é normalmente usada?**

A ferramenta pode apoiar a análise de políticas nos seguintes campos: questões normativas de energia (segurança do suprimento, estratégia, custos, etc.), questões ambientais, política de preços e tributação, padrões em tecnologias, novas tecnologias e fontes renováveis, eficiência energética no lado da demanda, combustíveis alternativos, conversão para descentralização e liberalização do mercado de eletricidade, questões políticas relacionadas à geração de eletricidade, distribuição de gás e energia nova formulários (E3M Lab 2014).

O PRIMES é organizado por um subsistema de produção de energia para suprimento composto por derivados de petróleo, gás natural, carvão, eletricidade e produção de calor, suprimento de biomassa, e outros, e por setores de uso final para demanda residencial, comercial, de transporte e nove setores industriais.

#### **C. Quais são as principais propriedades da ferramenta (características básicas sobre o tipo de ferramenta em questão)?**

Como já foi explicado anteriormente, o PRIMES é uma ferramenta complexa. Como não é intenção deste trabalho expor os detalhes deste modelo, os *inputs* e *outputs* serão expostos de maneira resumida.

Alguns dos *inputs* típicos do PRIMES são (E3M Lab 2014):

- Crescimento do PIB (produto interno bruto) e crescimento econômico por setor (sendo que são muitos os setores considerados);
- Perspectiva (*outlook*) da oferta mundial de energia e preços mundiais dos combustíveis fósseis;
- Impostos e subsídios;
- Taxas de juros, prêmio de risco;
- Políticas e restrições ambientais;
- Características técnicas e econômicas das futuras tecnologias energéticas;
- Hábitos de consumo de energia, parâmetros de conforto, uso racional e economia de energia, potencial de eficiência energética;
- Parâmetros de curvas de fornecimento de energia primária;
- Potencial de locais para novas usinas, especialmente com relação a geração de energia;
- Potencial de energias renováveis por tipo de fonte.

Os outputs gerados são (E3M Lab 2014):

- Balanços energéticos detalhados no formato EUROSTAT<sup>7</sup>;
- Projeções detalhadas de demanda por setor. Inclui serviços de uso final, equipamentos e economia de energia;
- Balanço detalhado de eletricidade e calor/vapor, incluindo geração por usinas, armazenamento e operação de sistema;
- Produção de combustíveis (convencionais e novos, incluindo matéria-prima de biomassa);
- Investimento em todos os setores, demanda e oferta, desenvolvimentos tecnológicos, safras;
- Operação de transporte, meios de transporte e veículos para transporte;
- Associação de uso de energia e operações;

---

<sup>7</sup> O EUROSTAT é o gabinete oficial de estatísticas da União Europeia. Tem como papel principal fornecer estatísticas à Comissão e às outras instituições europeias possibilitando a comparação dos dados estatísticos dos vários países, para que possam ser definidas, implementadas e analisadas as políticas comunitárias.

- Custos, preços e despesas de investimento de energia por setor e global;
- Emissões de CO<sub>2</sub> a partir da combustão de energia e processos industriais;
- Emissões de poluentes atmosféricos;
- Indicadores de avaliação de políticas (como por exemplo, taxa de dependência de importações, índices de eficiência, etc.).

#### **D. Quem e quantos são os utilizadores que já usaram a ferramenta?**

Não há informações quanto ao número de utilizadores do modelo. Sabe-se que é utilizado por governos da união europeia e geralmente serve de apoio para estudos de reestruturação a médio e longo prazo do sistema energético da UE, com o objetivo de reduzir as emissões de carbono (E3M Lab 2014).

#### **E. Como a ferramenta pode ser obtida?**

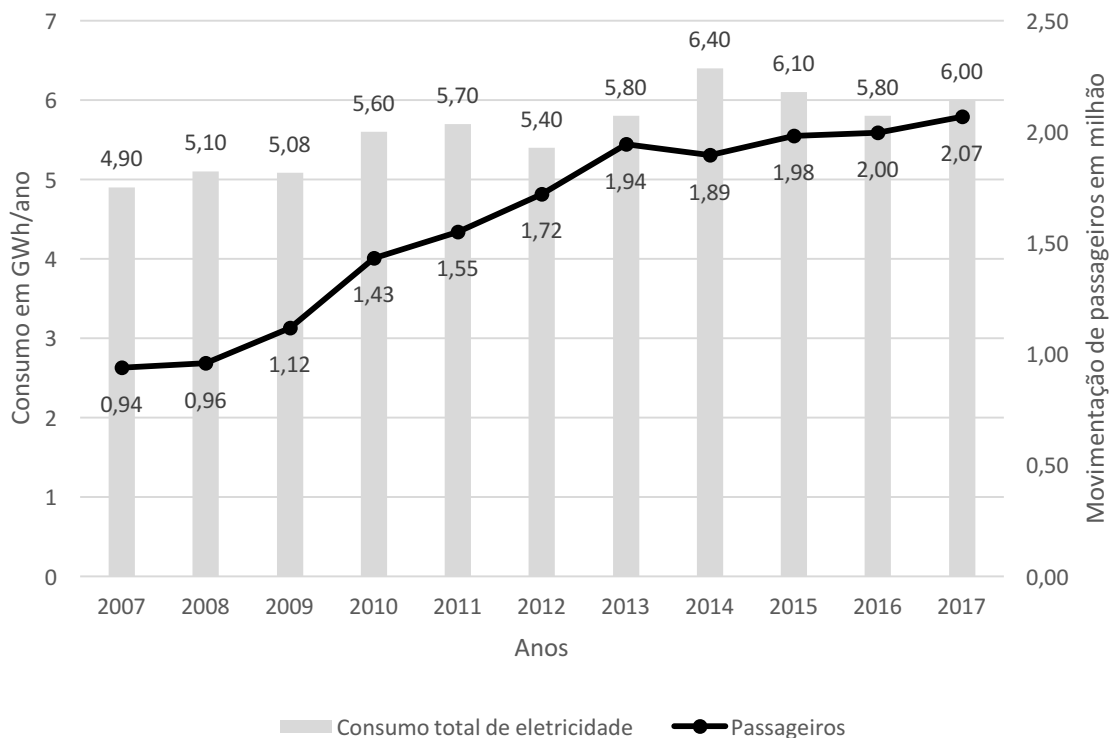
O modelo não é vendido a terceiros. A ferramenta é usada em projetos de consultoria que são realizados pela NTUA e parceiros.

## Capítulo 3

### 3 Caso de Estudo

Por questões de sigilo, alguns dados do presente caso de estudo não serão divulgados. Todas as informações e números contidos nesse trabalho foram obtidos por fontes confiáveis.

O caso de estudo em questão refere-se a um aeroporto localizado em região de clima tropical, próximo ao litoral, cuja temperatura média é 25°C, podendo atingir até 35°C nos meses verão. Possui um terminal de passageiros que ocupa uma área de 22.000 m<sup>2</sup>. Em 2007 o número de passageiros era de 940 mil pessoas. Já era previsto que esse número crescesse devido às obras de expansão do aeroporto. Em 2017 o aeroporto recebeu mais de 2 milhões de passageiros. Com o aumento da quantidade de pessoas em circulação, aumentou-se também a consumo de energia. Essa relação está representada na Figura 3.



**Figura 3 - Relação entre aumento da movimentação de passageiro no aeroporto e aumento no consumo de energia.**

Conforme os dados fornecidos nos últimos 10 anos, em que os valores são mais padronizados e condizentes com o tamanho do público atual depois das obras de expansão, o aeroporto consome em média 5,8 GWh de energia elétrica por ano. Já a potência solicitada pelo aeroporto é, em média, 800 kW, com picos que chegam até 1,1 MW. Por estar posicionado numa região tropical com altas temperaturas, também é necessário um sistema de arrefecimento para conforto térmico dos passageiros cuja potência de refrigeração demandada é 750 TR<sup>8</sup> (Toneladas de Refrigeração).

Até 2006 a eletricidade era fornecida exclusivamente pela concessionária local. A instabilidade no abastecimento de energia elétrica pela concessionária causava transtornos devido a constantes faltas de luz e de climatização no aeroporto. Como solução foi apresentado ao aeroporto (cliente) um sistema de trigerção para que este pudesse gerar sua própria eletricidade de forma estável, atendendo assim às necessidades do terminal de passageiros, campo de antenas e serviços auxiliares.

É importante salientar que a posição do aeroporto era como cliente, ou seja, a energia elétrica fornecida pelo sistema de cogeração era comprada pelo aeroporto. Quando a demanda elétrica não fosse suprida pela ofertada pela cogeração, como medida alternativa o aeroporto comprava energia da concessionária.

Esse sistema funcionou de novembro de 2006 a outubro de 2013, sendo que o consumo de eletricidade dependia tanto da cogeração quanto da concessionária local neste período. A partir desse período o sistema de cogeração parou de operar e o consumo provém exclusivamente da concessionária.

A seguir serão descritos:

- A. Parâmetros técnicos do cenário anterior com o sistema de cogeração instalado em funcionamento no passado
- B. Parâmetros financeiros e ambientais da situação atual, com utilização de energia elétrica advinda apenas da concessionária local;
- C. Viabilidade econômica e ambiental da reutilização do sistema de cogeração;
- D. Parâmetros técnicos, financeiros e ambientais de cenários alternativos, com soluções simuladas por 1 dos modelos já abordados neste trabalho.

---

<sup>8</sup> Cada 1 TR equivale a 3,516 kW.

