



Pedro Guilherme Muniz Correia

Avaliação técnico-financeira da gestão energética industrial que considere as incertezas do processo de medição e verificação da performance: uma abordagem baseada em Opções Reais

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia pra qualidade e inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rodrigo Flora Calili
Co-orientador: Prof. Carlos de Lamare Bastian-Pinto

Rio de Janeiro
Outubro de 2021



Pedro Guilherme Muniz Correia

Avaliação técnico-financeira da gestão energética industrial que considere as incertezas do processo de medição e verificação da performance: uma abordagem baseada em Opções Reais

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão examinadora abaixo:

Prof. Rodrigo Flora Calili

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Prof. Carlos de Lamare Bastian-Pinto

Co-orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

George Alves Soares

Growing Energy

Luiz Eduardo Brandão

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de outubro de 2020

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

Pedro Guilherme Muniz Correia

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 2017. Trabalha no setor público desde de 2010. Atualmente trabalha na Fundação Oswaldo Cruz como Gerente do Laboratório de Metrologia e Validação e é mestrando do Programa de pós-graduação em Metrologia pela PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Correia, Pedro Guilherme Muniz

Avaliação técnico-financeira da gestão energética industrial que considere as incertezas do processo de medição e verificação da performance: uma abordagem baseada em opções reais / Pedro Guilherme Muniz Correia ; orientador: Rodrigo Flora Calili ; co-orientador: Carlos de Lamare Bastian-Pinto. – 2021.

106 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de pós-graduação em Metrologia, 2021.

Inclui bibliografia

1. Metrologia - Teses. 2. Metrologia. 3. Eficiência energética. 4. Medição e verificação. 5. Sistema de AVAC. 6. Opções reais. I. Calili, Rodrigo Flora. II. Pinto, Carlos de Lamare Bastian. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de pós-graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD: 389.1

A minha irmã Anna Beatriz que em vida me ensinou que o importante é fazer o bem, ajudar ao próximo e nunca parar de tentar e agora no céu, junto com Deus, cuida de mim e da minha família.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Rodrigo Flora Calili e ao meu co-orientador Prof. Carlos de Lamare Bastian-Pinto pelo estímulo, paciência e parceria para a realização deste trabalho.

A PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Metrologia pelos ensinamentos e pela ajuda.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

Aos amigos que participaram direta e indiretamente sempre dando suporte e aguentando minhas preocupações.

Aos meus pais Pedro e Eliane, minhas irmãs Anna Beatriz e Anna Clara e minha avó Aracy por todo amor, carinho, compreensão e paciência ao longo dessa jornada.

A minha esposa Roberta do Sol e meus enteados João Victor e Ana Júlia pela paciência, amor, carinho e incentivo para finalizar mais um ciclo.

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

Resumo

Correia, Pedro Guilherme Muniz; Calili, Rodrigo Flora (orientador); Bastian-Pinto, Carlos de Lamare (co-orientador). **Avaliação técnico-financeira da gestão energética industrial que considere as incertezas do processo de medição e verificação da performance: uma abordagem baseada em Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2021. 92p. Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Dada a crescente demanda de energia elétrica em todo o mundo, somado ao desafio de buscar um modo mais eficiente de consumir a energia elétrica sem perder de vista a viabilidade econômico-financeira dos projetos, verifica-se na literatura a escassez de modelos que levam em conta estas questões para implementação dos projetos para gestão de energia. Nestes projetos, além da busca pela redução do consumo de energia, deve-se considerar as incertezas atreladas ao investimento para as tomadas de decisão entre investir ou abandoná-los. O objetivo desta dissertação é propor um modelo para avaliação técnico-financeira de um projeto de gestão de energia a partir de uso da geração distribuída com fontes renováveis e ações de eficiência energética. O modelo conceitual desenvolvido para alcançar tal objetivo agrega ferramentas modernas de avaliação econômico-financeira, opções reais, e metodologias de Medição e Verificação da performance de projetos de eficiência energética. Os resultados da aplicabilidade deste modelo foram obtidos através do seu emprego em uma situação real de avaliação de um projeto de gestão de energia na indústria farmacêutica. Concluiu-se com esta aplicação que é possível realizar avaliação técnico-financeira de projetos para gestão de energia por meio da abordagem de opções reais obtendo-se resultados satisfatórios com a aplicação do modelo.

Palavras-chaves

Metrologia; eficiência energética; medição e verificação; sistema de AVAC; energia solar fotovoltaica; opções reais

Abstract

Correia, Pedro Guilherme Muniz; Calili, Rodrigo Flora (orientador); Bastian-Pinto, Carlos de Lamare (co-orientador). **Technical-financial evaluation of the industrial energy management considering the uncertainties of the performance measurement and verification process: a real options approach**. Rio de Janeiro, 2021. 92p. Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Given the growing demand for electricity worldwide, added to the challenge of finding a more efficient way to consume electricity without losing sight of the economic and financial viability of projects, there is a scarcity of models in the literature that lead to account these issues for the implementation of energy management projects. In these projects, in addition to seeking to reduce energy consumption, uncertainties linked to investment must be considered as a recovery of the decision between investing or abandoning them. The objective of this dissertation is to propose a model for the technical and financial evaluation of an energy management project based on the use of distributed generation with renewable sources and energy efficiency actions. The conceptual model developed to achieve this objective combines modern tools for evaluating financial savings, real options, and methodologies for measuring and verifying the performance of energy efficiency projects. The results of the applicability of this model were obtained through its use in a real situation of evaluation of an energy management project in the pharmaceutical industry. It was concluded with this application that it is possible to carry out technical-financial evaluation of energy management projects through the real options approach.

Keywords

Metrology; energy efficiency; measurement and verification; HVAC system; photovoltaic solar energy; real options

Sumário

| | |
|---|----|
| 1 Introdução | 13 |
| 1.1. Definição do problema de pesquisa | 17 |
| 1.2. Objetivos: Geral e específicos | 18 |
| 1.3. Metodologia | 19 |
| 1.3.1. Fase exploratória e descritiva | 20 |
| 1.3.2. Fase de pesquisa aplicada | 22 |
| 1.3.3. Fase conclusiva | 22 |
| 1.4. Estrutura da dissertação | 22 |
| 2 Métodos de M&V aplicados em projetos para a gestão energética | 24 |
| 2.1. Gestão de energia e Medição e Verificação (M&V) | 25 |
| 2.2. Referenciais normativos e protocolos para Medição e Verificação | 30 |
| 2.2.1. Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) | 30 |
| 2.2.1.1. Princípios fundamentais do PIMVP | 30 |
| 2.2.1.2. Opções de métodos para M&V | 32 |
| 2.2.2. <i>Measurement of Energy and Demand Savings</i> – ASHRAE 14 | 33 |
| 2.2.2.1. Determinando a economia de energia pelo Guia 14 ASHRAE | 34 |
| 2.2.3. Normas ISO: família 50000 | 35 |
| 2.3. Aplicação de M&V em projetos para a gestão de energia | 39 |
| 2.3.1. Aplicação de M&V em projetos de eficiência energética de sistemas AVAC | 40 |
| 2.3.2. Aplicação de M&V em projetos de geração de energia renovável | 43 |
| 2.4. Ferramentas estatísticas para calcular a incerteza na determinação da energia conservada | 44 |
| 2.4.1. Métricas estatísticas | 45 |
| 2.5. Considerações sobre o capítulo | 46 |
| 3 Análise de investimento de projetos para gestão de energia | 47 |
| 3.1. Risco e Incerteza | 48 |
| 3.1.1. Árvore de decisão | 49 |
| 3.1.2. Simulação de Monte Carlo | 50 |
| 3.2. As Opções Reais | 51 |
| 3.3. Aplicação de OR em projetos para gestão de energia | 54 |
| 3.4. Considerações do Capítulo | 58 |

| | |
|---|-----|
| 4 Modelo conceitual para avaliação técnico-financeira de um projeto de gestão de energia | 59 |
| 4.1. Visão geral do modelo proposto | 59 |
| 4.2. Descrição da fase da avaliação dos projetos candidatos | 60 |
| 4.3. Descrição da Avaliação financeira com Opções Reais | 67 |
| 4.4. Considerações sobre o capítulo | 70 |
| 5 Validação do modelo: estudo empírico aplicado a um projeto de gestão de energia em uma indústria farmacêutica | 71 |
| 5.1. Contexto de aplicação: projetos para gestão de energia para o setor industrial farmacêutico | 71 |
| 5.2. Coleta, análise e formatação dos dados dos projetos de uma indústria farmacêutica | 72 |
| 5.2.1. Projeto de eficiência energética | 72 |
| 5.2.1.1. Determinação da linha de base | 73 |
| 5.2.2. Projeto de Geração distribuída – Solar fotovoltaica | 84 |
| 5.3. Discussão dos resultados e considerações sobre o capítulo | 91 |
| 6 Conclusão | 94 |
| Referências bibliográficas | 97 |
| Apêndice I – Formatação dos dados para simulação no FPW | 102 |
| Apêndice II – Árvore binomial com valores antes da subtração do FC | 103 |
| Apêndice III – Árvore binomial com valores depois da subtração do FC | 104 |
| Apêndice IV – Árvore binomial com valores antes da subtração do FC com exercício da opção real | 105 |
| Apêndice V – Árvore binomial com valores depois da subtração do FC com exercício da opção real | 106 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Desenho da pesquisa | 20 |
| Figura 1.2: Mapa conceitual da pesquisa | 21 |
| Figura 2.1: Exemplo de histórico de energia | 27 |
| Figura 2.2: IDE, LBE e metas | 37 |
| Figura 2.3: Esquema de implementação de M&V | 39 |
| Figura 3.1: Árvore de decisão | 49 |
| Figura 3.2: Simulação de Monte Carlo | 51 |
| Figura 3.3: Simulação de Monte Carlo e árvores binomiais | 51 |
| Figura 4.1: Fluxograma geral do modelo | 61 |
| Figura 4.2: Modelo conceitual da performance energética | 62 |
| Figura 4.3: Critérios para definição da GD | 64 |
| Figura 4.4: Elaboração de um modelo de Regressão Dinâmica | 68 |
| Figura 4.5: Exemplo de árvore Binomial Recombinante com $d = 1/u$ | 70 |
| Figura 5.1: Histórico de consumo total de energia | 75 |
| Figura 5.2: Histórico de temperatura | 76 |
| Figura 5.3: GDA | 77 |
| Figura 5.4: Dados de produção | 79 |
| Figura 5.5: Fontes de dados usados para gerar o modelo de linha de base | 81 |
| Figura 5.6: FAC dos resíduos | 83 |
| Figura 5.7: Projeção da linha de base para o período pós-AEE | 84 |
| Figura 5.8: Níveis de irradiação solar por região do Brasil | 86 |
| Figura 5.9: Estimativa de geração do parque solar fotovoltaico | 87 |

Lista de Quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1: Visão geral das poções de M&V | 32 |
| Quadro 2.2: Artigos sobre M&V em sistemas AVAC e suas metodologias | 40 |
| Quadro 2.3: Artigos sobre M&V em sistemas de geração de energia renovável e suas metodologias | 43 |
| Quadro 2.4: Descrição das ferramentas utilizadas - PIMVP x Guia 14 x GUM | 44 |
| Quadro 3.1: Tipos de incertezas na visão econômica | 53 |
| Quadro 3.2: Artigos sobre OR e projetos de EE | 55 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1: Quantitativo de medidores inteligentes nos EUA | 28 |
| Tabela 3.1: Tipos de incertezas na visão econômica | 53 |
| Tabela 5.1: Consumo total versus consumo AVAC | 74 |
| Tabela 5.2: Testes para verificação de variáveis independentes | 80 |
| Tabela 5.3: Variáveis PROD, GDA e _CONST | 81 |
| Tabela 5.4: Variáveis e seus coeficientes para LB | 82 |
| Tabela 5.5: Métricas estatísticas | 82 |
| Tabela 5.6: Teste de Durbin-Watson e Ljung-Box | 83 |
| Tabela 5.7: Dados de Consumo Real versus Projetado | 84 |
| Tabela 5.8: Parâmetros para simulação do preço da energia | 88 |
| Tabela 5.9: Tarifa Média de Fornecimento com Impostos | 89 |

1

Introdução

O consumo de energia elétrica sempre foi um dos indicadores do desenvolvimento econômico e do nível da qualidade de vida de qualquer sociedade, pois reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto à capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados. Porém, as mudanças climáticas estão levando a humanidade a buscar novas fontes de energia e novas tecnologias que proporcionem a redução do consumo energético sem prejudicar seu desenvolvimento.

O sistema de gestão de energia engloba tanto as medidas pelo lado da demanda (e.g., eficiência energética), quanto as medidas pelo lado da oferta (e.g., geração distribuída). O incentivo ao uso eficiente da energia e uma gestão energética eficaz deve ser realizado para conter o crescimento do consumo energético sem prejudicar a qualidade de vida das pessoas e o rendimento dos setores industrial, comercial e de serviços. O uso de energias renováveis distribuídas e o gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) são exemplos de medidas utilizadas para promover o uso eficiente da energia.

O gerenciamento pelo lado da demanda é o planejamento e a implementação de ações destinadas a influenciar nos consumidores de forma a produzir alterações desejadas na curva de carga (Gellings, 1985), dessa maneira se faz necessário o conhecimento da curva de carga da área que se deseja gerenciar. Já a geração distribuída (GD) pode ser considerada como um sistema de geração composto por uma única fonte ou fontes híbridas de geração de energia e é instalado próximo ao centro de consumo (Twaha; Ramli, 2018). Segundo relatório de Unidades Consumidoras com Geração distribuída publicado no site da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, em junho/2020 a energia solar fotovoltaica representa cerca de 97% do mercado de GD do Brasil tendo 6.636.674,08kW de potência instalada de um total de 6.822.141,53kW, por exemplo.

Desde o racionamento em 2001 o cenário energético no Brasil vem evoluindo constantemente, o governo brasileiro criou leis e decretos que impulsionaram as empresas a buscarem por projetos para gestão de energia (Tonim, 2009).

Há uma série de vantagens alcançadas por meio do desenvolvimento de processos industriais com maior eficiência energética, além das preocupações com os custos crescentes de energia. Neste sentido escolheu-se uma indústria do ramo farmacêutico como objeto deste estudo, servindo para demonstrar a aplicabilidade do modelo proposto.

Tecnologias eficientes em energia muitas vezes oferecem benefícios adicionais, como melhoria da qualidade, aumento da produção e maior eficiência do processo, o que pode levar a maiores ganhos de produtividade. Por outro lado, a utilização de fontes renováveis de energia pode promover a médio e longo prazo a redução com os gastos em consumo de energia e consequentemente um aumento na receita disponível para outras finalidades. Em resumo, o investimento em projetos para gestão de energia utilizando ações de eficiência energética e uso de fontes renováveis de energia pode ser considerada uma boa estratégia de negócios para que setor industrial melhore sua competitividade no mercado nacional e global.

O Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída (ProGD), foi criado em 2015 pela ANEEL, com o intuito de incentivar a geração de energias renováveis, principalmente a energia solar. Em 2012 a ANEEL estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica através da Resolução Normativa 482 de 17 de abril de 2012.

A RN 482/2012 estabelecia a microgeração distribuída como central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes renováveis de energia elétrica conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. A RN482/2012 também definia minigeração distribuída como central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1MW e que utilize fontes renováveis de energia elétrica conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (REN ANEEL 482/2012). Porém, a RN 482/2012 sofreu

alterações previstas nas RN 687/2015 e RN 786/2017 dentre as mudanças, os pontos mais significativos foram o aumento do tempo para consumo dos créditos de energia de 36 para 60 meses, o tempo de aprovação do sistema fotovoltaico pela concessionária de energia que reduziu de 82 para 34 dias e as definições de potência instalada para micro e minigeração. O critério de classificação considerados atualmente para um sistema de micro geração passou a ser a potência instalada menor ou igual a 75kW e para mini geração a potência instalada superior a 75kW e menor ou igual a 5MW. Essas duas modalidades de GD podem ser aplicadas a pequenas e médias indústrias para implementação do uso de fontes renováveis de energia.

Atualmente foi aprovada na câmara dos deputados e tramita no senado federal o PL 5829 que cria o Marco Legal da Geração distribuída e propõe algumas mudanças nas regras atuais como, por exemplo, o limite para minigeração solar passará a ser 3MW, os micros/minigeradores poderão vender seus créditos para as distribuidoras e os créditos gerados de energia em uma zona da permissionária poderão ser compensados na área de distribuição da concessionária.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2020 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o setor industrial foi o segundo maior consumidor de energia em 2020 consumindo 32,1% do total da energia, sendo 53,9% dessa energia vinda de fontes não renováveis, o que revela que ainda há um espaço amplo para investimentos em fontes renováveis, principalmente se tratando de geração distribuída. O crescimento da geração distribuída no Brasil, 169% segundo dados da EPE, mostra que essa opção está cada vez mais atraente e vem sendo muito empregada inclusive no setor industrial.

A energia solar fotovoltaica atualmente possui ampla capacidade de ser utilizada para mini ou microgeração, pois seus componentes são modulares, de fácil instalação nos diversos tipos de locais e com baixo custo de manutenção (Rediske *et al.*, 2018), somado a isso os consumidores podem adquirir todo o equipamento necessário para montar sua unidade geradora através de financiamentos bancários e ainda possuem como incentivo governamental a isenção do ICMS tanto para o envio da energia produzida quanto para o recebimento dos créditos.

Outro ponto fundamental de um projeto de gestão de energia é o investimento em eficiência energética para que as indústrias possam implementar um sistema de gestão de energia, que tem por objetivo a definição e investigação das variáveis de consumo dentro da indústria que podem ser controladas, viabilizadas e otimizadas para gerar indicadores e recursos que demonstram a eficiência dos fatores que afetam diretamente o consumo de energia (Samed *et al.*, 2012). Galitsky *et al.* (2005), em seu trabalho sobre possibilidades de redução de custos e melhorias para indústrias farmacêuticas, com base em estudo feito em diversas instalações nos EUA, mostrou que medidas de eficiência energéticas em sistemas AVAC (Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado) proporcionaram uma redução 10% no consumo total da energia consumida pelo sistema de refrigeração, tendo estas empresas economizado milhares de dólares por ano.

A implementação de projetos para melhorar a gestão de energia passa pelos processos de medição e verificação (M&V) da energia conservada ou gerada (no caso da GD), pois sem eles não haveria como determinar a quantia da redução de consumo, nem estabelecer as metas a serem alcançadas. Dentre as normas e documentos de referência, o Protocolo Internacional de Medição, Verificação e Performance é o principal documento utilizado para se definir as políticas de eficiência energética e as estratégias do processo de M&V a serem adotados na instalação. Todavia, as normas e protocolos apresentam soluções muito abrangentes, fazendo que não haja uma padronização, com isso as soluções de M&V para comprovação das ações de eficiência energética dentro de um projeto de gestão de energia são baseadas nas experiências dos profissionais, fugindo em alguns casos de um método de engenharia (Xia e Zhang, 2013).

Por outro lado, o custo da implementação de M&V em projetos para a gestão de energia nas indústrias, a intermitência na geração de energia de fontes renováveis como a fotovoltaica e a volatilidade dos preços da energia no mercado atual podem afetar negativamente os ganhos previsíveis, logo há a necessidade de uma avaliação da viabilidade financeira dos projetos para a gestão de energia em conjunto com métodos de medição e verificação mais modernos. A teoria de opções reais (TOR) surge como um fator inovador na avaliação de viabilidade econômica para tomadas de decisão sobre investimento ou abandono de investimento em novos negócios, pois busca retornar ao investidor respostas mais realistas considerando as incertezas

financeiras (Dias, 2014), podendo, portanto, ser aplicados a projetos para gestão de energia.

A literatura tem demonstrado que o desenvolvimento de métodos para implementação de projetos para gestão de energia e M&V têm avançado a passos largos. Manjarres *et al.*, (2017) e Shi *et al.*, (2017) utilizaram métodos de predição baseados na ocupação em tempo real e na previsão de temperatura para a respectiva região. Kajl *et al.*, (1997) propuseram uma rede neural para predição do consumo energético abordando multi-parâmetros não lineares utilizando o software DOE-2. Embora existam diversos caminhos a serem seguidos para os projetos para gestão de energia e medição e verificação da energia conservada, há uma escassez de modelos que levam em conta as questões financeiras para implementação dos processos de M&V, pois além da busca por menores incertezas de medição durante o processo de medição e verificação da energia conservada, deve-se considerar as incertezas atreladas ao investimento em tais projetos para as tomadas de decisão entre investir ou abandoná-los.

A criação de uma ferramenta capaz de avaliar técnico-financeiramente um projeto de gestão de energia, de modo a permitir que esses projetos sejam gerenciados, tendo suas incertezas monitoradas de forma dinâmica, poderá beneficiar as Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ESCOs), fabricantes de equipamentos e investidores, além dos órgãos normativos. Sendo assim, esse trabalho busca contribuir no avanço do conhecimento sobre métodos de avaliação de projetos de eficiência energética e de geração distribuída.

Esta dissertação insere-se na linha de pesquisa “Redes Inteligentes (*Smart Grid*)” do Programa de Pós-graduação em Metrologia (PósMQI) da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

1.1.

Definição do problema de pesquisa

Considerando a crescente demanda de energia elétrica em todo o mundo somada ao desafio de buscar um modo mais eficiente de consumir a energia elétrica

por meio da implementação de ações de eficiência energética e uso de fontes de energia renovável distribuída, levando-se em conta a viabilidade econômica dos projetos, bem como o processo de verificação da energia conservada, no caso da eficiência energética, e gerada, no caso da geração distribuída, definiu-se a seguinte questão principal a ser respondida ao longo da pesquisa:

“Como avaliar técnico-financeiramente projetos para a gestão de energia de indústrias, minimizando as incertezas do processo de Medição e Verificação da performance?”

1.2.

Objetivos: Geral e específicos

Buscando contribuir para a análise das opções existentes para a implementação de projetos que utilizem processos de M&V, em que pesem as incertezas de medição em sua viabilidade econômica, o objetivo geral da dissertação é propor um modelo para avaliação técnico-financeira de um projeto de gestão de energia a partir de uso da geração distribuída com fontes renováveis e ações de eficiência energética. Os projetos para a gestão energética objeto desta dissertação são, pelo lado da demanda, eficiência energética em sistemas de AVAC, e pelo lado da oferta, geração solar fotovoltaica distribuída.

Em termos específicos, a dissertação busca:

- Identificar e analisar os métodos adotados para definição de linha de base em processos de M&V, selecionando-os conforme sua performance para comprovação da energia elétrica conservada em projetos para a gestão de energia;
- Identificar, analisar e selecionar ferramentas de análise de risco e opções reais para avaliação de viabilidade de projetos para a gestão de energia;
- Identificar estudos empíricos que definam quais são os principais métodos de Medição e Verificação da performance utilizados para comprovação da energia elétrica conservada em projetos para a gestão de energia;
- Definir um modelo de avaliação de projetos para a gestão energética;
- Validar empiricamente o modelo proposto em um sistema de AVAC e um sistema de geração de energia solar fotovoltaica de uma indústria farmacêutica;

- Propor recomendações para ESCOs, fabricantes de equipamentos, normas, protocolos e programas de conservação de energia governamentais sobre melhorias na metodologia de avaliação técnico-financeira de projetos para a gestão energética.

1.3. Metodologia

A pesquisa pode ser considerada aplicada, descritiva e metodológica (quanto aos fins), segundo Vergara (2002).

Quanto aos meios de investigação, a metodologia compreende:

- Pesquisa bibliográfica e documental sobre os temas centrais da pesquisa;
- Pesquisa sobre a aplicação de ferramentas estatísticas e de viabilidade de projetos para avaliar projetos para gestão de energia que utilizam M&V para comprovação da energia conservada;
- Estudo de caso utilizando dados de consumo energético de uma indústria e um projeto de implementação de uma unidade de minigeração de energia fotovoltaica;

A figura 1.1 apresenta o desenho da pesquisa, de acordo com três fases principais:

- Fase 1: Exploratória e descritiva;
- Fase 2: Pesquisa aplicada;
- Fase 3: Conclusiva.

Nessa figura pode-se observar o desenvolvimento de cada fase e os resultados esperados em cada bloco. Vale ressaltar que o desenho da pesquisa foi desenvolvido em total alinhamento com os objetivos enunciados no item 1.2 deste capítulo.

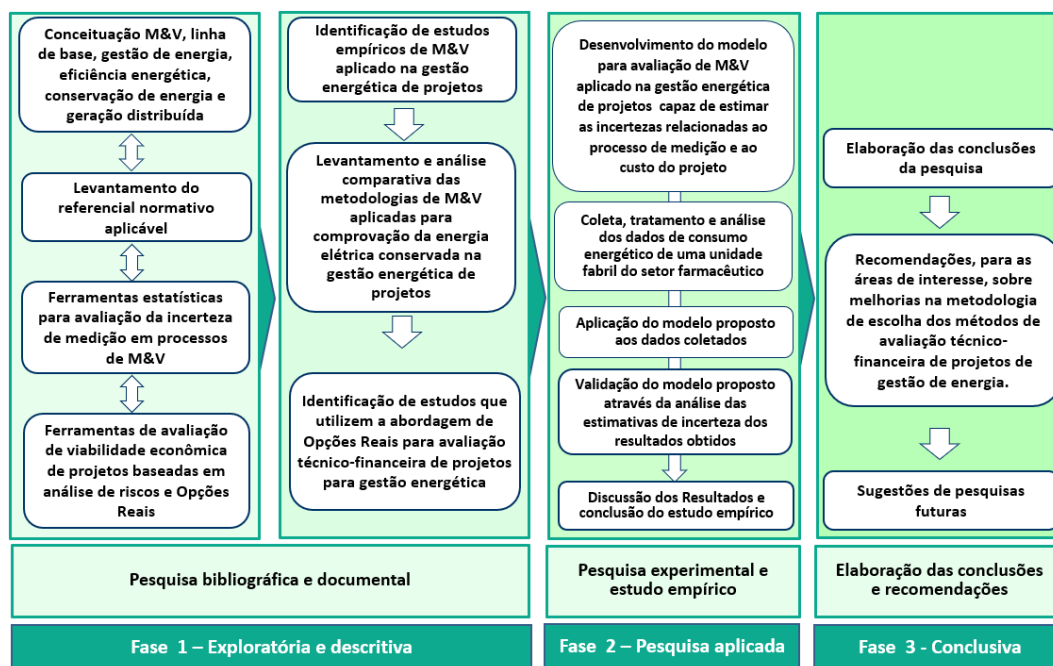


Figura 1.1 - Desenho da pesquisa

Fonte: Elaboração própria.

1.3.1. Fase exploratória e descritiva

A primeira fase se deu através de pesquisas bibliográficas e documentais, que tiveram por objetivo identificar e analisar trabalhos conceituais e documentos de referência para delimitação do tema central da pesquisa - medição e verificação (M&V) para comprovação da energia elétrica conservada em projetos para gestão de energia. Posteriormente, efetuou-se uma revisão bibliográfica mais profunda, a fim de identificar estudos empíricos sobre esse tema, focando em levantar tanto as ferramentas estatísticas para avaliação da incerteza de medição em processos de M&V, quanto as ferramentas de avaliação de viabilidade econômica de projetos baseadas em análise de riscos e Opções Reais. A partir daí identificou-se os estudos empíricos de M&V em projetos para gestão de energia e uma análise comparativa das metodologias de M&V aplicadas para a comprovação da energia elétrica conservada foi realizada. Identificou-se, assim, uma lacuna na literatura sobre a avaliação técnico-financeira de projetos de M&V baseadas em opções reais, tornando possível o desenvolvimento de um modelo conceitual para avaliação de projetos de eficiência energética capaz de modelar as incertezas relacionadas ao processo de medição e ao custo do projeto.