O modelo escolhido para realizar as simulações foi o SAM, uma vez que os estudos mostrados no capítulo anterior o apontaram como um modelo completo e de fácil utilização. A base de dados meteorológica para região pode ser facilmente obtida pelo site do NREL e a base de dados dos produtos escolhidos (os módulos fotovoltaicos e o gerador eólico) é fornecida pelo próprio modelo (o software oferece a escolha de várias marcas de produtos) facilitando a modelação. Neste trabalho houve a tentativa de gerar simulações para o caso de estudo com os modelos EnergyPLAN e HOMER. Entretanto por falta de dados de *input*, as simulações não foram satisfatórias. Estas são ferramentas mais complexas e necessitam de uma base de dados maior.

As comparações e discussões sobre os cenários a serem apresentados neste capítulo estão no Capítulo 4.

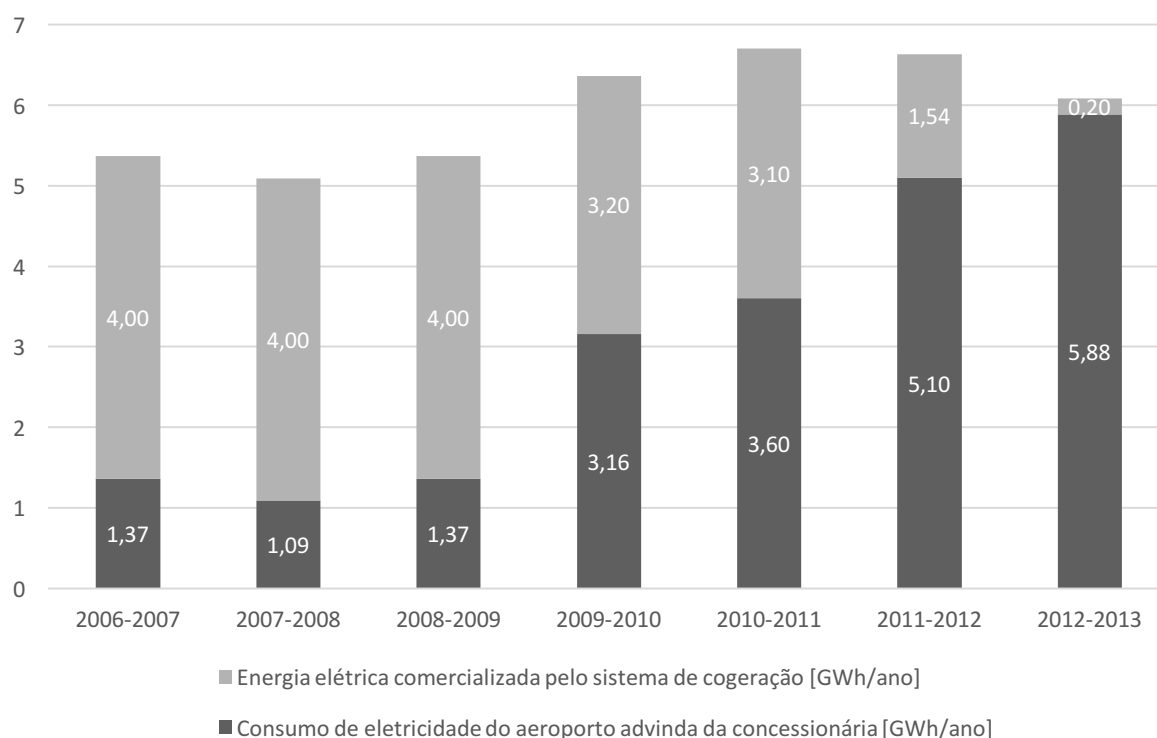
### 3.1 Sistema de Cogeração no passado

Em 2005 foi instalado, no aeroporto, um sistema de cogeração através do combustível de gás natural, com propósito de suprir 90% do consumo de energia elétrica. Esse sistema é composto por: dois grupos de geradores G3412C Caterpillar a gás natural que produzem em conjunto o total de 790 kW e um *chiller* de absorção que produz 250 TR de energia térmica por absorção e um *chiller* centrífugo com capacidade de 500 TR para atender à solicitação térmica total do aeroporto. O investimento inicial desse projeto foi de USD 13,4 milhões<sup>9</sup>, para um projeto com período de 14 anos.

Na Figura 4 estão representados o consumo elétrico anual e a energia comercializada pelo sistema de cogeração. Os dados de energia comercializada pelo sistema de cogeração foram fornecidos desde o ano 2006 ao ano de 2013 (período de funcionamento do sistema), sendo separados por períodos que variam de novembro de um ano a outubro do ano consecutivo.

---

<sup>9</sup> Valor referente a março de 2005.



**Figura 4 - Comparação entre a eletricidade comprada da concessionária e do sistema de cogeração.**

Até outubro de 2009 o sistema de cogeração gerava cerca de 74% da eletricidade que o aeroporto demandava, sendo que o restante era comprado da concessionária. Nos próximos dois anos a partir desse período (novembro de 2009 a outubro de 2011), o aeroporto (cliente) necessitou comprar quase metade de energia elétrica da concessionária e a outra metade vinha do sistema de cogeração. Nos dois anos seguintes (novembro de 2011 a outubro de 2013), o sistema de cogeração diminuiu consideravelmente a comercialização de eletricidade, chegando a comercializar apenas 23% da eletricidade necessária no período de 2011-2012 e 3% no período de 2012-2013. Isso fez com que o aeroporto se tornasse cada vez mais dependente da concessionária, que, entretanto, reforçou a sua rede de transmissão e melhorou o serviço. Em outubro de 2013 o sistema parou de operar.

No decorrer dos anos de operação, a planta de cogeração do aeroporto começou a apresentar problemas técnicos na geração de eletricidade. Isso deveu-se a falhas nos ajustes de parâmetros operacionais e a paradas para manutenção corretiva e preventiva nos motores. As recorrentes faltas de eletricidade no aeroporto eram causadas tanto pela baixa confiabilidade do fornecimento de eletricidade pela

concessionária quanto pelo aumento da carga elétrica e térmica. O quadro se agravou com a queda da taxa de disponibilidade do sistema de cogeração devido à falta de manutenção nos equipamentos e à gestão deficiente do cliente (aeroporto) no controle de documentação e fiscalização. A variação cambial para cima também afetou o custo do gás natural e impactou na amortização do investimento inicial.

Este exemplo serve para mostrar que nem sempre só a parte técnica mostra a viabilidade de um projeto de um sistema de eficiência energética, mas também demonstra a importância de um bom planejamento e administração na fase inicial, em que são tomadas decisões cruciais no projeto e durante todo o período em que o sistema está em funcionamento.

### 3.2 Situação Atual

Na situação atual o aeroporto consome a energia elétrica vinda da concessionária de energia elétrica local para suprir suas necessidades de consumo elétrico. O custo desta situação vai ser estudado nessa seção, ou seja, essa hipótese não conta com nenhum novo investimento em geração de eletricidade, nem com a possibilidade de reutilização do sistema de cogeração.

Segundo a agência nacional de energia elétrica da região, o valor da energia elétrica fornecido pela concessionária é de USD 0,14/kWh<sup>10</sup>. Sabendo que a demanda energética do aeroporto é em média igual a 5,8 GWh/ano, o valor total de consumo por ano seria USD 812 000,00.

Na Tabela 4 estão os valores que serão considerados para o Cenário Real para a realização dos cálculos para análise econômico-financeira através do método do *Life Cycle Cost* (LCC), exposto no Capítulo 1.

---

<sup>10</sup> O valor foi convertido da moeda local para dólar (USD) de acordo com o valor do câmbio comercial de referência do dia 1 de outubro de 2018.

**Tabela 4 - Valores considerados para análise econômico-financeira do Situação atual.**

| <b>Métrica</b>                   | <b>Valor</b> |
|----------------------------------|--------------|
| <b>Custo anual [USD]</b>         | 812 000,00   |
| <b>Período de estudo [anos]</b>  | 20           |
| <b>Taxa anual de atualização</b> | 5%           |

A taxa de atualização considerada foi a taxa real e não a nominal. O facto de ser uma obra governamental significa que apresentação das contas em preços correntes para efeitos de tributação não é um aspecto relevante para avaliar a rentabilidade económica do projeto.

Foi realizado então o cálculo do LCC e os valores atualizados estão expostos na Tabela 5. A primeira coluna desta tabela refere-se ao final do ano em questão e a segunda coluna aos custos atualizados (VA).

**Tabela 5 – Cálculo pelo método LCC para o custo de energia elétrica no Situação atual.**

| <b>Ano</b>          | <b>Custo atualizado [USD]</b> |
|---------------------|-------------------------------|
| 1                   | 773 333,33                    |
| 2                   | 736 507,94                    |
| 3                   | 701 436,13                    |
| 4                   | 668 034,41                    |
| 5                   | 636 223,25                    |
| 6                   | 605 926,90                    |
| 7                   | 577 073,24                    |
| 8                   | 549 593,56                    |
| 9                   | 523 422,44                    |
| 10                  | 498 497,56                    |
| 11                  | 474 759,58                    |
| 12                  | 452 151,98                    |
| 13                  | 430 620,94                    |
| 14                  | 410 115,18                    |
| 15                  | 390 585,88                    |
| 16                  | 371 986,56                    |
| 17                  | 354 272,91                    |
| 18                  | 337 402,77                    |
| 19                  | 321 335,97                    |
| 20                  | 306 034,26                    |
| <b>Valor Total:</b> | <b>10 119 314,80</b>          |

Ou seja, se o aeroporto continuar comprando a energia elétrica da concessionária nos próximos 20 anos, o valor total atualizado dos custos seria de USD 10 119 314,80. Os custos de compra de eletricidade nestes cálculos foram considerados como constantes, assim como no cenário anterior.