A figura 1.2 apresenta a visão geral e esquemática dos resultados desta primeira fase:

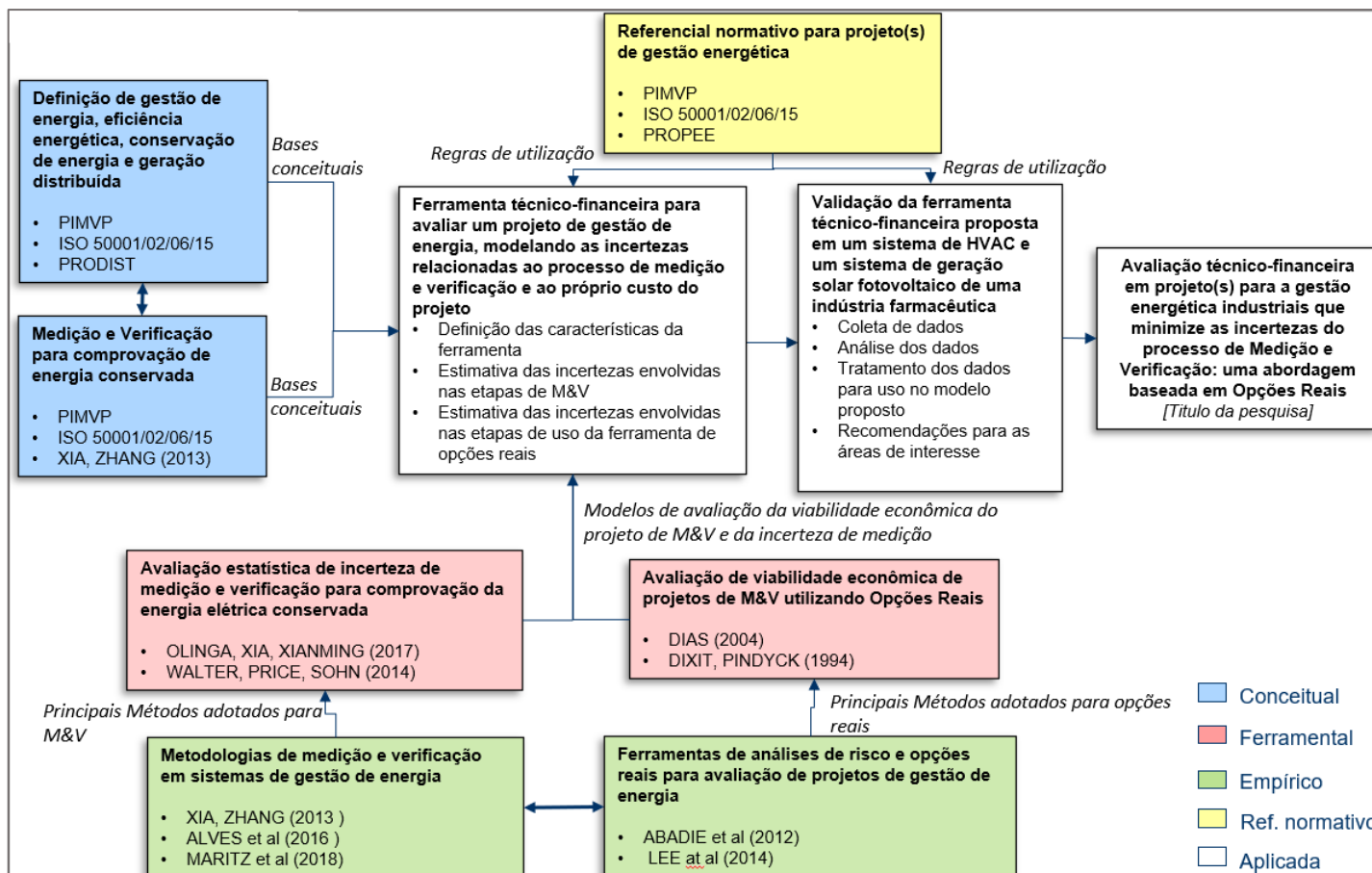


Figura 1.2 - Mapa conceitual da pesquisa

Fonte: Elaboração própria

1.3.2.

Fase de pesquisa aplicada

A partir do exposto no item 1.3.1, a fase aplicada foi desenvolvida através da validação do modelo proposto por meio da aplicação dos estudos empíricos, em um projeto de gestão de energia de uma indústria farmacêutica, nas ferramentas de avaliação de incerteza de medição e viabilidade econômica selecionadas.

1.3.3.

Fase conclusiva

Na terceira fase, elaboraram-se as conclusões da pesquisa com base nos objetivos geral e específicos enunciados no item 1.2. Além disso, um conjunto de recomendações aos diversos atores interessados sobre melhorias na metodologia de escolha dos métodos de avaliação técnico-financeira de projetos para gestão de energia.

1.4.

Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se estruturado em cinco capítulos, incluindo esta introdução.

O capítulo 2 trata dos métodos existentes para M&V aplicados em projetos para gestão de energia, trazendo os conceitos básicos necessários ao entendimento do assunto, bem como a base normativa na qual a pesquisa se pautará, através de explicações sucintas de tais referenciais normativos e teóricos. Ademais, esse capítulo faz menção às ferramentas estatísticas para definição de linha de base a avaliação da incerteza de medição.

No capítulo 3, são apresentadas as ferramentas existentes atualmente para avaliação da viabilidade econômica de projetos para a gestão de energia, trazendo a abordagem da Teoria das Opções Reais.

O capítulo 4 apresenta o embasamento teórico que fundamentou a proposição de uma ferramenta técnico-financeira para avaliação de projetos para a gestão de

energia, bem como suas características. Apresentam-se, também, as avaliações das incertezas envolvidas tanto para os modelos de M&V, quanto para as ferramentas baseadas em opções reais e a avaliação dessas incertezas, que é demonstrada para embasar a última seção desse capítulo. Por fim, será proposta, neste capítulo, uma ferramenta técnico-financeira para avaliar projetos para gestão de energia, modelando as incertezas relacionadas ao processo de Medição e Verificação e ao investimento do projeto.

No capítulo 5, inicialmente abordam-se as informações referentes aos dados escolhidos para serem utilizados na validação da ferramenta proposta. Nas seções desse capítulo, são feitas as análises dos dados de consumo de energia de um sistema AVAC pós implementação de medidas de eficiência energética e da projeção de geração de energia solar fotovoltaica e a validação do modelo elaborado no capítulo anterior. Na última seção, é feita uma discussão dos resultados encontrados.

No capítulo 6, apresentam-se as conclusões da pesquisa, demonstrando a aplicabilidade da ferramenta para avaliação técnico-financeira de projetos para gestão de energia e as recomendações para ESCOs, fabricantes de equipamentos, normas, protocolos e programas de eficiência energética governamentais sobre a ferramenta proposta. Além disso, esta seção traz as recomendações para estudos futuros.

2

Métodos de M&V aplicados em projetos para a gestão energética

Uma Empresa de Serviços de Conservação de Energia (ESCO) ao se deparar com um cliente em potencial e terá que convencê-lo dos ganhos energéticos e econômicos que ele terá após a implementação dos projetos propostos. Com um projeto para a gestão energética implementado e finalizado, a comprovação da economia será fundamental para garantir a credibilidade quanto aos serviços realizados e também a certeza para o cliente de retorno do investimento realizado para o projeto de gestão de energia. Uma das maneiras de se mensurar a redução dos gastos é calcular a diferença entre o consumo energético medido após a realização de uma ação de eficiência energética (AEE), comparando-o com o período anterior, para então se estimar os ganhos com tal projeto. Todavia, diversas complicações podem surgir em detrimento da dificuldade durante a obtenção dos dados para análise, já que nem sempre os dados necessários para se estimar a redução do consumo dependem de dados secundários que nem sempre estão disponíveis, como por exemplo as condições climáticas, a ocupação do ambiente e a utilização dos equipamentos. Além disso, devido ao fato que essas condições dificilmente são constantes, é necessária a compensação das diferenças entre as condições através de ajustes e correções dos cálculos (Willson 1998).

O consumo de energia não é fixo, por isso é de extrema importância determinar o padrão de comportamento do consumo separando as cargas que são constantes das que são variáveis (cíclicas e aleatórias) e identificar os fatores que influenciam na variação do consumo. A partir dessa identificação do perfil de consumo, deve-se associar os erros e correções envolvidas no processo e determinar qual o período a ser analisado de forma que ele seja o mais representativo possível para a análise do gasto energético (Willson 1998; Sonderegger 1998; Haberl *et al.* 1998).

Um modelo para a determinação das economias de energia deve ter como foco definir as variáveis-chave que impactam no consumo de energia de determinado sistema ou equipamento. Com os modelos desenvolvidos é possível usá-los como ferramenta de comparação entre os índices atuais de uso de energia e os valores fornecidos por cada modelo (Haberl *et al.* 1998).

Neste contexto, a utilização dos protocolos de Medição e Verificação (M&V), as normas aplicáveis, as atividades de Comissionamento, Operação e Manutenção (O&M) são de fundamental importância (Heinemeier *et al.* 1996). As próximas seções abordarão os principais guias e normas para a medição e verificação para projetos de gestão de energia.

2.1.

Gestão de energia e Medição e Verificação (M&V)

A implementação de um sistema de gestão de energia tem por objetivo resultar em melhor desempenho de energia. Portanto, a organização deve revisar e avaliar periodicamente seu sistema de gestão de energia a fim de identificar oportunidades de melhoria e sua implementação (ISO 50001, 2011). Essas oportunidades podem estar voltadas tanto para projetos de eficiência energética, quanto para gestão pelo lado da oferta, geração distribuída, por exemplo. A gestão energética tem se tornado cada vez mais necessária, principalmente para as indústrias, por conta dos preços crescentes de energia, pelas regulações ambientais e também pela preocupação das empresas com a sustentabilidade (Bunse *et al.*, 2011).

Projetos que visam a melhoria da gestão energética devem envolver diversos departamentos para possibilitar a avaliação multidisciplinar de todo o processo produtivo (Johansson e Thollander, 2018). Dessa forma é possível, inclusive, traçar objetivos com vistas a se obter processos com maior eficiência energética e/ou mais sustentáveis. As ações de eficiência energética (AEEs) são todas as atividades, conjuntos de atividades ou iniciativas criadas para promover o melhor uso da energia em instalações, equipamentos e sistemas (PIMVP, 2012), e elas podem ocorrer de diversas formas e em diferentes escalas dependendo de onde serão aplicadas, uma residência, um comércio, um escritório, uma indústria de grande porte etc.

Uma AEE precisa ser planejada e projetada de maneira detalhada para que sua chance de sucesso aumente. Um projeto de eficiência energética contempla desde a etapa de planejamento da AEE até sua implementação e monitoramento da eficácia. Esses projetos precisam de parâmetros em que se basear para determinar se seus objetivos estão sendo alcançados, para tal independente da forma de energia em questão no projeto de EE (combustível, eletricidade, água, etc.) precisa-se de um período de medições do consumo antes da implementação da AEE para servir como ponto de referência nas análises pós AEE, há esse período chama-se linha de base.

A seleção cuidadosa do período de tempo a ser utilizado como o período da linha de base e o período de determinação da economia é fundamental.

A linha de base deve ser escolhida de forma a representar da melhor forma possível o comportamento de consumo seja da instalação ou do equipamento que está sob avaliação. Para isso deve-se levar em consideração todos os fatores sazonais e peculiaridades do objeto em avaliação que possam afetar o consumo.

O período de determinação da economia dever ser adotado de maneira a garantir a confiabilidade dos resultados obtidos através de escolhas consistentes dos períodos de tempo adotados, pois a partir daí é possível a avaliação da conservação de energia.

A determinação da energia conservada é realizada por meio da comparação do consumo medido antes e o consumo medido posteriormente à implementação de uma ação de eficiência energética, e realizando ajustes adequados às alterações nas condições de uso. A equação 2.1 demonstra como quantificar a economia:

$$EE = E_{LB} - E_{PD} \quad (2.1)$$

Onde:

EE: Economia de energia;

E_{LB} : Energia ajustada da linha de Base;

E_{PD} : Energia medida no período de determinação.

O gráfico representado na figura 2.1 exemplifica a linha de base, o período de determinação da energia conservada e a linha de base ajustada.

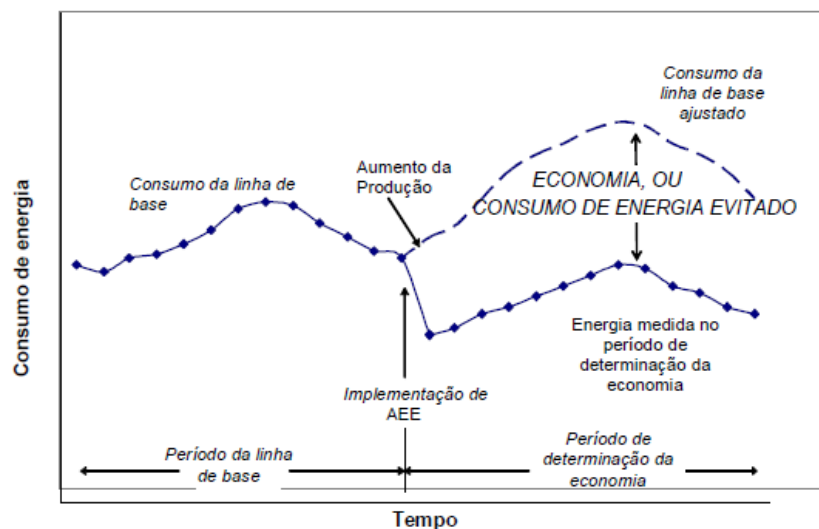


Figura 2.1: Exemplo de histórico de energia
Fonte: PIMVP, 2012.