Segundo um inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEEs) encontrado na página virtual da concessionária que fornece eletricidade para o aeroporto, a

intensidade de emissão média do setor elétrico da região é de 0,137 tCO<sub>2</sub>e/MWh<sup>11</sup>. Sendo assim, se o aeroporto continuasse utilizando apenas energia elétrica da concessionária, produziria cerca de 795 toneladas de CO<sub>2</sub>e por ano.

### 3.3 Cenários Comparativos

#### 3.3.1 Reutilização do sistema de cogeração

Ainda que não haja informações suficientes sobre a depreciação da máquina ou potencial de produção atual, serão feitas análises financeira num cenário de reutilização do sistema de cogeração, uma vez que todo o sistema ainda está instalado no aeroporto. Por terem passados cerca de 13 anos desde a instalação, poderão ser necessárias reparações aos equipamentos.

De acordo com uma estimativa de custo de capital uma usina de cogeração industriais baseadas em turbinas de combustão custa, em valor presente<sup>12</sup>, USD 1200 por kW (Kranz and Worrell, Effects of a Shortened Depreciation Schedule on the Investment Costs for Combined Heat and Power Systems 2001). Sabendo que a potencia solicitada pelo aeroporto é cerca de 3,7 MW (1,1MW de potência elétrica + 750 TR de potência térmica), o custo de um sistema de cogeração novo para esse caso seria USD.4.444.000,00. Contudo, uma vez que o projeto considerado é com um sistema em segunda mão, será estimado que o custo do capital instalado na presente condição é 40% do valor de um novo. Essa porcentagem foi estimava de acordo com algumas considerações: o projeto a ser analisado tem um período de vida útil de 20 anos, sendo que o maquinário foi utilizado por 7 anos (35% da vida útil do projeto). Uma vez que nem todos os componentes do capital se desgastam da mesma forma, esse número foi estimado em 40%.

Sendo assim o custo de capital instalado nas condições presentes é USD 1 776 000,00. Segundo o IEA, em 2008 o custo de O&M de um sistema de cogeração era de USD 40/kW, o que corresponde a USD 44/kW em 2018,

---

<sup>11</sup> tCO<sub>2</sub>e significa toneladas métricas de Dióxido de Carbono Equivalente.

<sup>12</sup> O valor da usina de cogeração referido pela fonte foi atualizado para valor presente, ref. 2018.

considerando uma taxa de subida de preço de 10% (IEA - International Energy Agency 2010). Sendo assim, o custo de O&M do projeto seria de USD 162 800,00.

O custo de gás natural na região do aeroporto é de USD 14<sup>13</sup> por 293,1 kWh. Considerando que o sistema de cogeração ainda é capaz de produzir 4 GWh conforme o projeto, o custo de compra de combustível seria de USD 191 061,07.

Na Tabela 6 encontra-se a síntese com os valores necessários para análise econômico-financeira.

**Tabela 6 - Valores considerados para análise econômico-financeira no cenário de Reutilização do Sistema de Cogeração.**

| <b>Métrica</b>                                    | <b>Valor</b> |
|---|--------------|
| <b>Custo de investimento [USD]</b>                | 1 776 000,00 |
| <b>Custo anual O&amp;M [USD]</b>                  | 162 800,00   |
| <b>Custo anual de compra de combustível [USD]</b> | 191 061,07   |
| <b>Período de estudo [anos]</b>                   | 20           |
| <b>Taxa anual de atualização</b>                  | 5%           |

A taxa de atualização considerada foi a taxa real de atualização.

Os cálculos estão apresentados na Tabela 7, em que estão expostos na:

**Coluna 1:** Os anos, considerando o ano zero como a data de hoje (dia do investimento) e o ano 1, final do primeiro ano;

**Coluna 2:** Os custos totais atualizados de acordo com a taxa de atualização exposta na Tabela 6. No ano 0 foi considerado o custo de investimento dos equipamentos (USD 1 776 000,00), que neste caso não haveria investimento propriamente dito, entretanto, os equipamentos que estão lá têm um custo que deve ser considerado como investimento. Nesta coluna também constam os custos anuais de O&M (equivalente ao valor constante de USD 162 800,00) e os custos anuais de combustível gás natural (igual a USD 191 061,07);

---

<sup>13</sup> O valor foi convertido da moeda local para dólar (USD) de acordo com o valor do câmbio comercial de referência do dia 1 de outubro de 2018.

**Coluna 3:** Valor atualizado do custo da parcela de energia elétrica comprada da concessionária, que seria cerca de 31% da energia elétrica consumida pelo aeroporto, já que o sistema de cogeração tem capacidade de produzir o restante. O valor da energia elétrica na região fornecido pela concessionária local é de USD 0,14/kWh<sup>14</sup>. Como seriam comprados cerca de 31% da eletricidade necessária, o valor anual de eletricidade seria cerca de USD 252 000,00. Esse valor está atualizado a partir do final do primeiro ano.

**Coluna 4:** A soma anual dos custos, ou seja, a soma das colunas 2 e 3.

---

<sup>14</sup> O valor foi convertido da moeda local para dólar (USD) de acordo com o valor do câmbio comercial de referência do dia 1 de outubro de 2018.

**Tabela 7 - Cálculo do LCC para o custo total de investimento, O&M e compra de energia elétrica através da reutilização do Sistema de Cogeração.**

| 1.Ano               | 2.Custos atualizados [USD] | 3.Custo da compra de eletricidade da rede [USD] | 4.Soma [USD]        |
|---------------------|----------------------------|---|---------------------|
| 0                   | 1 776 000,00               | -   | 1 776 000,00        |
| 1                   | 337 010,54                 | 240 000,00                                      | 576 743,88          |
| 2                   | 320 962,42                 | 228 571,43                                      | 549 279,88          |
| 3                   | 305 678,50                 | 217 687,07                                      | 523 123,70          |
| 4                   | 291 122,38                 | 207 321,02                                      | 498 213,05          |
| 5                   | 277 259,41                 | 197 448,59                                      | 474 488,62          |
| 6                   | 264 056,58                 | 188 046,28                                      | 451 893,92          |
| 7                   | 251 482,46                 | 179 091,70                                      | 430 375,16          |
| 8                   | 239 507,10                 | 170 563,52                                      | 409 881,11          |
| 9                   | 228 102,00                 | 162 441,45                                      | 390 362,96          |
| 10                  | 217 240,00                 | 154 706,14                                      | 371 774,25          |
| 11                  | 206 895,24                 | 147 339,18                                      | 354 070,71          |
| 12                  | 197 043,09                 | 140 323,03                                      | 337 210,20          |
| 13                  | 187 660,08                 | 133 640,98                                      | 321 152,57          |
| 14                  | 178 723,89                 | 127 277,12                                      | 305 859,59          |
| 15                  | 170 213,23                 | 121 216,31                                      | 291 294,85          |
| 16                  | 162 107,83                 | 115 444,10                                      | 277 423,67          |
| 17                  | 154 388,41                 | 109 946,77                                      | 264 213,02          |
| 18                  | 147 036,58                 | 104 711,21                                      | 251 631,44          |
| 19                  | 140 034,84                 | 99 724,96                                       | 239 648,99          |
| 20                  | 133 366,52                 | 94 976,15                                       | 228 237,14          |
| <b>Valor total:</b> |                            |   | <b>9 322 878,69</b> |

A reutilização do sistema de cogeração acarretaria num custo de USD 9 322 878,69, incluindo o custo atual dos equipamentos já existentes lá, custo de manutenção e operação, compra de combustível (gás natural) e considerando ainda que parte da eletricidade necessária seria comprada pela concessionária. Os preços de combustível e de eletricidade, nestes cálculos, foram considerados como constantes.

Como já citado anteriormente, a intensidade de emissão média do setor elétrico da região é de 0,137 tCO<sub>2</sub>e/MWh. Como a necessidade de compra da concessionária seria cerca de 1,8 GWh/ano, a quantidade de emissão seria cerca de 246,6 toneladas de CO<sub>2</sub>e. Considerando a média de eletricidade gerada pelo sistema de cogeração como 4 GWh/ano e utilizando uma calculadora online do EPA<sup>15</sup> (*United States Environmental Protection Agency*), a queima de gás natural para produção dessa quantidade de eletricidade geraria 790 toneladas de CO<sub>2</sub>e, totalizando 1036,6 tCO<sub>2</sub>e/ano.

### 3.3.2 Simulações

Nesta seção do trabalho serão propostos cenários alternativos, com simulações geradas pelo SAM, modelo já estudado no capítulo anterior. Cada uma das simulações está separada em 6 partes:

- **Contexto:** Explicação da proposta;
- **Base de Dados:** Fornece ou aponta a fonte de onde os dados foram obtidos;
- **Descrição do Sistema:** Relata dados técnicos do sistema escolhido;
- **Inputs fornecidos ao Modelo:** Valores que foram fornecidos para o modelo;
- **Outputs gerados:** Valores gerados pelo modelo;
- **Considerações sobre o sistema:** Ponderação de detalhes do sistema, tanto na parte técnica, quanto financeira. Também nessa parte foram expostos os cálculos financeiros pelo sistema LCC para fins comparativos, exibidos no Capítulo 4.

#### 3.3.2.1 Utilização de Energia Fotovoltaica

##### **Contexto**

A primeira simulação foi gerada com o SAM, com utilização dum sistema fotovoltaico.

A intenção desta simulação é instalar painéis fotovoltaicos para cobertura de

---

<sup>15</sup> Disponível em: <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>.

automóveis e geração de energia elétrica para o aeroporto. Um exemplo deste tipo de sistema é mostrado na Figura 5.



**Figura 5 – Geração de Energia solar em estruturas de estacionamento em *New Jersey* nos Estados Unidos.**

**Fonte: (The Maghreb Times 2017).**

O aeroporto em questão tem uma grande área de estacionamento. Há 21 fileiras para estacionamento, cada uma com cerca de 5 m de largura e, em média, 65 m de comprimento. Na Figura 6 encontra-se a estrutura do aeroporto com ampliação da imagem para estacionamento real, com a indicação de cada uma das fileiras.



Figura 6 – Imagem do estacionamento no aeroporto e ampliação do estacionamento (abaixo). Na imagem ampliada as fileiras do estacionamento estão indicadas com a numeração de 1 a 21. Fonte: Google Earth (Google 2018).

O sistema financeiro escolhido foi o LCC, explicado no Capítulo 1.

### Base de Dados

Este estudo utilizou dados climáticos obtidos no banco de dados de radiação solar disponível pelo NREL no site<sup>16</sup> *National Solar Radiation Database* (NSRDB). Os conjuntos de dados mensais meteorológicos da região foram obtidos<sup>17</sup> para cada mês do ano de 2015 no formato CSV. Neste arquivo estão incluídas informações como temperatura média do local, irradiações médias (global, direta e difusa) anual por

<sup>16</sup> Disponível em: <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/>.

<sup>17</sup> Os dados são enviados por correspondência eletrônica, após serem requeridos no site da NREL. É necessário dar informações do motivo de utilização e a qual filiação o utilizador pertence.

kWh/m<sup>2</sup>/dia, latitude, longitude e altitude.

O software disponibiliza todos os detalhes técnicos dos módulos e dos inversores escolhidos, como por exemplo medida dos módulos e eficiência tanto dos módulos quanto dos inversores.

Os parâmetros financeiros foram definidos por dados obtidos para a região estudada em documentos publicados pelo ENERRAY<sup>18</sup> (ENERRAY 2018) ao que se refere a custo de investimento por kW e custos anuais de operação. As informações referentes às taxas foram obtidas por médias governamentais dos últimos anos na região e a fonte de dados não foi fornecida por questão de sigilo.

### **Descrição do Sistema**

Cada fileira do estacionamento será composta por 224 módulos Evergreen ES-195 que compõem o painel fotovoltaico (do inglês, *array*), com 14 módulos por *string* e 16 *strings* em paralelo. O *array* fornece energia a um inversor SatCon AE-30-60-PV-A (410 V). As 21 fileiras totalizam 4200 módulos e 21 inversores. Os módulos estão alinhados e inclinados a 30 graus. Não há espaçamento entre os módulos.

### **Inputs fornecidos ao Modelo**

Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados os *inputs* técnicos e financeiros, respectivamente. Os dados referem-se apenas ao sistema de uma fileira do estacionamento, lembrando que no total são 21.

---

<sup>18</sup> A *Enerray* é uma empresa italiana do Grupo Industrial Maccaferri. Fundada em 2007, é focada em energia solar e oferece artigos de várias partes do mundo com informações técnicas e financeiras sobre os estágios de realização de uma usina fotovoltaica.

**Tabela 8 – Parâmetros técnicos do sistema referentes a 1 fileira da simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica.**

| <b>Métrica</b>                         | <b>Valor</b>                             |
|--|--|
| <b>Localização e dados de radiação</b> | Fornecidos pelo arquivo baixado do NSRDB |
| <b>Módulos por String</b>              | 14                                       |
| <b>Strings em Paralelo</b>             | 16                                       |
| <b>Número de inversores</b>            | 1  |
| <b>Inclinação</b>                      | 30° <sup>19</sup>                        |
| <b>Azimute</b>                         | 180° <sup>20</sup>                       |

**Tabela 9 – Parâmetros financeiros do sistema referentes à simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica.**

| <b>Métrica</b>                                | <b>Valor</b> |
|---|--------------|
| <b>Custo de capital [USD/kW]<sup>21</sup></b> | 1 360,00     |
| <b>Custo anual de Operação [USD/kW]</b>       | 14,00        |
| <b>Período de Análise [anos]</b>              | 20           |
| <b>Taxa anual de atualização</b>              | 5%           |

Lembrando que novamente a taxa de atualização considerada foi a taxa real.

### **Outputs gerados**

Os dados fornecidos na Tabela 10 foram gerados e fornecidos pelo modelo SAM e referem-se apenas a uma das 21 fileiras do estacionamento.

<sup>19</sup> Grau de inclinação fornecido pelo software.

<sup>20</sup> Azimute fornecido pelo software.

<sup>21</sup> O custo de capital foi calculado de acordo com o valor do médio do preço da instalação de sistemas de energia fotovoltaica da região do estudo. Esse valor foi convertido para dólar, de acordo com o câmbio comercial atual (1 de outubro de 2018).

**Tabela 10 – Dados de output referente a 1 fileira da Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica.**

| <b>Métrica</b>                                    | <b>Valor</b> |
|---|--------------|
| <b>Energia elétrica anual [kWh/ano]</b>           | 60 185       |
| <b>Potência do sistema [kW]</b>                   | 43,70        |
| <b>Área do sistema [m<sup>2</sup>]</b>            | 335          |
| <b>Custo de investimento [USD]</b>                | 59 435,77    |
| <b>Custo anual de operação e manutenção [USD]</b> | 611,84       |
| <b>Fator de capacidade [1 ano]</b>                | 15,7%        |
| <b>Rendimento energético [kWh/kW]</b>             | 1 377        |
| <b>Relação de desempenho</b>                      | 0,72         |

### **Considerações sobre o sistema**

Considerando que os dados do sistema inteiro sejam 21 vezes do que o valor gerado pelo software, os valores do sistema inteiro estão expostos na Tabela 11.

**Tabela 11 – Dados do sistema inteiro da Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica.**

| <b>Métrica</b>                                    | <b>Valor</b> |
|---|--------------|
| <b>Energia elétrica anual [GWh/ano]</b>           | 1,26         |
| <b>Potência do sistema [kW]</b>                   | 917,7        |
| <b>Área do sistema [m<sup>2</sup>]</b>            | 7.035        |
| <b>Custo de investimento [USD]</b>                | 1 248 151,17 |
| <b>Custo anual de operação e manutenção [USD]</b> | 12 848,64    |

Embora o software forneça métodos de análise financeira, optou-se por utilizar o LCC. Os cálculos estão apresentados na Tabela 12, em que estão expostos na:

**Coluna 1:** Os anos, considerando o ano zero como o de hoje (dia do investimento) e o ano 1, final do primeiro ano;

**Coluna 2:** Todos os custos atualizados para o valor atual (com a taxa de atualização de 5%, explícita na Tabela 9). No ano zero foi considerado o custo de investimento dos equipamentos. Os custos de manutenção e operação (O&M) do ano 1 ao ano 20;

**Coluna 3:** A parcela de energia elétrica comprada da concessionária, que seria 78% da energia elétrica consumida pelo aeroporto, já que o sistema fotovoltaico produz os outros 22%. Nessa coluna também foi considerada a depreciação da produção do sistema fotovoltaico como 0,8% ao ano, ou seja, foi considerado que a cada ano seria necessário comprar 0,8% de eletricidade a mais da concessionária do que no ano anterior. Os valores desta coluna já são os valores atualizados, para tanto utilizou-se como apoio os cálculos da Tabela 5, cujo cenário é o atual (utilização de 100% de energia elétrica através da concessionária);

**Coluna 4:** A soma das colunas 2 e 3, ou seja, o valor total atualizado (VA) dos custos com a compra do sistema de energia eólica e parte da energia elétrica comprada da concessionária.