Outra estratégia considerada na gestão de energia diz respeito às medidas de conservação de energia pelo lado da oferta. Neste caso, a geração distribuída surge como uma das opções mais atrativas economicamente.

A geração distribuída é representada por centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas ou não pelo Operador Nacional do Sistema (PRODIST, 2016). Porém, segundo Khetrapal (2020), as definições para o termo “geração distribuída” podem variar de acordo com o país e a categoria em que as plantas de geração estão inseridas.

O crescimento da concorrência no mercado de eletricidade, o desenvolvimento de tecnologias de geração de eletricidade renovável (energia solar, por exemplo), as preocupações com o envelhecimento da infraestrutura e as restrições de capacidade têm estimulado uma participação crescente de tecnologias de geração distribuída em sistemas de energia para resolver essas questões-chave (Carley, 2009).

É inegável a busca por construções, sistemas e equipamentos mais eficientes e capazes de fazer um melhor uso da energia. Muitas destas tecnologias mais eficientes são conectadas, provocando um processo de digitalização da rede elétrica. Assim, nas últimas décadas, a utilização das redes inteligentes tem crescido de forma substancial nos países mais desenvolvidos e cada vez mais o emprego de

medidores e soluções inteligentes também tem alcançado melhores níveis de desenvolvimento, podendo contribuir com uma melhor gestão energética. Por exemplo, Granderson e Fernandes (2017) afirmam que em 2015 havia cerca de 64 milhões de medidores inteligentes ligados nos Estados Unidos. De acordo com os dados da *U. S. Energy Information Administration* (EIA) divulgados em 2020 o uso desses medidores, em 2019, alcançou o patamar de 95 milhões de unidades aproximadamente como mostra a tabela 2.1.

Tabela 2.1: Quantitativo de medidores inteligentes nos EUA em 2019

| Residencial | Comercial | Industrial | Transportes | Total |
|-------------|------------|------------|-------------|------------|
| 83.539.594 | 10.850.886 | 446.871 | 1.504 | 94.838.855 |

Fonte: EIA(2020). Conteúdo traduzido

Uma breve análise dos dados da tabela 2.1 permite a percepção de que até nos países desenvolvidos e com alto poder industrial o uso dos medidores inteligentes ainda ocupa uma parcela pequena do mercado. Esses medidores vêm avançando e se desenvolvendo tecnologicamente de forma muito rápida e com o aumento da disponibilidade de dados, aumenta também a oferta por soluções de análise de energia que trazem a Medição e Verificação embarcada, tornando um processo automatizado.

A M&V é utilizada para determinar a economia real de energia dentro de um projeto de gestão energética (PIMVP, 2012). A M&V automatizada (M&V 2.0) está presente em diversos dispositivos e tem ganhado espaço, pois consegue melhorar os tratamentos dos dados diminuindo o tempo de aquisição destes para tornar as análises mais robustas e com uma resolução maior (Granderson e Fernandes, 2017).

A medição e verificação não é uma ciência exata, porque sempre há uma incerteza associada ao modelo da linha de base, por isso o foco da M&V é quantificar a economia de energia de maneira transparente, confiável, com a menor incerteza possível e a máxima confiabilidade (Gallagher *et al.*, 2019), por isso ela é um componente crítico na gestão energética podendo aumentar os níveis de economia (Backlund *et al.*, 2012). Os modelos estatísticos de regressão linear são os mais utilizados na modelagem da linha de base em que a energia pré-retrofit y é correlacionada com um conjunto de variáveis independentes $x = (x^1, \dots, x^d)$, onde d

é o número de variáveis independentes, podendo ser representada matematicamente pelo conjunto $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, de tal forma que:

$$y_i = f(x_i) + \varepsilon_i, \varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2) \quad (2.2)$$

Sendo x_i as variáveis de entrada, ε_i o ruído com média zero e variância σ_ε^2 e o modelo da linha de base consiste em aproximar $f(x)$ com um conjunto de observações $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$ (Touzani *et al*, 2019). Esses modelos devem receber dados periódicos que permitam a investigação da energia conservada, porém se a frequência de aquisição de dados for muito elevada, o volume de dados será grande, então os avanços tecnológicos ao trazer a automação para a M&V permite quase que em tempo real a análise da energia economizada.

Granderson e Fernandes, publicaram em 2017 um estudo analisando 16 dispositivos automatizados levantando características e informações baseadas em artigos sobre o tema, nos princípios de M&V previstos no PIMVP e nos atributos de interesse de alguns representantes do setor industrial. Para essas 16 soluções foram avaliados alguns fatores a fim de compará-los, pois muitos desses dispositivos apresentam mais de uma função e podem ser voltados para diversos tipos de setores, além de utilizar abordagens diferentes de M&V, de formação da linha de base, de aquisição de dados e de fornecimento das métricas estatísticas relacionadas à linha de base (LB).

Ao longo do trabalho Granderson e Fernandes (2017) realizam uma série de comparações entre as tecnologias escolhidas para teste demonstrando os avanços existentes se comparados com o que fora publicado por Kramer *et al*. (2013) e concluem que o atual estado dos dispositivos automatizados disponíveis revela uma ampla diversidade de soluções, que podem ser empregadas em diferentes setores com diferentes públicos alvos, mas que o setor comercial ainda é o maior alvo dessas novas tecnologias, mesmo com a maioria esmagadora de medidores inteligentes no setor residencial. Granderson e Fernandes (2017) colocam ainda que os fabricantes desses dispositivos passaram a colocar a M&V como elemento principal em seus projetos, aumentando a capacidade de aquisição de dados a fim de torna-los mais próximos da realidade (diminuindo os erros e incertezas), o que é ótimo para um gerente de projetos responsável pela análise dos dados de eficiência.

O interesse pela medição e verificação tem crescido de forma substancial ainda mais quando se leva para o lado econômico-financeiro da questão, por isso a busca por novas formas de modelagem cresce a cada dia (Gallagher *et al.*, 2019; Gallagher *et al.*, 2018; Ahmad *et al.*, 2017; Araya *et al.*, 2017; Burkhart *et al.*, 2014; Heo e Zavala, 2012) visando melhorar os processos, tornando-os mais dinâmicos e confiáveis. Com isso é notável a importância da M&V para os projetos para gestão de energia e os atuais avanços das tecnologias empregadas para este processo são necessários e requerem pesquisas aprofundadas.

2.2.

Referenciais normativos e protocolos para Medição e Verificação

As subseções a seguir apresentarão os guias e as normas relacionados à M&V.

2.2.1.

Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP)

O PIMVP foi elaborado pela *Efficiency Valuation Organization* (EVO – Organização de Avaliação de Eficiência) e é um dos principais documentos de referência para padronização dos métodos de avaliação para quantificar os resultados de investimentos em projetos para gestão de energia.

O entendimento sobre os princípios do PIMVP e as abordagens que ele traz para se estabelecer o processo de M&V são pontos importantes para o entendimento da utilização do protocolo. Nas subseções que se seguem, cada um destes pontos será apresentado.

2.2.1.1.

Princípios fundamentais do PIMVP

O protocolo é organizado em três volumes, o primeiro trata dos métodos para Medição e Verificação, o segundo volume aborda os assuntos relacionados à avaliação de aspectos referentes à qualidade do ambiente interno de edifícios, relacionados com concepção de AEE, implementação e manutenção e, por fim, o terceiro capítulo fornece detalhes sobre dos métodos de M&V associados à

construção de novos edifícios e a sistemas de energia renovável integrados às instalações existentes (PIMVP, 2012). Este trabalho tem como foco referência majoritária o volume um relativo aos métodos de M&V para avaliação da performance.

De acordo com o PIMVP, os princípios fundamentais que garantem a boa prática para M&V são:

- **Completude:** os relatórios de economia de energia devem ser os mais completos possíveis, levando-se em consideração não só as medições provenientes dos métodos de M&V, mas também os parâmetros estimados através dessas medições.
- **Conservadorismo:** a quantidade de energia conservada deve sempre ser estimada para o mínimo a ser conservado.
- **Consistência:** os relatórios da eficiência energética devem, independentemente do tipo, período ou profissional a realizar, fornecer dados que permitam ser analisados de forma efetiva, não precisam ser idênticos, mas trazer informações chave para as tomadas de decisão.
- **Precisão:** apesar dos custos com M&V precisarem tomar a menor porcentagem possível dos ganhos com a economia avaliada, os valores fornecidos pelas medições devem ser os mais precisos possível.
- **Relevância:** deve-se levantar os parâmetros críticos para a medição da economia e monitorá-los; quanto aos não críticos, pode-se estimá-los.
- **Transparência:** todos os passos do processo de Medição e Verificação devem ser declarados e divulgados para todas as partes envolvidas de forma clara e objetiva.

Com base nesses princípios, a EVO estabelece no primeiro volume do PIMVP métodos para implementação no processo de Medição e Verificação, sendo cada um pensado para situações específicas. A seção a seguir traz as características de cada um desses métodos.

2.2.1.2.

Opções de métodos para M&V

O protocolo define basicamente quatro opções de medição e verificação que podem ser utilizadas para determinar a economia (A, B, C e D) de energia em projetos de eficiência energética, caracterizando-os para diferentes aplicações. O quadro 1 foi retirado do volume I do PIMVP e apresenta o panorama geral de cada uma das quatro opções:

Quadro 2.1: Visão geral das opções de M&V

| Opção do PIMVP | Como calcular a economia | Aplicações típicas |
|--|---|---|
| A. Medição Isolada da AEE: Medição dos parâmetros-chave São definidos parâmetros críticos medidos em campo para o uso de energia dos sistemas afetados pela AEE, e/ou o sucesso do projeto. O período de monitoramento oscila de acordo com variação do parâmetro a ser monitorado e os parâmetros menos críticos podem ser estimados. | Cálculos de engenharia dos consumos nos períodos antes e após as medidas de eficiência energética com base nas medições e valores estimados | Retrofit do sistema iluminação |
| B. Medição isolada da AEE: Medição de todos os parâmetros Todos os parâmetros críticos que afetam a AEE devem ser medidos e a frequência de monitoramento varia de acordo com o comportamento de cada um dos parâmetros | Cálculos de engenharia dos consumos nos períodos antes e após as medidas de eficiência energética com base nas medições. | Utilização de inversores de frequência nos motoventiladores de um sistema AVAC |
| C. Toda a Instalação A economia é determinada pela medição do consumo de energia em nível de toda a instalação ou sub instalação. | Análise dos dados do medidor da linha de base de toda a instalação e do período de determinação da economia. Ajustes de rotina como exigido, usando técnicas tais como uma simples comparação ou análise de regressão. Ajustes não-de-rotina como exigido. | Medição do consumo de energia com os medidores de gás e eletricidade das concessionárias para um período da linha de base de doze meses e durante o período de determinação da economia. |
| D. Simulação calibrada A economia é determinada através da simulação do consumo de energia de toda a instalação, ou de uma subinstalação. Rotinas de simulação demonstram modelar adequadamente o desempenho energético real medido na instalação. Esta opção requer habitualmente competências consideráveis em simulação calibrada. | Simulação do consumo de energia, calibrada com dados de faturamento por hora ou mensal da concessionária (medidores de consumo de energia final podem ser usados para ajudar a refinar dados de entrada). | Programa de gestão de energia multifacetado, afetando muitos sistemas em uma instalação, onde não existia nenhum medidor no período da linha de base. Consumo de energia da linha de base, determinado com utilização da simulação calibrada, é comparado à simulação do consumo de energia do período de determinação da economia. |

Fonte: Retirado e adaptado do PIMVP, 2012

Além do PIMVP, existem outros guias que orientam sobre M&V. O Guia 14 da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE) também apresenta diretrizes para a Medição e Verificação, sendo tratado mundialmente como referência, assim como o PIMVP. A subseção a seguir irá apresentar o Guia 14 da ASHRAE.

2.2.2.

Measurement of Energy and Demand Savings – ASHRAE 14

A ASHRAE, sigla em inglês que significa Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado foi fundada em 1959 e é uma das maiores referências quando se trata de sistemas de aquecimento, refrigeração, ar condicionado, boas práticas de engenharia e eficiência energética. Ela fornece diversos guias para a comunidade de engenharia e tecnologia e o guia 14 da ASHRAE trata da medição de energia e demandas de economia estabelecendo requisitos mínimos para garantir um desempenho aceitável em medições de energia e cálculos de demandas de economia.

O guia 14 pode ser aplicado em prédios residenciais, comerciais e indústrias, fornecendo métodos de medição pré e pós-retrofit para quantificar os parâmetros de faturamento usados nos cálculos de pagamento do consumo energético e de demandas de economia para as empresas de utilidades e serviços. Esse guia tem abordagens semelhantes ao PIMVP.

Como a economia de energia não pode ser medida, é necessário que seja calculada e isso requer a projeção da linha de base criada com os dados do período anterior a implementação da AEE para ser subtraída dos valores medidos de consumo após a finalização da AEE, assim como foi demonstrado na figura 2.1.

O guia tem como objetivo fornecer as diretrizes para a elaboração de projetos de eficiência energética através da gestão dos fatores críticos para as quantificações necessárias na determinação da energia economizada. O documento ainda traz informações para atribuição dos valores de incerteza nas estimativas de

economia de energia de forma a possibilitar uma avaliação mais realista sobre a viabilidade dos investimentos.

Assim como o PIMVP, o Guia 14 da ASHRAE também fornece alguns métodos para M&V em projetos de eficiência energética, abordagem para toda a instalação, abordagem para instalação reformada e simulação calibrada para toda a instalação.