**Tabela 12 – Cálculo do LCC para o custo total de investimento, O&M e compra de energia elétrica da Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica.**

| <b>1.Ano</b>        | <b>2.Custos atualizados<br/>[USD]</b> | <b>3.Energia elétrica<br/>[USD]</b> | <b>4.Soma dos VA<br/>[USD]</b> |
|---------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| <b>0</b>            | 1 248 151,17                          | -                                   | 1 248 151,17                   |
| <b>1</b>            | 13 236,80                             | 603 200,00                          | 616 436,80                     |
| <b>2</b>            | 12 606,48                             | 579 072,00                          | 587 082,67                     |
| <b>3</b>            | 12 006,17                             | 555 909,12                          | 559 126,35                     |
| <b>4</b>            | 11 434,45                             | 533 672,76                          | 532 501,28                     |
| <b>0</b>            | 10 889,95                             | 512 325,84                          | 507 144,08                     |
| <b>6</b>            | 10 371,38                             | 491 832,81                          | 482 994,36                     |
| <b>7</b>            | 9 877,50                              | 472 159,50                          | 459 994,63                     |
| <b>8</b>            | 9 407,15                              | 453 273,12                          | 438 090,12                     |
| <b>9</b>            | 8 959,19                              | 435 142,19                          | 417 228,69                     |
| <b>10</b>           | 8 532,56                              | 417 736,51                          | 397 360,66                     |
| <b>11</b>           | 8 126,25                              | 401 027,05                          | 378 438,72                     |
| <b>12</b>           | 7 739,28                              | 384 985,96                          | 360 417,83                     |
| <b>13</b>           | 7 370,75                              | 369 586,53                          | 343 255,08                     |
| <b>14</b>           | 7 019,76                              | 354 803,06                          | 326 909,60                     |
| <b>15</b>           | 6 685,48                              | 340 610,94                          | 311 342,47                     |
| <b>16</b>           | 6 367,13                              | 326 986,50                          | 296 516,64                     |
| <b>17</b>           | 6 063,93                              | 313 907,04                          | 282 396,80                     |
| <b>18</b>           | 5 775,17                              | 301 350,76                          | 268 949,33                     |
| <b>19</b>           | 5 500,16                              | 289 296,73                          | 256 142,22                     |
| <b>20</b>           | 5 238,25                              | 277 724,86                          | 243 944,97                     |
| <b>Valor total:</b> |                                       |                                     | <b>9 314 424,49</b>            |

Sendo assim o custo de investimento da solução 1 seria de USD 9 314 424,49, considerando o investimento nos equipamentos, manutenção e operação, depreciação do sistema e considerando que parte da eletricidade necessária seria comprada pela concessionária.

Quanto à quantidade de GEEs emitidos, como nesta simulação há necessidade de compra de em torno de 4,54 GWh/ano de eletricidade da concessionária, sabendo que a emissão média do setor elétrico da região é de 0,137 tCO<sub>2</sub>e/MWh (como já

exposto no item 3.3.1, pág. 48), a quantidade de emissão ainda seria cerca de 622 toneladas de CO<sub>2</sub>e.

### 3.3.2.2 *Utilização de Energia Eólica*

#### **Contexto**

A Simulação de Utilização de Energia Eólica também foi gerada com o software SAM, entretanto neste caso a tecnologia utilizada foi uma turbina eólica única.

Primeiramente foi feita uma pesquisa do potencial eólico da região a fim de investigar a coerência de continuar os estudos para esta simulação. Os estudos apontam que a região é ótima para instalação de aerogeradores, uma vez que possui regularidade da velocidade e pouca variação de direção do vento. A fonte de informação não será informada por motivos de sigilo.

Após verificação do potencial eólico, foi confirmada a possibilidade de instalação perto da área do aeroporto, uma vez que há uma grande área desocupada perto do aeroporto. A Figura 7 é uma representação gráfica de uma das possibilidades do gerador eólico instalado no aeroporto. O aerogerador possui escala correspondente com a planta do aeroporto.



**Figura 7 – Representação gráfica da turbina instalada no aeroporto num local próximo ao terminal de passageiros.**

**Fontes:** Imagem do aeroporto obtida pelo Google Earth (Google 2018); Imagem do aerogerador obtida pelo site do fabricante Enercon (Enercon 2018); Representação do cenário em conjunto criada pela autora deste trabalho.

Embora o SAM forneça análise financeira, por se tratar de um software comercial, foi escolhido o método LCC para análise financeira e posterior comparação entre cenários.

### **Base de Dados**

Esta simulação foi realizada com a informação de velocidade do vento numa certa altura obtida através de um estudo sobre os padrões de vento na região em que se localiza o aeroporto.

Não foram encontrados dados sobre o preço de instalação de geradores eólicos para o local em que o aeroporto se encontra. Portanto, foi utilizado o preço médio global de sistemas terrestres de 2017 (*onshore*) obtido na revista de notícias de negócios internacionais de energia eólica *WindPower Monthly* (Millborrow 2018). Os outros parâmetros financeiros foram definidos do mesmo modo que na Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica.

O SAM fornece as informações técnicas do gerador eólico escolhido como por exemplo a potência considerada e o diâmetro do rotor, mas também é possível

introduzir os dados manualmente.

### **Descrição do Sistema**

O sistema de energia eólica da simulação conta com um gerador eólico modelo Enercon E-82 E2 / 2,3 MW. A altura do ponto central foi definida como 84 metros, uma das alturas sugeridas pelo fabricante.

Foi utilizado um único gerador e não foram consideradas perdas no sistema.

### **Inputs fornecidos ao Modelo**

As Tabelas 13 e 14 apresentam os *inputs* técnicos e financeiros, respectivamente.

**Tabela 13 - Parâmetros técnicos do sistema referentes à Simulação de Utilização de Energia Eólica. Apenas 1 aerogerador foi considerado.**

| <b>Métrica</b>                              | <b>Valor</b> |
|---|--------------|
| <b>Velocidade anual do vento [m/s]</b>      | 5,3          |
| <b>Altura de referência [m]</b>             | 30           |
| <b>Altura do eixo do gerador eólico [m]</b> | 84           |

**Tabela 14 - Parâmetros financeiros do sistema referentes à Simulação de Utilização de Energia Eólica.**

| <b>Métrica</b>                                | <b>Valor</b> |
|---|--------------|
| <b>Custo de capital [USD/kW<sup>22</sup>]</b> | 1 600,00     |
| <b>Custo anual de Operação [USD/kW]</b>       | 50,00        |
| <b>Período de Análise [anos]</b>              | 20           |
| <b>Taxa anual de atualização</b>              | 5%           |

Como nos outros casos, a taxa considerada foi a taxa real de atualização considerada foi a taxa real que é igual à taxa nominal.

---

<sup>22</sup> O custo de capital foi calculado de acordo com o valor do médio do preço da instalação de sistemas de energia fotovoltaica da região do estudo. Esse valor foi convertido para dólar, de acordo com o câmbio comercial atual (ref. 1 de outubro de 2018).

## **Outputs gerados**

Os dados apresentados na Tabela 15 foram gerados e fornecidos pelo modelo SAM e referem-se ao sistema eólico da Simulação de Utilização de Energia Eólica.

**Tabela 15 – Dados de output referente à Simulação de Utilização de Energia Eólica.**

| <b>Métrica</b>                                    | <b>Valor</b> |
|---|--------------|
| <b>Energia elétrica anual [GWh/ano]</b>           | 5,6          |
| <b>Potência do sistema [kW]</b>                   | 2 350        |
| <b>Custo de investimento [USD]</b>                | 3 807 000,00 |
| <b>Custo anual de operação e manutenção [USD]</b> | 117 500,00   |
| <b>Fator de capacidade (1 ano)</b>                | 27%          |

## **Considerações sobre o sistema**

Com os dados da Simulação de Utilização de Energia Eólica, o sistema de energia eólica gerado forneceria 96,6% da energia elétrica que o aeroporto solicita.

Na Tabela 16 encontram-se os cálculos de LCC, em que se apresentam na:

**Coluna 1:** Os anos, considerando o ano zero como o de hoje (dia do investimento) e o ano 1, final do primeiro ano;

**Coluna 2:** Os custos anuais totais de investimento no sistema de energia fotovoltaica) atualizados para o valor atual (com a taxa de atualização de 5%, explicita na Tabela 14). Considerou-se no ano 1 os custos de investimento dos equipamentos. Os custos de manutenção e operação (O&M) foram considerados constantes do ano 1 ao ano 20.

**Coluna 3:** A parcela de energia elétrica comprada da concessionária, que seria 3,4% da energia elétrica consumida pela concessionária. O valor dessa coluna já é atualizado e foi utilizada os cálculos da Tabela 5, cujo Cenário é o atual (utilização de 100% de energia elétrica através da concessionária);

**Coluna 4:** A soma das colunas 2 e 3, ou seja, o valor total atualizado dos custos com a compra do sistema de energia eólica e parte da energia elétrica comprada da

concessionária.

**Tabela 16 - Cálculo do LCC para o custo total de investimento, O&M e compra de energia elétrica da Simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica.**

| <b>Métrica</b> | <b>Valor</b> | <b>Valor</b>        | <b>Valor</b>        |
|----------------|--------------|---------------------|---------------------|
| <b>0</b>       | 3 807 000,00 | -                   | 3 807 000,00        |
| <b>1</b>       | 111 904,76   | 26 293,33           | 138 198,10          |
| <b>2</b>       | 106 575,96   | 25 041,27           | 131 617,23          |
| <b>3</b>       | 101 500,92   | 23 848,83           | 125 349,75          |
| <b>4</b>       | 96 667,54    | 22 713,17           | 119 380,71          |
| <b>5</b>       | 92 064,32    | 21 631,59           | 113 695,91          |
| <b>6</b>       | 87 680,31    | 20 601,51           | 108 281,82          |
| <b>7</b>       | 83 505,06    | 19 620,49           | 103 125,55          |
| <b>8</b>       | 79 528,63    | 18 686,18           | 98 214,81           |
| <b>9</b>       | 75 741,55    | 17 796,36           | 93 537,91           |
| <b>10</b>      | 72 134,81    | 16 948,92           | 89 083,72           |
| <b>11</b>      | 68 699,82    | 16 141,83           | 84 841,64           |
| <b>12</b>      | 65 428,40    | 15 373,17           | 80 801,56           |
| <b>13</b>      | 62 312,76    | 14 641,11           | 76 953,87           |
| <b>14</b>      | 59 345,48    | 13 943,92           | 73 289,40           |
| <b>15</b>      | 56 519,51    | 13 279,92           | 69 799,43           |
| <b>16</b>      | 53 828,10    | 12 647,54           | 66 475,65           |
| <b>17</b>      | 51 264,86    | 12 045,28           | 63 310,14           |
| <b>18</b>      | 48 823,68    | 11 471,69           | 60 295,37           |
| <b>19</b>      | 46 498,74    | 10 925,42           | 57 424,16           |
| <b>20</b>      | 44 284,51    | 10 405,16           | 54 689,68           |
|                |              | <b>Valor total:</b> | <b>5 615 366,42</b> |

O custo total da Simulação de Utilização de Energia Eólica seria de USD 5 151 400,44.