2.2.2.1.

Determinando a economia de energia pelo Guia 14 ASHRAE

O ponto inicial para se estimar a quantidade de energia economizada após a implementação das ações de eficiência energética é a escolha das variáveis independentes que influenciam o consumo.

As variáveis independentes devem ser analisadas e monitoradas durante todo o período de interesse (período de verificação) para serem utilizadas nos cálculos da redução de consumo. O Guia 14 ASHRAE fornece alguns exemplos de variáveis independentes para instalações residenciais, comerciais e industriais, que são a ocupação e o número de produtos fabricados em uma instalação industrial. Além disso, as variáveis que não são afetadas pelas AEEs, mas que podem influenciar no consumo energético também devem ser medidas e suas incertezas devem ser consideradas.

Após a escolha das variáveis, se faz necessária a escolha do período a ser utilizado estimar curva de linha de base. O guia indica que os períodos mais próximos à implementação das AEE são os mais favoráveis, desde que esses períodos sejam representativos em relação às operações pós-retrofit, um outro ponto trazido pelo guia é que períodos mais próximos são mais fáceis de serem recordados pelas equipes de operação.

Os períodos a serem escolhidos devem conter todos os fatores que afetem às medições e o consumo, como por exemplo os fatores sazonais e taxa de ocupação, pois a inclusão desses fatores permite que a incerteza associada ao processo de medição seja menor. Todos os detalhes e considerações adotados para criação da linha de base devem ser registrados e documentados para que ajustes

futuros sejam possíveis para comparação com as eventuais mudanças de rotina pós-retrofit.

O tempo de duração do período de medição após a implementação das AEE deve ser suficiente para englobar todos os modos de operação dos sistemas que sofreram retrofit, garantir a coleta total das variáveis esperadas para o período pós-retrofit e fornecer confiabilidade na avaliação e reporte das quantias de energia economizada.

Deve-se ter cuidado redobrado na seleção dos equipamentos de medição que serão utilizados para o monitoramento das variáveis, levando-se em conta seus dados de erro e incerteza de medição presentes no certificado de calibração dos mesmos.

A partir de todas as estratégias definidas, torna-se possível determinar a economia de energia por meio da diferença entre as medições de consumo pós-retrofit e da projeção da linha de base criada com os dados pré-retrofit. O guia ainda fornece diversos mecanismos para calcular essa diferença, além de prover as fórmulas para o cálculo da incerteza relacionada aos valores encontrados, alguns deles serão utilizados nesse trabalho.

Assim como os guias, existem Normas ISO que trazem diretrizes para a gestão de energia, são as Normas da família 50000.

2.2.3.

Normas ISO: família 50000

A *International Organization for Standardization* – ISO publicou em 2011 a primeira norma do que viria a ser a família ISO 50000, a publicação foi feita pelo comitê técnico 242, que era gerenciado pela *American National Standards Institute* (ANSI) em conjunto com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e nos anos subsequentes a família 50000 foi crescendo. A primeira versão da ISO 50001 foi publicada pelo projeto comitê 242 – Gerenciamento de Energia – em 2011 e trata do Sistema de Gestão de Energia – Requisitos com orientações para uso. Essa norma segue o mesmo princípio da norma ISO 9001 de processo de melhoria contínua e estabelece as diretrizes para que quaisquer organizações, independentemente do tamanho, possam desenvolver e implementar uma política

de gestão de energia com objetivos definidos, metas e planos de ação para monitorar e avaliar o uso eficiente da energia, bem como promover a melhoria do sistema existente.

As normas NBR ISO publicadas são:

- NBR ISO 50002:2014 - Diagnósticos energéticos - Requisitos com orientação para uso;
- NBR ISO 50003:2016 - Sistemas de gestão de energia - Requisitos para organismos de auditoria e certificação de sistemas de gestão de energia;
- NBR ISO 50004:2021 - Sistema de gestão da energia - Guia para implementação, manutenção e melhoria do sistema de gestão da energia da ABNT NBR ISO 50001;
- NBR ISO 50006:2016 - Sistemas de gestão de energia - Medição do desempenho energético utilizando linhas de base energética (LBE) e indicadores de desempenho energético (IDE) - Princípios gerais e orientações; e
- ISO 50015:2014 - Sistemas de gestão da energia – Medição e verificação da performance energética das organizações – Princípios gerais e orientações.

Das normas publicadas apenas a ISO 50015 ainda não possui tradução para o português.

Em 2016 foi criado o Comitê técnico 301 – *Energy management and energy savings* e absorveu a responsabilidade de manter a família 50000 e publicar os novos documentos. Atualmente a ISO 50000 está bem mais robusta contando, além das normas já citadas, com:

- ISO 50047:2016 - *Energy savings -- Determination of energy savings in organizations*;
- ISO 5007:2017 - *Energy services -- Guidelines for the assessment and improvement of the energy service to users*;
- ISO 5008:2018 - *Energy management and energy savings -- Building energy data management for energy performance -- Guidance for a systemic data exchange approach*;

- ISO 50021:2019 - *Energy management and energy savings -- General guidelines for selecting energy savings evaluators*;
- ISO 50045:2019 – *Technical guidelines for the evaluation of energy savings of thermal power plants*;
- ISO 50046:2019 - *General methods for predicting energy savings*.

A NBR ISO 50006:2016 e a ISO 50015:2014 estão ligadas diretamente ao tema deste trabalho. A 50006 fornece as diretrizes às organizações de como criar, implementar e manter os indicadores de desempenho energético (IDE) e a linha de base energética (LBE).

A partir da criação de um projeto de eficiência energética os IDE devem ser pensados para serem implementados ao longo da existência do projeto, esses indicadores fortalecem o sistema de gestão de energia (SGE) e dão subsidio para tomadas de decisão. A figura 2.2 exemplifica a relação entre IDE e a linha de base.

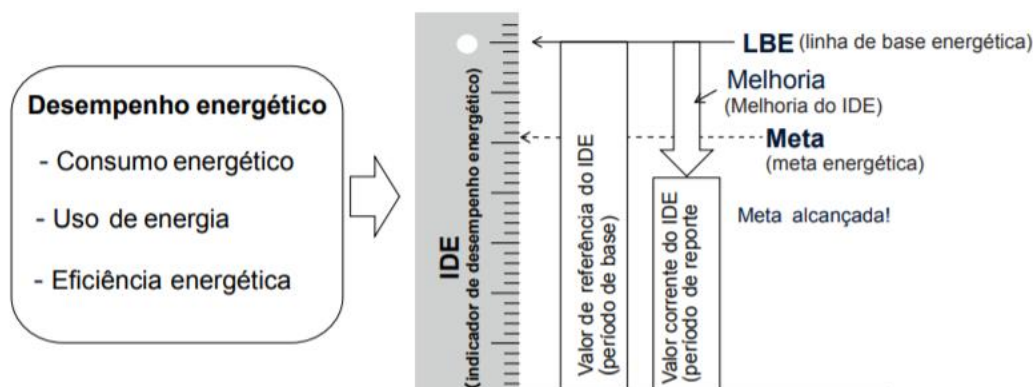


Figura 2.2: IDE, LBE e metas
Fonte: Adaptado da NBR ISO 50006:2014

A norma fala de forma genérica como deve ser o processo de melhoria contínua do SGE, por isso é aconselhável o uso da norma somado a outros documentos existentes na literatura que deem base para uma atuação mais eficaz nas implementações do sistema de gestão. A eficiência energética é uma métrica frequentemente utilizada para se medir desempenho energético e pode ser utilizada como um IDE (ISO 50006:2014), por isso a importância dos guias e protocolos como o PIMVP e o guia 14 ASHRAE, pois o uso deles em conjunto com as diretrizes normativas formam a base teórica principal para os projetos de eficiência energética e sistemas de gestão de energia.

A ISO 50015:2014 estabelece os princípios gerais e as diretrizes para o processo de medição e verificação da performance energética de instalações, equipamentos e sistemas. Os princípios expostos na norma devem nortear todo e qualquer processo de M&V, são eles:

- Exatidão apropriada e gerenciamento da incerteza – as incertezas e exatidões devem ser bem estabelecidas e declaradas ao cliente;
- Transparência e reprodutibilidade do processo de M&V – todos os passos do processo devem ser documentados, garantindo a rastreabilidade das informações e a reprodutibilidade das etapas;
- Gerenciamento de dados e planejamento das medições – deve haver documentos que informem como os dados serão colhidos e gerenciados;
- Definição de responsabilidades – deve ser definido o responsável pelo processo de M&V;
- Imparcialidade – os dados devem ser tratados de forma imparcial, bem como os reportes para garantir a confiabilidade das informações e do processo;
- Confidencialidade – o responsável pela M&V deve ter acesso às informações confidenciais necessárias para o processo de M&V, caso não seja possível, ele deve incluir as limitações no plano de M&V;
- Usar métodos apropriados – os métodos utilizados, assim como os cálculos devem seguir as boas práticas estabelecidas nos protocolos.

A ISO 50015 ainda fornece as diretrizes do que se deve ter desde o plano de M&V até as fontes de incertezas que podem ser consideradas na hora de se avaliar a incerteza do modelo da linha de base. A figura 2.3 mostra uma visão geral do processo para implementação da M&V

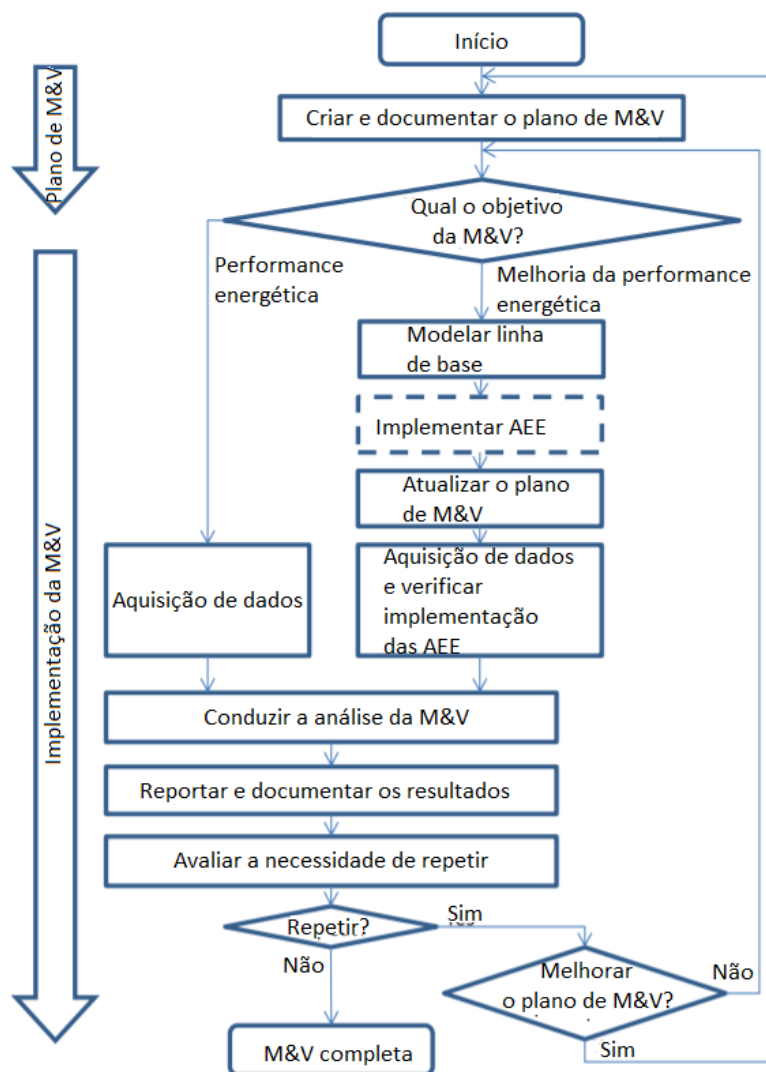


Figura 2.3: Esquema de implementação de M&V
 Fonte: Adaptado da NBR ISO 50015:2014. Tradução própria.

O conhecimento dos conceitos e abordagens para a implementação do processo de M&V em projetos para gestão de energia é fundamental para a aplicação correta da M&V. A seção a seguir trará um levantamento de aplicações do processo de M&V em projetos para a gestão de energia.

2.3.

Aplicação de M&V em projetos para a gestão de energia

O processo de Medição e Verificação pode ser empregado de diversas formas e em diversas situações distintas dentro de um projeto para gestão de energia seguindo as abordagens apresentadas nas seções anteriores. Contudo devido às características desse trabalho e ao fato da aplicação que será apresentada no capítulo 5 utilizar como estudo de caso um projeto para gestão de energia em uma indústria

farmacêutica, foram escolhidas duas vertentes para a gestão de energia, uma pelo lado da demanda, considerando o consumo do sistema AVAC da fábrica e outra pelo lado da oferta, levando-se em consideração a implementação de um parque de minigeração com fonte solar fotovoltaica. As subseções a seguir apresentam levantamento bibliográfico sobre aplicações de M&V tanto para projetos de eficiência energética em sistemas AVAC, quanto para aplicações em projetos de GD.

2.3.1. Aplicação de M&V em projetos de eficiência energética de sistemas AVAC

As aplicações de M&V em projetos de eficiência energética são fruto de diversas pesquisas e publicações em vários artigos trazendo sempre as inovações no emprego das metodologias de M&V. Porém, em sua grande maioria, as aplicações destas metodologias são feitas considerando as instalações inteiras, englobando todos os sistemas (Pan, Huang e Wu, 2007; Ganderson *et al.*, 2016; Xia e Zhang, 2013).

A fim de encontrar aplicações diretas de M&V para modelar sistemas de AVAC foi realizada uma busca nas bases de dados *SCOPUS* e *GOOGLE SCHOLAR* com o cruzamento de palavras “*measurement and verification*” AND “*HVAC*” OR “*HEATING, VENTILATION AND AIR CONDITIONING*” AND “*energy efficiency*” o resultado obtido foi de 21 documentos, desses 13 citavam *HVAC*, porém apenas 6 tratavam especificamente de M&V aplicada em sistemas de *HVAC*. Os seis artigos encontrados estão dispostos junto com a sua metodologia no quadro 2.2.

Quadro 2.2: Artigos sobre M&V em sistemas AVAC e suas metodologias

| AUTOR | OBJETIVO | METODOLOGIA |
|------------------------------------|--|---|
| Ginestet, Marchio e Morisot (2013) | Fornecer base para unir questões operacionais como análise de falhas e as fases de comissionamento dos sistemas de AVAC com as ferramentas de M&V. | As diferentes características de um sistema de AVAC foram levantadas, para que um plano de comissionamento fosse feito. Com todos os passos do comissionamento definidos, os instrumentos instalados e testados, a aquisição de dados foi realizada para a criação da linha de base, para tal os autores avaliaram as 4 opções de M&V oferecidas pelo PIMVP para demonstrar como se proceder ao utilizar cada uma delas. |
| Lin, Liu e Yang (2015) | Os autores utilizam uma abordagem de Retrofit e otimização orientada para performance total para estudar o desempenho energético e propor ações de eficiência energética em um campus de alta tecnologia na Califórnia, envolvendo AVAC. | Foram levantadas todas as características de forma detalhada dos sistemas de AVAC do campus, a partir daí as AEE foram identificadas e propostas. Planilhas de controle das medidas foram criadas para facilitar durante a fase de M&V. A opção C do PIMVP é utilizada como abordagem para a M&V com vistas a avaliar os períodos pré e pós AEE. |
| Kramer e Vincent (2016) | O artigo descreve o desenvolvimento de um programa de benchmarking, medição e verificação (M&V) de energia para um edifício de um laboratório de pesquisa. O trabalho demonstra, que mesmo utilizando um projeto tradicional de AVAC, com a otimização dos parâmetros consegue-se economia de energia. | Tanto para a linha de base, quanto para o período pós-AEE foram utilizados dados de 12 meses. Foram considerados para o estudo os consumos de energia elétrica e energia térmica avaliando-se períodos com correlação climática e outros com períodos independentes, que foram tratados com regressão linear. Chegou-se a uma equação linear com variáveis dependentes para o tipo de energia pretendida e variáveis independentes para dia, mês, ano, etc., para então se avaliar a quantidade de energia economizada. |
| Ahmad, Mourshed e Rezgui (2017) | Avaliar o desempenho de um modelo de previsão utilizando redes neurais artificiais com um modelo baseado em <i>random forest</i> , ambos sendo usados para prever o consumo de um sistema de AVAC de um hotel. | Foram coletados dados de consumo elétrico de AVAC do sistema supervisorio do Hotel em períodos com 5min de intervalo. Além disso, os dados tanto de ocupação diária, quanto de quartos reservados foram extraídos do sistema de reservas. Os dados das condições ambientais foram coletados em períodos de 30min de uma estação meteorológica próxima ao hotel. Com todos os dados levantados desenvolveu-se o modelo da rede neural e para melhora-la os dados foram normalizados entre 0-1. O <i>random forest</i> foi aplicado aos dados em diferentes níveis e para a avaliação de ambos os métodos foram utilizadas algumas métricas: MAPE, R ² e RMSE. |

Quadro 2.2: Artigos sobre M&V em sistemas AVAC e suas metodologias (continuação)

| AUTOR | OBJETIVO | METODOLOGIA |
|-----------------------------------|---|--|
| Díaz <i>et al.</i> (2018) | Propor uma abordagem, para modelar a linha de base, baseada no conjunto de funções de transferência, validando a proposta num sistema AVAC de um edifício. | <p>Para desenvolvimento do modelo foram considerados dados diários, porém divididos em períodos de operação e não operação, bem como os períodos de aquecimento e resfriamento. Além dos dados de funcionamento e consumo do sistema AVAC, foram levantadas as informações sobre temperatura externa e setpoints de temperatura interna. Com o uso dos dados foram criadas duas funções de transferência: uma para os períodos de operação em que os dados de consumo de AVAC e temperatura externa possuem maior influência e outra para os momentos sem operação em que a temperatura interna provoca maior influência.</p> <p>A partir do modelo desenhado, determinou-se os coeficientes das funções de transferência e a validação do modelo utilizando os dados de consumo do Palacio de la Madraza.</p> |
| Gallagher <i>et al.</i> (2019) | Utilizar o aplicativo IntelliMaV para propor um modelo de M&V automatizada para avaliação da energia conservada, utilizando um estudo de caso em unidades de tratamento de ar de uma indústria biomédica. | A fábrica onde o aplicativo foi utilizado opera 24h por dia, sete dias por semana, com uma parada geral no período do natal. O IntelliMaV foi aplicado acessando o banco de dados da fábrica para capturar os dados de consumo elétrico, dados mecânicos e valores de temperaturas externas para criar através de <i>machine learning</i> a linha de base para então com o uso do modelo proposto pelo aplicativo verificar a enérgica conservada após a adoção das AEE. |

2.3.2.

Aplicação de M&V em projetos de geração de energia renovável

O uso de fontes renováveis para geração de energia é um tema amplamente pesquisado, por isso existem muitos artigos sobre geração de energia renovável. Ao “renewable energy” AND “measurment”, e do uso apenas de “renewable energy” e foram encontrados dezenas de artigos sobre o tema, então uma busca aprofundada em seus *abstracts* foi realizada, o resultado permitiu a conclusão de que o termo *measurement and verification* não é aplicado diretamente para projetos com energia renovável, porém há diversos artigos citando a utilização de medidores inteligentes para monitorar a quantidade de energia gerada pela geração independente e a energia consumida pelo imóvel e inserido nesses medidores a M&V está presente, além disso foram encontrados modelos de previsão da energia a ser gerada, esses resultados estão no quadro 2.3.

Quadro 2.3: Artigos sobre M&V em sistemas de geração de energia renovável e suas metodologias

| AUTOR | OBJETIVO | METODOLOGIA |
|------------------------------------|---|---|
| Barrera <i>et al.</i> (2020) | Apresentar uma ferramenta que ajuda a prever a produção de energia de fontes sustentáveis ao longo do ano para um local específico. | Utilizaram fontes de dados <i>open source</i> , sensores de Internet das Coisas (IoT) e instalações distribuídas pela Europa para criar a ferramenta através da aplicação de Redes Neurais Artificiais. |
| Mishra <i>et al.</i> (2020) | Apresentar um modelo de previsão de energia solar de curto prazo. | Os autores utilizaram transformada de <i>wavelet</i> e <i>deep learning</i> para a criação do modelo e compararam com outros modelos através das medidas estatísticas MAPE, R ² , e RMSE |

O Programa de Eficiência Energética (PEE) visa a promoção do uso eficiente da energia elétrica nos diversos setores da economia, através da gestão de energia, que busquem maximizar os benefícios públicos tanto pelo lado da demanda, quanto pelo lado da oferta, ou seja por meio da demanda evitada, que é o caso dos projetos de GD com fontes renováveis, para isso o PEE indica e aplica os métodos preconizados no PIMVP em seus projetos.

Com a aplicação da M&V nos projetos para gestão de energia, vem a necessidade de avaliar o quão bom está o modelo desenvolvido para a linha de base, logo se faz necessária a avaliação das ferramentas estatísticas. A seção a seguir

abordará das ferramentas estatísticas para o cálculo da incerteza da determinação da energia conservada.

2.4.

Ferramentas estatísticas para calcular a incerteza na determinação da energia conservada

Todo processo de medição possui incertezas associadas e quanto menor elas forem mais confiáveis serão as medições e os valores delas obtidos, para tal se faz necessária a utilização de ferramentas estatísticas para o cálculo das incertezas de medição e também da incerteza da linha de base. Para isso, tanto o PIMVP quanto o guia 14 da ASHRAE, fornecem algumas ferramentas para o cálculo da incerteza para a medição de energia conservada, porém há ainda o Guia para a Expressão De Incerteza de Medição (GUM) publicado em 2008 pelo INMETRO que traz as diretrizes para os cálculos de incerteza de medição. No quadro 2.4 com a descrição das ferramentas estatísticas utilizadas nos três documentos para comparação:

Quadro 2.4: Descrição das ferramentas utilizadas - PIMVP x Guia 14 x GUM

| PIMVP | Guia 14 ASHRAE | GUM |
|---|--|---|
| Utiliza média aritmética, desvio padrão, variância, erro padrão, desvio padrão amostral do total e coeficiente t-STUDENT para calcular a precisão absoluta. | Utiliza a média aritmética e o desvio padrão da amostra para calcular a incerteza da amostra, o coeficiente de variação do desvio padrão, o coeficiente de variação do erro médio quadrático e o erro médio normalizado, para então combinar todas essas fontes de incerteza com o erro relativo dos instrumentos de medição envolvidos no processo e com o coeficiente t-STUDENT para determinar a incerteza combinada. | Separa a incerteza de medição em tipo A – incertezas provenientes dos dados medidos, logo são média, desvio padrão e repetitividade – e tipo B – incertezas provenientes de outras fontes como certificados do padrão utilizado, influência de condições ambientais e etc. – além do coeficiente t-STUDENT para então determinar a incerteza combinada do processo de medição e expandi-la com t-STUDENT. |

Como Xia e Zhang (2013) destacam, o cálculo da economia de energia inclui a comparação da energia real consumida ao consumo de energia sem que a AEE tivesse sido implementada. Contudo a energia consumida como de costume na pós-implementação de uma AEE não é mensurável, portanto, é necessário um modelo de linha de base para prever a energia que teria sido consumido se a medida de conservação de energia não foi instalada.

Existem diversas técnicas de modelagem como, por exemplo, regressão linear (Dalglish e Grobler, 2013), máquinas de vetores de suporte (Dong, Cao e Lee, 2005), modelagem gaussiana (Heo e Zavala, 2012) e redes neurais artificiais (Aydinalp-Koksal e Ugursal, 2008). Para o uso de qualquer uma dessas técnicas a expressão da incerteza associada ao processo é de extrema importância, por isso deve-se considerá-la sempre a fim de tornar mais confiáveis os resultados apresentados. O Guia 14 ASHRAE fornece uma base robusta sobre as ferramentas estatísticas e todo o procedimento para calcular as incertezas, incluindo modelos específicos para cada tipo de grandeza medida, enquanto os outros documentos do quadro 4 apresentam de forma mais genérica o processo de expressão da incerteza, além disso o Guia 14 inclui em suas fontes de cálculo as expressões indicadas pelo GUM.

2.4.1. Métricas estatísticas

As métricas utilizadas na expressão da incerteza de medição do processo de M&V são muito bem definidas no guia 14 da ASHRAE como pôde ser visto e são amplamente utilizadas, por isso a seguir serão listadas junto com sua respectiva fórmula:

- *CV (RMSE)* – coeficiente de variação da raiz do erro médio quadrático. Mede a variância dos erros entre os valores medidos e os simulados, o *CV(RMSE)* indica a capacidade do modelo prever de forma geral a o perfil da carga demonstrada nos dados.

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n-p}} * 100(\%) \quad (2.3)$$

Onde: m_i = valor medido; s_i = valor simulado; n = número de pontos; p = número de parâmetros ajustáveis do modelo; \bar{m} = média dos valores medidos.

O valor de p para calibração do modelo é sugerido pelo guia como zero.

- R^2 - coeficiente de determinação. Indica quanto os valores simulados estão próximos da reta de regressão dos valores medidos. O R^2 pode assumir valores entre 0 e 1, mas os protocolos e guias recomendam para modelos calibrados um valor mínimo de 0,75.

$$R^2 = \left(\frac{n \sum_{i=1}^n (m_i * S_i) - \sum_{i=1}^n (m_i) * \sum_{i=1}^n (S_i)}{\sqrt{\left(n \sum_{i=1}^n m_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n m_i \right)^2 \right) * \left(n \sum_{i=1}^n S_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n S_i \right)^2 \right)}} \right) \quad (2.4)$$

Essas são as métricas indicadas pelo guia 14 ASHRAE mais utilizadas.

2.5.

Considerações sobre o capítulo

Nota-se ao longo deste capítulo que o planejamento e a escolha das abordagens de medição pode influenciar o método de modelagem da linha de base e que a escolha das ferramentas estatísticas para expressão da incerteza de medição influenciam diretamente na qualidade dos resultados apresentados em um plano de M&V.

Observava-se também que há o uso do termo precisão no PIMVP, porém do ponto de vista metrológico esse termo não deve ser utilizado com a finalidade pretendida, devendo ser substituído pelo termo exatidão de acordo com as definições estabelecidas no Vocabulário Internacional de Metrologia. Ao se analisar a versão em inglês do protocolo observa-se que o termo utilizado é “*accuracy*” o que faz sentido para a língua, logo o uso do termo precisão na versão em português pode ocorrer por um equívoco de tradução.

Para sistemas de AVAC geralmente são levados em consideração como variáveis a temperatura do ambiente externo e o nível de ocupação do local refrigerado e esses dados são analisados geralmente em frequência mensal.

Em projetos de geração com energia renovável não são aplicados os termos de M&V, porém os medidores inteligentes carregam em si a medição & verificação levando o conceito para os projetos de forma indireta, e esses medidores são parte importante do processo, pois através deles que é possível determinar a energia gerada e o quanto uma instalação está economizando ao deixar de consumir energia da concessionária.

3

Análise de investimento de projetos para gestão de energia

A demanda pela implementação de projetos para a gestão energética vem crescendo, mas esses projetos apresentam, em grande parte, altos investimentos e retornos incertos, por isso esse setor tem grande necessidade de conhecer e utilizar metodologias de análise de investimentos, visando desenvolver projetos economicamente atraentes.