Quanto às questões ambientais, como essa simulação ainda depende de cerca de 200 MWh/ano de eletricidade da concessionária local, a quantidade de emissão seria em torno de 27,4 toneladas de CO<sub>2</sub>e, uma vez que como já mencionado anteriormente, a emissão média do setor elétrico da região é de 0,137 tCO<sub>2</sub>e/MWh (como já exposto no item 3.3.1, pág. 48).

## Capítulo 4

### 4 Discussão dos Resultados

Os custos dos sistemas considerados no capítulo anterior, bem como a quantidade de GEEs em termos equivalente da quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitidos por cada um dos cenários estão apresentados na Tabela 17. Lembrando que: a **Situação Atual** refere-se à situação de compra de 100% da demanda elétrica da rede local; o cenário com **Reutilização da Cogeração** refere-se à situação em que os equipamentos do sistema de cogeração instalados no aeroporto seriam reutilizados, dependendo de 31% da energia elétrica da concessionária local; o cenário de **Utilização de Energia Fotovoltaica** refere-se à simulação com os painéis fotovoltaicos para cobertura de automóveis, produzindo 22% da energia elétrica consumida e comprando 6% de eletricidade da concessionária e o cenário de **Utilização de Energia Eólica** se refere ao sistema eólico, que conta com um gerador eólico e produz 96,6% da energia que consome, necessitando de apenas 3,4% de eletricidade advinda da rede local.

Tabela 17 – Comparação de custos dos sistemas (situação atual e simulações realizadas).

| Sistema                            | Custo Atualizado (LCC)<br>[USD] | Emissão de GEEs<br>[tCO <sub>2</sub> e/ano] |
|------------------------------------|---------------------------------|---|
| Situação atual                     | 10 119 314,80                   | 795   |
| Reutilização da Cogeração          | 9 326 368,11                    | 880   |
| Utilização de Energia Fotovoltaica | 9 314 424,49                    | 622   |
| Utilização de Energia Eólica       | 5 151 400,44                    | 27  |

Os dados expostos na Tabela 17 foram analisados separadamente em: Análise Econômico-Financeira e Análise Ambiental.

#### 4.1 Análise Econômico-Financeira

A Simulação de Utilização de Energia Eólica custaria 45% a menos do que a situação atual, em que o aeroporto compra da rede toda a energia elétrica consumida. Os sistemas de cogeração e de energia fotovoltaico apresentam custos muito semelhantes, sendo 8% mais baratos do que a situação atual.

Os dados da Tabela 17 referem-se a cenários cujo custo de energia elétrica e custo do gás natural foram considerados constantes. Para medir o impacto hipotético sobre a alteração de compra de combustível e eletricidade no custo de investimentos desses 4 cenários, foi realizada análise de sensibilidade em 3 diferentes situações:

- a. Consideração de uma taxa diferencial (negativa) de crescimento do custo de gás natural de -2.5% ao ano a partir do ano 6 até ao ano 20;
- b. Consideração de uma taxa diferencial (positiva) de crescimento do custo de energia elétrica de 2.5% ao ano a partir do ano 6 até ao ano 20;
- c. Consideração da ocorrência das situações a) e b) simultaneamente.

Os resultados dessa análise de sensibilidade estão expostos na Tabela 18.

**Tabela 18- Análise de sensibilidade dos 4 cenários em 3 diferentes situações: a. Diminuição do custo do gás natural em 2,5% ao ano a partir do sexto ano; b. Aumento do custo da energia elétrica em 2,5% ao ano a partir do sexto ano; c. Ocorrência das situações a e b simultaneamente.**

| Situação | Situação atual<br>[USD] | Cogeração<br>[USD] | Simulação de<br>Utilização de<br>Energia<br>Fotovoltaica<br>[USD] | Simulação de<br>Utilização de<br>Energia Eólica<br>[USD] |
|----------|-------------------------|--------------------|---|--|
| a.       | 10 119 314,80           | 9 078 314,26       | 9 314 424,49  | 5 615 366,42   |
| b.       | 11 428 305,02           | 9 728 665,66       | 10 396 926,58   | 5 659 872,09   |
| c.       |                         | 9 480 611,81       |   |  |

Com a diminuição do preço do gás natural (situação a) o único cenário que sofre alterações com relação ao custo é o de cogeração, ficando 2,7% mais barato que o valor exposto na Tabela 17. O sistema de cogeração seria, porém, 3% mais lucrativo que a simulação de Utilização de Energia Fotovoltaica. Nessa situação o sistema de energia eólico ainda seria o mais viável economicamente, seguido do sistema de

cogeração em segundo lugar, do sistema fotovoltaico em terceiro e por último a situação atual.

Caso apenas o valor da compra de eletricidade aumentasse (situação b) todos os cenários ficaram mais caros: o sistema de cogeração em 4%; a situação atual 13%; a simulação 1 ficaria 12% mais cara e a simulação de Utilização de Energia Eólica teria 1% do custo. Nessa situação o sistema de cogeração seria 7% mais lucrativo que a situação 1. O ranking de viabilidade econômica permanece o mesmo que nas situações anteriores (tanto exposto na situação a da Tabela 18, quanto aos números da Tabela 17): o primeiro lugar fica com a simulação de Utilização de Energia Eólica. Nessa situação o sistema energia eólica é 42% mais viável que o segundo lugar, ocupado pelo sistema de cogeração.

A situação c, em que o custo da energia elétrica aumentaria, enquanto o custo do gás natural diminuiria, apresenta valores diferentes ao da situação b apenas no sistema de cogeração. Nessa situação o sistema de cogeração é 9% mais barato que o sistema fotovoltaico e passa a ser 17% mais viável que a situação atual. Nesta situação o sistema de energia eólica ainda é a simulação mais viável economicamente.

## 4.2 Análises Ambientais e Técnicas

Com relação às emissões de gases do efeito estufa expostos na Tabela 17, em níveis ambientais o sistema eólico também seria o mais viável, uma vez que é o menos dependente da compra de eletricidade da rede.

Já é conhecido que os sistemas de energias renováveis evitam a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Entretanto é importante notar que o processo de fabricação de turbinas eólicas ou de painéis fotovoltaicos pode não ser tão ambientalmente correto assim. Por exemplo, os processos de fabricação de módulos fotovoltaicos envolvem produtos químicos perigosos semelhantes aos encontrados na indústria eletrônica, que causam impactos como a contaminação da água subterrânea, exposição dos trabalhadores a produtos químicos e outras emissões de ar e água se sobrepõem à desigualdade ambiental (Mulvaney 2014). Há fabricantes que obedecem aos critérios de qualidade

e ambientais. Uma vez que não se sabe se os fabricantes considerados neste trabalho seguem esses critérios, as pegadas de carbono da produção dos equipamentos das simulações 1 e 2, bem como dos equipamentos de cogeração não foram consideradas. Para uma análise completa quanto à quantidade de CO<sub>2</sub>e que cada um dos cenários produz seria necessário analisar todo o processo de fabricação dos sistemas considerados através do levantamento de dados em todas as fases do ciclo de vida do produto desde o processo de extração da matéria-prima, produção, distribuição e até o consumo e disposição final.

Além da viabilidade econômica de um projeto eólico a longo prazo, também são evidentes os benefícios ambientais ligados à energia eólica, como por exemplo neste ponto de vista de emissões de substâncias nocivas à atmosfera. Entretanto, existem outros aspectos ligados à preservação do ambiente e a possíveis desafios quanto a instalação de aerogeradores em um aeroporto que não podem ser negligenciados. É importante que os projetos sejam desenvolvidos de modo que estejam integrados com um conjunto de fatores envolvidos.

O impacto visual das turbinas é uma questão subjetiva, sendo que existem pessoas que consideram a presença de aerogeradores intrusiva e outros que consideram que os geradores eólicos integram à paisagem um aspecto harmonioso. Também deve ser considerado é o efeito sobre a vida animal, principalmente quanto às aves migratórias da região (Smil 2010).

Outra questão importante, é o fato de que, os geradores eólicos podem causar interferência eletromagnética em sinais de comunicação. As interferências eletromagnéticas podem ser causadas tanto por emissões eletromagnéticas produzidas pelas próprias turbinas eólicas quanto pela localização dos aerogeradores em relação às estações de rádio ou televisão existentes, o que pode ter influência na transmissão do sinal (Katsaprakakis 2012). No caso em questão isso poderia ocasionar na interferência da rádio de comunicação aeronáutica.

À medida que as pás giram para gerar energia, aumenta a turbulência a sotavento (Wang, et al. 2016). Para aviões de transporte grandes e pesados, essa turbulência não é uma grande ameaça. No entanto para aviões e helicópteros de aviação geral menores, passar a sotavento de uma turbina eólica que apresenta turbulência pode, em casos extremos, causar um voo inseguro.