A Teoria das Opções Reais surge para complementar os métodos mais tradicionais de análise de investimentos como, por exemplo, o Fluxo de Caixa Descontado (FCD), principalmente para decisões com horizontes de mais de um período. Isso se dá porque a análise de Opções Reais leva em conta o valor da flexibilidade, algo que os métodos tradicionais não são capazes de considerar (Dias, 2014). A flexibilidade em investir em projetos de gestão de energia tem valor, uma vez que o processo de M&V, por si só, traz consigo incertezas mensuráveis e que podem condicionar a tomada de decisão do investidor (no caso, o gestor da área de energia).

Dias (2011) define que opção real é o direito, mas não a obrigação, que um agente possui quando toma decisões sobre um ativo real. Em indústrias ou edificações cujo potencial de conservação de energia é elevado e que inúmeros projetos de eficiência energética e de geração de energia são concorrentes, as Opções Reais podem ser utilizadas no processo decisório, como um direito a investir em uma tecnologia em detrimento de outra.

As subseções desse capítulo irão abordar os conceitos sobre risco e incerteza, além de apresentar a Teoria das opções reais e sua aplicação em projetos para a gestão de energia.

3.1.

Risco e Incerteza

Com a Teoria das Opções Reais, o conceito de projetos “agora ou nunca” fica ultrapassado e o que deve ser analisado é quando e como realizar investimentos e em quais projetos se deve investir baseando-se nos possíveis retornos que tais projetos podem proporcionar. Para analisar todas as possibilidades é importante o entendimento dos conceitos de risco e incerteza.

Amram e Kulatilaka (1999) expressam que a abordagem com opções reais demonstra de fato como a incerteza pode gerar valor. Os gerentes devem reconhecer que a incerteza associada às oportunidades de negócios estratégicos atuais é um diferencial, porque a flexibilidade proveniente dessa associação permite tanto evitar perdas quanto migrar para outras oportunidades que surgem inesperadamente. A incerteza é assim um propulsor do potencial e a TOR captura esse aspecto de valoração e pode ser empregada de forma bastante eficiente em análise de projetos para gestão de energia.

De acordo com Trigeorgis (1995), há dois tipos de incertezas que podem influenciar a decisão de investimento sobre um projeto: incerteza econômica e incerteza técnica. Dias (2014) ainda acrescenta um terceiro tipo de incerteza financeira, a estratégica. O quadro 3.1 indica as características de cada tipo de incerteza:

Quadro 3.1: Tipos de incertezas na visão econômica

| Incertezas econômicas | Incertezas técnicas | Incertezas estratégicas |
|---|---|---|
| São exógenas ao projeto | São endógenas ao projeto | São endógenas ao projeto |
| Correlacionadas aos movimentos da economia, oscilando os preços e demais custos | Não possui correlação com movimentos econômicos, se dá pelo nível de informação sobre o que se pretende investir | São relacionadas ao comportamento, preferências, ou valores de outros agentes que interagem num ambiente econômico (Dias, 2014). |
| Ex: preço do petróleo, demanda de energia de uma determinada indústria ou edificação, taxa de câmbio. | Ex: quantidade de incidência solar em uma determinada área, vazão dos ventos para instalação de uma usina eólica, energia conservada em projeto de eficiência energética. | Ex: o comportamento de uma empresa frente a novas aquisições no mercado financeiro, os incentivos regulatórios dados a uma fonte e energia. |

Ao se trabalhar com análise de investimentos considerando riscos e incertezas, tem-se algumas abordagens possíveis de utilização, como: árvore de decisão; e métodos de simulação (e.g.: simulação de Monte Carlo). Nas subseções que se seguem, cada uma destas abordagens será descrita.

3.1.1.

Árvore de decisão

Segundo Meirelles (2004) a árvore de decisão é uma maneira gráfica de visualizar as consequências de tomadas de decisão atuais e futuras, bem como eventos aleatórios relacionados e permite a concepção e o controle de problemas de investimentos sujeitos a incerteza.

Para Brealey e Myers (1992), a árvore de decisão é empregada na avaliação de projetos que envolvam decisões sequencias, portanto um diagrama esquemático em forma de árvore de decisão representando um investimento é uma ferramenta que possibilita a visualização das alternativas financeiras provenientes de diferentes escolhas feitas em um ambiente de incerteza.

A árvore de decisão deve possuir uma estrutura simples de acordo com o número de escolhas e eventos aleatórios. Meirelles (2004) traz em seu trabalho a situação de uma empresa que decide lançar um novo produto para exemplificar o uso de árvores de decisão, figura 3.1, onde cada nó quadrado representa uma decisão e cada nó redondo uma possibilidade após a decisão, que corresponde a eventos aleatórios.

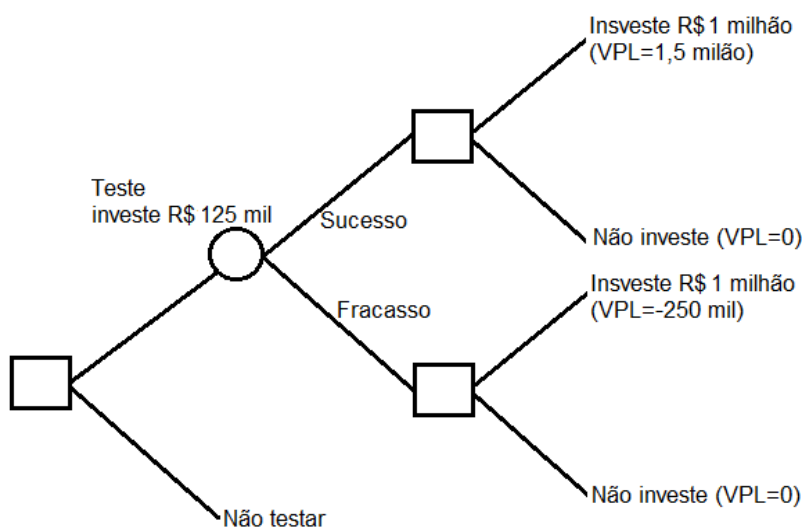


Figura 3.1 – Árvore de decisão. Fonte: Meirelles, 2004.

No primeiro nó quadrado, a empresa decide entre testar ou não o novo produto. Ao optar por não realizar o teste o problema é finalizado ($VPL=0$), ao se escolher a realização do teste, a empresa investe R\$ 125.000,00 e depara-se com duas possibilidades, sucesso ou fracasso. Caso o teste fracasse, a empresa tem outra decisão a tomar, investir 1 milhão de reais em uma produção em larga escala, e obter um VPL negativo de 250 mil reais ou não investir e abandonar o projeto, porém caso o teste seja um sucesso, a empresa teria outro caminho de tomada de decisão, investir 1 milhão de reais e obter um VPL positivo de R\$ 1,5 milhão ou não investir e abandonar o projeto.

3.1.2. Simulação de Monte Carlo

O método da Simulação de Monte Carlo pode ser utilizado para análise de risco de um investimento e consiste em simular o maior número de cenários possíveis para um projeto. Essa abordagem usa números aleatórios e distribuição estatística para criar uma grande quantidade de alternativas possíveis para o VPL de um projeto.

Diversos autores trazem procedimentos para execução da simulação de Monte Carlo (ver Brealey e Myers, 1992 ou Andrade 2017) e, de forma geral, o procedimento se resume em 3 etapas principais. A primeira etapa consiste em elencar as equações que modelam as variáveis importantes do projeto. A segunda é a aplicação das distribuições de probabilidades para as variáveis escolhidas do projeto. A terceira etapa consiste em realizar a simulação de Monte Carlo para que sejam feitas as simulações dos diferentes cenários a fim de determinar os fluxos de caixa para cada período repetidas vezes e realizar a análise da distribuição de probabilidade do fluxo de caixa projetado.

A simulação de Monte Carlo basicamente se resume em simular várias alternativas para o ativo subjacente até a data de vencimento da ação (Saito, 2004).

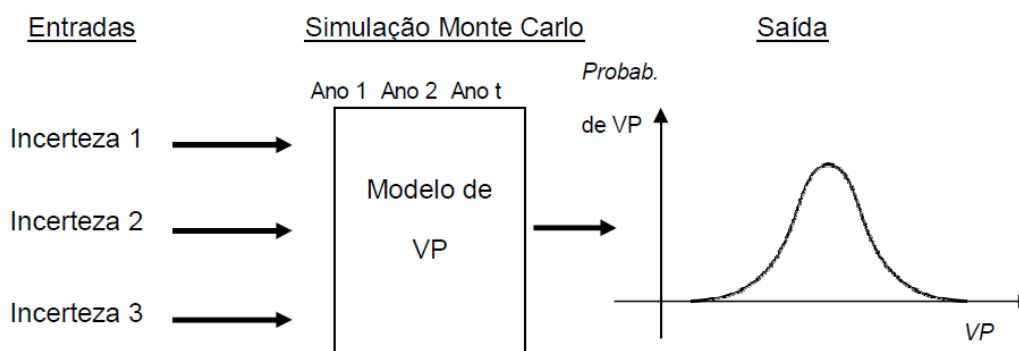


Figura 3.2 – Simulação de Monte Carlo.
Fonte: Copeland e Antikarov (2001, p.246).

A figura 3.2 exemplifica como a simulação de Monte Carlo pode ser usada para combinar diferentes para que seja possível determinar o cálculo de Valor Presente.

A Simulação de Monte Carlo pode ser aplicada na construção das árvores binomiais para análises de eventos. Essas árvores ilustram os cenários possíveis de investimento ao longo da vida útil do projeto, em que as taxas de desconto e as probabilidades são consideradas para cada período da árvore e o VPL é calculado, o que permite que seja realizada uma análise em diferentes momentos para as tomadas de decisão sobre realizar imediatamente um investimento ou aguardar para investir em oportunidades futuras.

Copeland e Antikarov (2001) trazem em seu trabalho um esquema de como a Simulação de Monte Carlo pode ser utilizada para a elaboração das árvores binomiais. A figura 3.3 apresenta esse esquema.

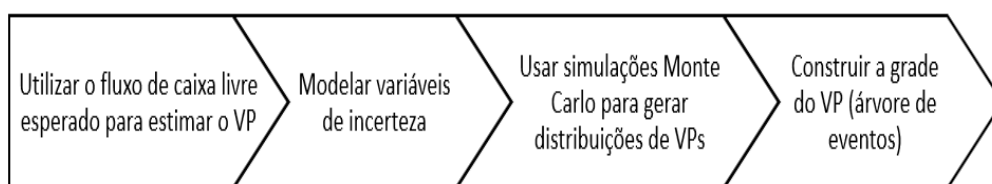


Figura 3.3: Simulação de Monte Carlo e árvores binomiais.
Fonte: Copeland e Antikarov (2001, p.247).

3.2. As Opções Reais

Percebe-se nas obras de Dixit e Pindyck (1994), Dias (2014) e Amram e Kulatilaka (1999), que o uso de OR na avaliação para tomada de decisão de se investir ou não em algo passa antes pela mudança de comportamento do gerente tomador de decisão e se trata de uma mudança cultural sobre análise de

investimento. As Opções Reais podem ser apresentadas em diferentes tipos dependendo da abordagem do autor, DIAS (2014) destaca três tipos:

- Opção de espera: o gerente espera por melhores condições de mercado ou busca aprendizado e novas informações para amadurecer a decisão de investir.
- Opção de expansão ou crescimento: quando o aspecto estratégico do projeto é valorado de forma quantitativa, de forma que as OR são para crescimento da firma.
- Opção de parada temporária e de abandono: de acordo com os acontecimentos ao longo do projeto, um gerente pode e deve decidir se o projeto ser parado temporariamente ou abandonado.

Há ainda outros modelos de opções, as financeiras, que podem ser divididos em dois tipos americana e europeia com duas opções cada um a de compra (*call*) e a de venda (*put*). A grande diferença entre as opções de compra e venda europeia para as de compra e venda americana está na data de exercício de cada uma delas, onde a opção europeia só pode ser exercida na data de seu vencimento, enquanto a americana pode ser exercida a qualquer momento até a data de seu vencimento, sendo as opções europeias mais fáceis de se entender e trabalhar inicialmente.

O preço de uma opção, também chamado de prêmio, pode ser definido por meio de várias variáveis, que por sua vez são influenciadas pelo preço de exercício (*strike*), preço atual da ação, a volatilidade do preço da ação, taxa de juros livres de risco, tempo para vencimento e dividendos esperados durante a vida da opção (Gonçalves, 2016)

Rigolon (1999) demonstra por meio do quadro 3.1 as diferenças mais marcantes entre uma opção real (uma oportunidade de investimento) e uma opção financeira.

Quadro 3.1: Tipos de incertezas na visão econômica

| Itens | Opção Financeira | Opção de Investir |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| Custo | Preço de Exercício | Investimento |
| Ativo Subjacente | Ação | Projeto |
| Retorno do Ativo | Retorno da Ação | Retorno do Projeto |
| Ganhos de Capital (do Ativo) | Variações no Preço da Ação | Variações no Valor do Projeto |
| Retorno (do Ativo) com Dividendos | Fluxo de Dividendos da Ação | Fluxo de Caixa do Projeto Líquido das Variações no seu Valor |

Fonte: Retirado de RIGOLON, 1999 p.9

As opções reais geralmente são utilizadas em ativos reais (projetos) e te dão o direito, mas não a obrigação do investimento. As características básicas de um OR são:

- Irreversibilidade – que é o grau de um investimento poder ser revertido, portanto deve-se realizar um investimento irreversível apenas quando a probabilidade de fracasso é baixa e isso gera valor na opção de espera.
- Incerteza – como já visto no item anterior as incertezas proporcionam caminhos diferentes para o tomador de decisão e aumento a flexibilidade dos investimentos.
- *Timing* – é o poder de escolha do responsável pela tomada de decisão sobre o momento de exercer a opção, seja para início imediato ou para esperar um momento melhor.