Uma turbina eólica que não gere turbulência pode ainda representar um risco especial para os helicópteros, aeronaves pequenas e para a aviação geral, devido à sua posição. Por exemplo, turbinas eólicas colocadas perto do ponto de uma curva numa trajetória de aproximação podem bloquear a visibilidade crítica do piloto durante uma manobra próxima ao solo. Embora este perigo específico seja subjetivo, as soluções de segurança podem ser definidas em cada caso, chegando a um comum acordo entre as partes interessadas da aviação e da energia eólica.

Outro aspecto a ser considerado é que as turbinas eólicas produzem o chamado *shadow flicker* que é o efeito tremeluzente produzido através da oscilação de sombra causadas pelas lâminas de turbinas eólicas rotativas. O efeito *shadow flicker* causado pelos geradores eólicos têm o potencial de induzir crises de epilepsia fotossensível ou até aborrecimentos e estresse. Esses riscos podem ser reduzidos se o projeto for realizado da maneira adequada (Smedley, Webb and Wilkins 2010).

Assim como a energia eólica, sistemas fotovoltaicos implantados em aeroportos podem possuir desvantagens. Um exemplo é a refletividade, ou seja, a capacidade da superfície do módulo fotovoltaico em refletir a luz. Isso pode interferir na visibilidade do piloto ou da equipe do aeroporto. Embora essa seja uma hipótese a ser considerada, é importante salientar que os módulos fotovoltaicos são ópticamente projetados para minimizar a reflexão óptica em dispositivos fotovoltaicos convencionais e que geralmente possuem revestimento antirreflexo.

Há estudos de implementação de sistemas fotovoltaicos em aeroportos, bem como há aeroportos que já possuem esses sistemas instalados, alguns exemplos são o *Darwin International Airport* na Austrália, *Belfast International Airport* no Reino Unido e *Cochin International Airport* na Índia. Embora o cenário com instalação de sistema fotovoltaico apresentado neste trabalho não tenha sido a mais viável economicamente, a solução deve ser estudada novamente. Um projeto maior e não tão dependente da eletricidade advinda da rede poderia tornar a solução praticável.

Embora a instalação do sistema de cogeração não tenha sido viável quando foi instalado no passado, a reutilização do sistema é uma alternativa considerável. A cogeração permite aumentar a eficiência de conversão dos recursos energéticos, mas ainda assim não pode ser considerada uma fonte de energia renovável por depender da queima de um combustível. Ainda que na Tabela 17 o projeto tenha sido

o menos viável ambientalmente, vale considerar que sistemas de cogeração reduzem as emissões para o ambiente por fatores como: fornecimento da mesma energia final com um menor consumo de energia primária; consumo de eletricidade é junto à geração, isso evita perdas com o transporte e distribuição; aproveitamento de subprodutos energéticos em outras aplicações.

Em termos técnicos, o aeroporto utiliza grande quantidade térmica e eletricidade simultaneamente, fator que torna a instalação de cogeração potencialmente viável. Entretanto, sistemas dimensionados incorretamente podem gerar baixa confiabilidade e queda de energia, como aconteceu anteriormente no estudo de caso em questão. Outros problemas possíveis para o insucesso do projeto foi problemas de gestão, falta de avaliação correta da eficiência global do sistema e ao fato de que a conexão com a rede elétrica não atendia aos requisitos da concessionária. Estudar a reutilização do sistema é uma alternativa a se considerar. Para tanto seria necessário um estudo completo das condições dos equipamentos. Seria importante também avaliar os contratos de venda de eletricidade gerada para a rede, custos de compra de gás natural e eletricidade.

A situação atual não só é insatisfatória no ponto de vista ambiental e econômico, como também em questões de negócios. Quaisquer níveis de interrupção ou restrição de energia têm impacto econômico direto para a empresa. Em outras palavras, a dependência total da rede concessionária para abastecimento de eletricidade torna-se uma estratégia muito arriscada na ausência de concorrentes no fornecimento do serviço de eletricidade.

Outras soluções mais econômicas e mais eficientes podem estar disponíveis para essa situação e é essencial investigá-las cuidadosamente.

## Capítulo 5

### 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

#### 5.1 Conclusões

Esse trabalho analisou e comparou características de quatro modelos disponíveis no mercado. O SAM se mostrou um modelo completo e de fácil utilização e por isso foi utilizado para gerar as simulações do caso de estudo. Portanto, o SAM foi considerado o modelo mais apropriado para este caso devido aos seguintes fatores: objetivo pretendido (análise de cenários); tipo de tecnologia considerada (fotovoltaica e eólica); da complexidade do projeto; da formação e desenvoltura do utilizador e dos dados disponíveis. Houve ainda a tentativa de gerar simulações com o EnergyPLAN e o HOMER, entretanto por falta de dados de *input* não foi prosseguido com as simulações.

A análise referiu-se nomeadamente ao caso de estudo de compra e/ou geração de energia num aeroporto internacional que enfrentava problemas devido à falha de fornecimento de eletricidade advinda da rede concessionária local. Foram analisados diferentes cenários com o propósito de avaliar e verificar qual a melhor solução para abastecimento elétrico do aeroporto no ponto de vista técnico, econômico e ambiental.

Antes de gerar as simulações, foram analisados os possíveis motivos pelos quais o sistema de cogeração instalado tenha vindo a falhar no passado. Nos últimos anos de operação o sistema de cogeração diminuiu consideravelmente a comercialização de eletricidade, chegando a comercializar apenas 3% da eletricidade necessária no último ano de funcionamento. Isso fez com que o aeroporto se tornasse cada vez mais dependente da concessionária. A planta de cogeração do aeroporto começou a apresentar problemas técnicos na geração de eletricidade devido a falhas nos ajustes de parâmetros operacionais, a paradas para manutenção corretiva e preventiva nos motores, à gestão deficiente do cliente (aeroporto) no controle de documentação e fiscalização fez com que a situação se agravasse. Outros possíveis problemas para o insucesso do projeto estão relacionados a má gestão, falta de avaliação correta da eficiência global do sistema e ao fato de que a conexão com a rede elétrica não atendia aos requisitos da concessionária. Este estudo de caso demonstra que nem

sempre só a parte técnica mostra a viabilidade de um projeto de um sistema de eficiência energética. É necessário dar a devida importância a um bom planejamento e administração desde a fase inicial, em que são tomadas decisões cruciais no projeto, como durante todo o período em que o sistema está em funcionamento.

Ainda que a instalação do sistema de cogeração não tenha sido viável no passado, a reutilização do sistema é uma alternativa relevante. Em termos econômicos, voltar a utilizar os equipamentos presentes no aeroporto apontam um custo 8% a menos que a situação atual, em que a eletricidade é fornecida exclusivamente pela concessionária. Os cálculos da análise de sensibilidade indicam que essa solução pode ser ainda mais econômica com a variação dos custos de compra de gás natural e eletricidade. Quando considerado simultaneamente um aumento do custo de energia elétrica em +2,5% e do custo de gás natural de -2,5% ao ano a partir do ano 6 até ao ano 20, o cenário de reutilização de cogeração passou a ser 17% mais viável que a situação atual. Seria, portanto, importante avaliar os contratos de venda de eletricidade gerada para a rede, custos de compra de gás natural e eletricidade para perceber a viabilidade econômica real do projeto.

Em termos técnicos, o aeroporto utiliza simultaneamente uma grande quantidade térmica e eletricidade, fator que torna a instalação de cogeração potencialmente viável. Os cálculos mostraram que o sistema de cogeração seria o maior emissor de CO<sub>2</sub> e anualmente, produzindo 11% a mais que a situação atual. Ainda assim deve-se levar em conta que as instalações de cogeração permitem aumentar a eficiência de conversão dos recursos energéticos e reduz as emissões para o ambiente uma vez que o fornece a mesma quantidade de energia final com um menor consumo de energia primária.

O cenário com instalação de energia eólica apresentou-se o mais viável no ponto de vista financeiro, apresentando um custo de investimento 45% menor do que a situação atual e 40% menor do que os cenários dos sistemas de cogeração e fotovoltaico. Esse cenário sofreu menos de 1% de variação dos custos totais com o crescimento de 2,5% do custo de energia elétrica ao ano a partir do ano 6 até ao ano 20, situação sugerida para análise de sensibilidade, isso porque seria o cenário com menor dependência de compra de eletricidade da concessionária, precisando comprar apenas de 3% da energia elétrica que consome. Quanto menos dependente da

eletricidade da rede, mais concorrente se torna.

Os resultados também indicaram que o sistema de energia eólica é o mais viável ambientalmente e produziria 3% de CO<sub>2</sub>e do que produz a situação atual, exatamente por ser a situação mais independente da rede. No entanto, questões técnicas tornam a instalação do sistema eólico em aeroporto uma opção arriscada.

O cenário de instalação de sistema fotovoltaico apresentou um custo de 8% do valor da situação atual, não sendo tão atrativo por causa da grande dependência da compra de eletricidade da concessionária, cerca de 78% da energia elétrica que consome. Essa dependência também o tornou pouco interessante no ponto de vista ambiental, produzindo apenas 22% a menos de CO<sub>2</sub>e do que a situação atual. Tecnicamente instalações fotovoltaicas têm se mostrado uma boa opção para geração de eletricidade em infraestruturas aeroportuárias. Um projeto maior e não tão dependente da eletricidade advinda da rede poderia tornar a solução praticável para o caso de estudo.

A situação atual do aeroporto de total dependência de eletricidade da concessionária se mostrou insatisfatória ambientalmente, economicamente e estrategicamente. Quaisquer níveis de interrupção ou restrição de energia têm impacto econômico direto para a empresa. A dependência total da rede concessionária para abastecimento de eletricidade é, portanto, uma estratégia muito arriscada na ausência de concorrentes no fornecimento do serviço de eletricidade.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Em termos de trabalho futuro, existem algumas linhas de desenvolvimento que podem ser seguidas. Seria interessante utilizar o EnergyPLAN e HOMER para fazer uma análise entre *outputs* gerados por diferentes modelos com os mesmos dados de *input* fornecidos.

Mais uma sugestão é com relação a análise da viabilidade econômica de um projeto fotovoltaico com maior produção de eletricidade e menos dependente da rede elétrica.

Outra linha a seguir poderia ser a simulação de outros cenários com outras alternativas de energias renováveis, ou até mesmo a conjugação delas.

Estudar a eficiência real dos equipamentos de cogeração instalados para um estudo mais fiel a realidade também é uma possibilidade de trabalhos futuros. Também seria interessante avaliar os contratos regionais de venda de eletricidade gerada para a rede, custos de compra de gás natural e eletricidade para efeitos de análise de viabilidade econômica de reutilização da cogeração.

## Bibliografia

- Aalborg University. *EnergyPLAN*. Department of Development and Planning. n.d. Disponível em: <http://www.energyplan.eu/training/introduction/> (acesso em abril, 2018).
- Aalborg University. "EnergyPLAN Computer Model for Energy System Analysis." 2006.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. "ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura." 2001.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil (2ª edição)*. 2005.
- APREN - Associação de energias renováveis. 2018. Disponível em: <http://apren.pt>.
- Blair, N., A. Dobos, e N. Sather. "Case Studies Comparing System Advisor Model (SAM) Results to Real Performance Data." 2012.
- Blair, Nate. "System Advisor Model (SAM) Introduction Slides." NREL, 2017.
- Blair, N., A. Dobos, J. Freeman, T. Neises e M. Wagner. "System Advisor Model, SAM 2014.1.14: General Description." Department of Energy Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2014.
- Brander, M. "Greenhouse Gases, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>e, and Carbon: What Do All These Terms Mean?" Ecometrica, 2012.
- Capros, P., N. Tasios, M. Kannavou, M. Aslanoglou, C. Delkis, E. Kalaintzakis, C. Nakos, M. Zampara e S. Evangelopoulou. "Modelling study contributing to the Impact Assessment of the European Commission of the Electricity Market Design Initiative." 2017.
- Capros, P., L. Mantzos, V. Papandreou e N. Tasios. "European Energy and Transport, Trends to 2030 - Update 2007." 2008.
- Castro, Rui. *Uma introdução às energias renováveis : eólica, fotovoltaica e mini-hídrica*. Press, 2012.
- Commission of the European Communities. "Package of Implementation measures for the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020." 2008.
- Connolly, David, H. Lund, B. Vad Mathiesen e M. Leahy. "A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems." (Applied Energy) 87 (2010): 1059-1082.
- E3M Lab. "PRIMES MODEL - Detailed model description." 2014.
- Enercon. 2018. Disponível em: <https://www.enercon.de/en/products/ep-2/e-82/> (acesso em outubro, 2018).
- ENERRAY. *Enerray*. maio 2018. Disponível em: <https://www.enerray.com> (acesso em outubro, 2018).
- Fraunhofer ISE. "Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems." 2015.

- Google. *Google Earth*. 2018. Disponível em: <https://www.google.com/earth/> (acesso em outubro, 2018).
- HOMER Energy & NREL. "Getting Started Guide for HOMER Legacy (Version 2.85)." 2011.
- HOMER Energy. *HOMER Energy Support*. 2016. Disponível em: <http://usersupport.homerenergy.com>.
- HOMER Energy. *Homer microgrid News&Insight*. n.d. Disponível em: <http://microgridnews.com/homer-energy-bibliography/> (acesso em maio 29, 2018).
- IEA - Bioenergy. "Using a Life Cycle Assessment Approach to Estimate the Net Greenhouse Gas Emissions of Bioenergy." 2011.
- IEA - International Energy Agency e NEA - Nuclear Energy Agency. "Projected Costs of Generating Electricity." 2015.
- IEA - International Energy Agency. *Combined Heat and Power - Evaluating the benefits of greater global investment*. 2008.
- IEA - International Energy Agency. "Combined Heat and Power." 2010.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. "Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." 2007.
- ISES - International Solar Energy Society. *International use of the NREL System Advisor Model (SAM) with case studies*. 26 fevereiro 2018. Disponível em: <https://www.ises.org/webinars/427> (acesso em abril 20, 2018).
- Katsaprakakis, Dimitris AI. "A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the Prefecture of Lasithi, Crete." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.
- Khan, M.J., e M.T. Iqbal. "Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland." (Elsevier) 2004.
- Kranz, Nicole, e Ernst Worrell. "Effects of a Shortened Depreciation Schedule on the Investment Costs for Combined Heat and Power Systems." 2001.
- L.Guzman, A. Henao, e R.Vasquez. "Simulation and Optimization of a Parabolic Trough Solar Power Plant in the City of Barranquilla by Using System Advisor Model (SAM)." *Energy Procedia*, 2013.
- Lambert, Tom, Paul Gilman e Peter Lilienthal. "Micropower system modeling with homer." 2006. Disponível em: <https://www.homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf> (acesso em maio 28, 2018).
- Lund, Henrik. "Advanced Energy Systems Analysis Computer Model." Vers. 13. *EnergyPLAN*. setembro 2017. Disponível em: <http://www.energyplan.eu/wp-content/uploads/2017/11/documentation.pdf> (acesso em abril, 2018).
- Lund, Henrik. "Large-scale integration of optimal combinations of PV, wind and wave power into the electricity supply." 2005.

- Lund, Henrik. "Large-scale integration of wind power into different energy systems." (Elsevier) 2004.
- Lund, Henrik, e Willett Kempton. "Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G." (Elsevier) 2008.
- Lund, Henrik, Neven Duić, Goran Krajačić e Maria da Graça Carvalho. "Two energy system analysis models: A comparison of methodologies and results." (Elsevier) 2006.
- Ma, Tao, Hongxing Yang e Lin Lu. "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island." (Elsevier) 2014.
- Mendes, Claudino Franklim Pereira. *Optimização do planeamento energético para um sistema insular integrando produção híbrida Diesel/eólico/FV*. Porto, 2008.
- Millborrow, David. "At the tipping point: 2017 wind cost analysis." *WindPower Monthly*. 1 fevereiro 2018. Disponível em: <https://www.windpowermonthly.com/article/1455361/tipping-point-2017-wind-cost-analysis> (acesso em outubro 1, 2018).
- Mulvaney, Dustin. "Are green jobs just jobs? Cadmium narratives in the life cycle of Photovoltaics." *Geoforum* (Elsevier), 2014.
- OpenEI. *OpenEI*. 2014. Disponível em: [https://openei.org/wiki/System\\_Advisor\\_Model\\_\(SAM\)](https://openei.org/wiki/System_Advisor_Model_(SAM)) (acesso em abril 20, 2018).
- Pfenninger, Stefan, Adam Hawkes e James Keirstead. "Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges." (*Renewable and Sustainable Energy Reviews*) 33 (2014): 74-86.
- RECET - Associação dos Centros Tecnológicos de Portugal et al. *Guia de boas práticas de medidas de utilização racional de energia (URE) e energias renováveis (ER)*. Vila Nova de Famalicão: RECET, 2007.
- Rocco, M.V., E. Colombo e E. Sciubba. "Advances in exergy analysis: A novel assessment of the Extended Exergy Accounting method." 2014.
- Ruegg, Rosalie T. e Harold E. Marshall. *Building Economics Theory and Practice*. New York: Springer Science + Business Media, LCC, 1990.
- Sá, André Fernando Ribeiro de. "Sistemas de Cogeração." *O electricista - Revista Técnico-Profissional*, 2012: 36 - 42.
- Sayigh, Ali. "Comprehensive Renewable Energy." (Elsevier) 2012.
- Shahzad, M. Kashif, Adeem Zahid, Tanzeel ur Rashid, Mirza Abdullah Rehan, Muzaffar Ali e Mueen Ahmad. "Techno-economic feasibility analysis of a solar-biomass off grid system for the electrification of remote rural areas in Pakistan using HOMER software." (Elsevier) 2017.
- Silva, Alfredo Verónico da e Pedro Manuel Pereira Costa. *Cogeração e Trigeriação - Um caso prático*. 2005.
- Silva, Gardenio Diogo Pimentel da e Marcelo José Raiol de Souza. "Análise de variáveis de projeto de sistema solar fotovoltaico utilizando o modelo sam: uma comparação entre belém, fortaleza e Brasília1." *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 2016.

- Smedley, Andrew R. D., Ann R. Webb e Arnold J. Wilkins. *Potential of wind turbines to elicit seizures under various meteorological conditions*. 2010.
- Smil, Vaclav. *Energy Myths and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate*. 2010.
- The Maghreb Times. 2017. Disponível em: <https://themaghrebtimes.com/03/08/top-solar-pv-parking-structure-manufacturers/> (acesso em setembro 28, 2018).
- Wang, Yaxing, Mark White, George N. Barakos, Stephen Wheeler, Peter Tormey, and Panagiota Pantazopoulou. "Wind Turbine Wake Encounter by Light Aircraft." *Journal of Aircraft*, 2016.
- WindEurope. 2018. Disponível em: <https://windeurope.org> (acesso em setembro 20, 2018).