As OR podem ser utilizadas integradas ao processo organizacional, como uma ferramenta para identificar e aproveitar opções estratégicas. De acordo com Minardi (2004, p.134), “a maior parte das utilizações de opções reais, como processo organizacional é em áreas específicas de investimento de capital, como por exemplo, investimentos em exploração de petróleo e gás, em plantas de geração de energia, P&D de farmácias e firmas de biotecnologia, em alta tecnologia”. Com isso a OR é capaz de influenciar de forma muito positiva num processo organizacional aumentando a multidisciplinaridade nos estágios de formulação, nas aquisições de dados, análises e na entrega dos resultados, além de incorporar os conceitos de tratamento das incertezas intrínsecas aos investimentos e fornecer novas ferramentas para serem utilizadas em conjuntos com as técnicas tradicionais de análise de investimentos.

3.3.

Aplicação de OR em projetos para gestão de energia

Além da mudança de comportamento os processos de investimento devem ser modelados matematicamente para valorar as informações de maneira a auxiliar nas tomadas de decisão.

A fim de avaliar as metodologias empregadas no uso de opções reais em projetos para gestão de energia uma busca nas bases de dados foi realizada cruzando as palavras “*energy efficiency*” AND “*real option*”, onde foram encontrados 40 resultados, também foi realizado o cruzamento entre as palavras “*distributed generation*” AND “*real option*”, e a pesquisa retornou 25 artigos. Desses 65 artigos 9 usam OR para avaliar projetos para gestão de energia seja pelo lado da demanda ou pelo lado da oferta. O quadro 3.2 apresenta de forma resumida os autores, estudos e suas respectivas metodologias, pode-se concluir com a análise dos dados apresentados no quadro 3.2 que os custos de investimento sempre são levados em consideração, porém em relação aos custos de M&V não é possível determinar se eles foram incluídos nos valores de projeto ou não, pois não há essa discriminação nos artigos.

Quadro 3.2: Artigos sobre OR e projetos de EE

| TÍTULO | AUTOR | OBJETIVO | METODOLOGIA |
|--|--|---|---|
| <i>Valuing uncertain cash flows from investments that enhance energy efficiency</i> | Abadie L. M., Chamorro J. M., González-Eguino M. (2012) | Avaliar o momento ideal para se investir num projeto de melhoria de eficiência energética para uma instalação que consome grandes quantias de carvão. | Os dados financeiros utilizados como parâmetros foram os preços futuros diários do carvão na bolsa de NY, bem como os preços futuros das licenças de emissão da União europeia. Definiu-se 3 modelos estocásticos para definir o preço do carvão, o preço das permissões de emissão e do custo geral do projeto (contando apenas com compra de novos maquinários). Os modelos utilizados foram reversão à média e movimento geométrico browniano, com eles definidos montou-se uma rede combinando os 3 para avaliar os custos de projeto |
| <i>A real options assessment of operational flexibility in district energy systems</i> | Kitapbayev Y., Moriarty J., Mancarella P., Blochle M. (2013) | Quantificar a flexibilidade operacional em sistemas de energias distritais que usam redes inteligentes. | Foram utilizados modelos de controle estocástico para capturar a dinâmica física de um sistema de energia sob incerteza, levando em consideração a flexibilidade operacional em tempo real, restrições físicas e custos de oportunidade. Para lidar com restrições físicas, foi aplicado um método que combina modelos de processos estocásticos (para preços de energia) com a análise de Monte Carlo e regressão estatística. O método adotou uma abordagem recursiva que levou em consideração totalmente as restrições operacionais futuras resultantes das escolhas operacionais atuais. |
| <i>Development and design of a retrofit matrix for office buildings</i> | Hillebrand G., Arends G., Streblow R., Madlener R., Müller D. (2013) | Avaliar o potencial de eficiência energética de edifícios de escritórios | Duas opções de retrofit são levantadas e avaliadas de acordo com três parâmetros econômicos: VPL, incertezas do preço da energia e método de monte Carlo, além disso é adotada a OR de se atrasar investimento para esperar o melhor momento para investimento |

Quadro 3.2: Artigos sobre OR e projetos de EE

| TÍTULO | AUTOR | OBJETIVO | METODOLOGIA |
|---|--|--|--|
| <i>Real Options Valuation of Phased Investments in Commercial Energy Retrofits under Building Performance Risks</i> | Lee H. W., Choi K., Gambatese J. A. (2014) | Desenvolver e exemplificar uma estrutura de avaliação de opções reais que possa avaliar o impacto financeiro de investimentos em fases em um portfólio de edifícios | Estimou-se o VPL e o ajustou baseado nos riscos, logo após utilizou-se a técnica de Monte Carlo para estimar a volatilidade dos retornos ao investimento. A próxima etapa foi desenvolver o modelo estocástico binomial para modelar os preços das economias de energia para então realizar as análises dos resultados |
| <i>Hydrogen storage for wind parks: A real options evaluation for an optimal investment in more flexibility</i> | Kroniger D., Madlener R. (2014) | Investigar a viabilidade econômica do armazenamento de hidrogênio por excesso de eletricidade produzida em usinas eólicas na Alemanha como forma de aumentar a eficiência energética | Para realizar as análises foram levados em conta três parâmetros: velocidade do vento, preços spot da eletricidade no mercado e a capacidade de reserva minuto. Para a modelagem e simulação foram usados os modelos de Black & Scholes e simulação de monte Carlo |
| <i>Optimal scheme in energy performance contracting under uncertainty: A real option perspective</i> | Guo k., Zhang L., Wang T. (2019) | Descobrir o esquema de sistema de gestão de energia ideal para a ESCO e o proprietário em cenários específicos. | Primeiramente foram avaliados quais os interesses tanto das ESCO, quanto do proprietário e a partir daí um modelo estocástico binomial foi desenvolvido e comparado com modelos tradicionais de VPL |
| <i>Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in Rome</i> | Campisi D., Gitto S., Morea D. (2017) | Discutir a adoção de luminárias de LED para iluminação pública em Roma | Para o estudo os autores abordam aspectos dos custos para o investimento inicial para troca de lâmpadas LED, o custo do consumo de energia anual, o custo do sistema atual e compararam os resultados de métodos tradicionais com os resultados obtidos através da aplicação de opções reais. Outros aspectos foram avaliados como emissões de CO2 |

Quadro 3.2: Artigos sobre OR e projetos de EE

| TÍTULO | AUTOR | OBJETIVO | METODOLOGIA |
|---|--|---|--|
| <i>Deep energy renovation strategies: A real option approach for add-ons in a social housing case study</i> | Agliardi E., Cattani E., Ferrante A. (2017) | Elaborar um método de avaliação tecnoeconômica para <i>deep energy renovation</i> de edifícios | Os autores desenvolveram um modelo baseado em modelos estocásticos com equações diferenciais para avaliar as medidas técnicas de expansão dos prédios e dos custos com melhorias no desempenho energético para avaliar a viabilidade dos projetos |
| <i>Real options valuation of photovoltaic power investments in existing buildings</i> | Penizzotto F., Pringles R., Olsina F. (2019) | Desenvolver um método baseado na teoria de Opções Reais para avaliação de investimentos em sistemas de geração FV a serem instalados em coberturas de edifícios existentes | Para o estudo, os autores se basearam no levantamento dos preços e incertezas relacionadas ao investimento. Utilizaram as Simulação de Monte Carlo para determinar a volatilidade e montar a árvore binomial para avaliação da opção real de espera. |
| <i>Valuing Investments in Distribution Networks with DG under Uncertainty</i> | Buzarquis E., Blanco G., Olsina F., Garcés F. (2010) | Propor uma abordagem de avaliação de investimento que avalia adequadamente o valor da opção de adiar investimentos em alimentadores de distribuição, ganhando flexibilidade ao investir em unidades de GD | Elaborou a árvore binomial de opções com base na simulação de Monte Carlo, considerando opções de realocar ou abandonar o projeto, considerando os preços de eletricidade e de geração, além de criar avaliação de combinação das opções com cenários múltiplos. |

3.4.

Considerações do Capítulo

Ao longo do capítulo fica claro a importância das definições de incerteza e o quanto esta pode influenciar nas decisões das opções que quer avaliar de um projeto, ainda mais se tratando de um projeto de eficiência energética, em que as perspectivas de redução de consumo e economia financeira são voláteis e dependentes de diversos fatores. Portanto, pode-se concluir que a teoria de opções reais é perfeitamente aplicável em projetos de eficiência energética e GD e que os modelos estocásticos são os mais indicáveis para a modelagem das incertezas dos processos, sendo assim no capítulo 4 esses modelos deverão ser testados em conjunto com as ferramentas para cálculo de incerteza estudados no capítulo 2, preenchendo a lacuna existente na literatura, para a proposição de um modelo capaz de tratar tanto do aspecto econômico (a teoria de opções reais), quanto do técnico de forma eficaz (o processo de medição e verificação).

4

Modelo conceitual para avaliação técnico-financeira de um projeto de gestão de energia

Este capítulo apresenta um modelo para avaliação técnico-financeira de um projeto de gestão de energia a partir de uso da geração distribuída com fontes renováveis e ações de eficiência energética. Trata-se de um modelo conceitual genérico de avaliação técnico-financeira, com base em metodologias para previsão do consumo energético obtido por ações de eficiência energética e M&V para determinação da energia conservada com estas ações. Além disso, utiliza-se modelos de opções reais para a avaliação financeira das ações de gestão energética, seja pelo lado da oferta (e.g.: geração distribuída) ou demanda, ações de eficiência energética.

4.1.

Visão geral do modelo proposto

A representação esquemática do modelo de avaliação técnico-financeira de projetos para gestão de energia está apresentada na Figura 4.1, dividindo-se em duas fases. A primeira fase, composta de duas etapas utilizando geração distribuída e ações de eficiência energética, é dedicada a avaliação dos projetos candidatos que serão utilizados dentro da gestão de energia para determinação da energia conservada para então, na segunda fase, realizar a avaliação financeira com Opções Reais.

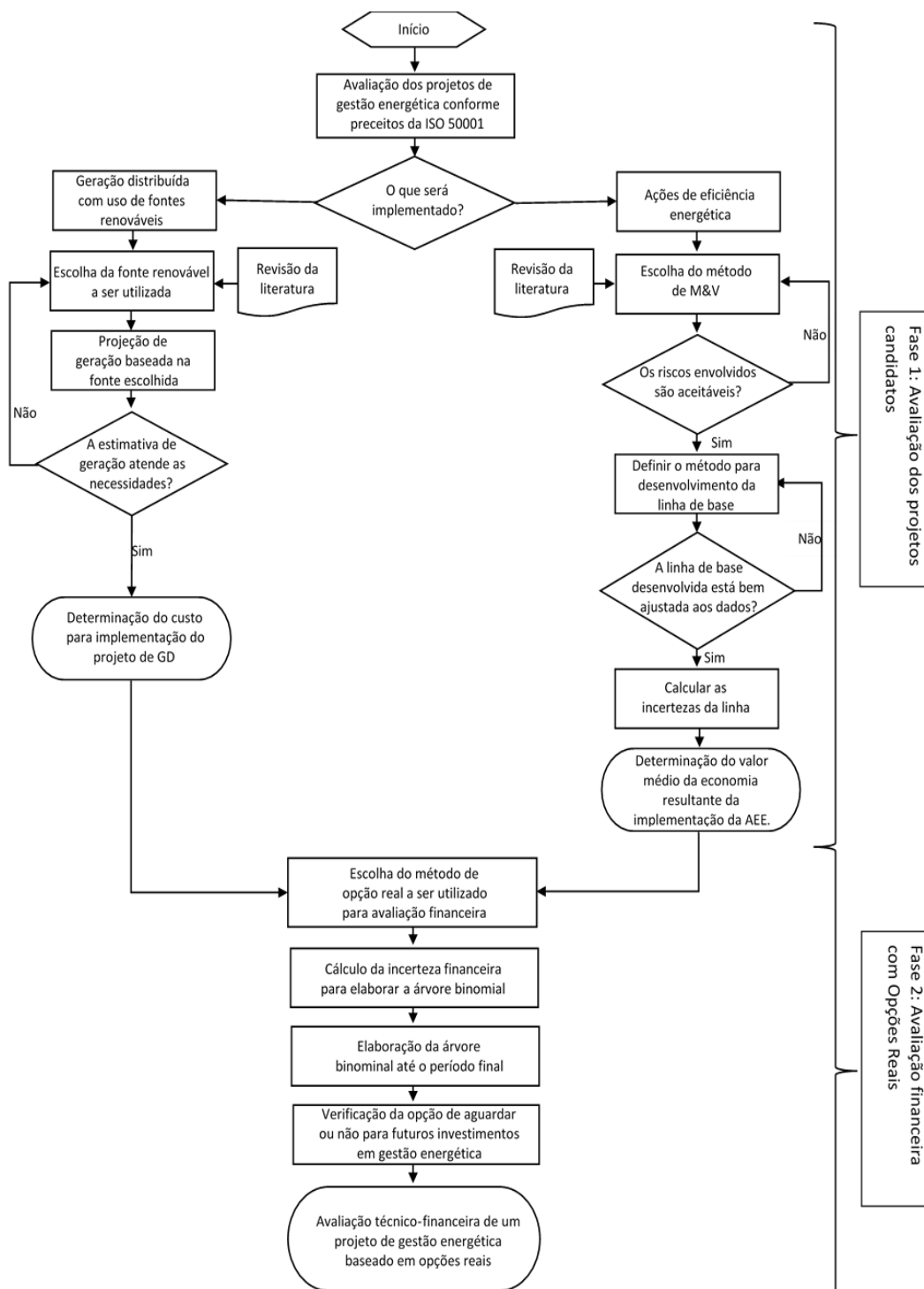


Figura 4.1 – Fluxograma geral do modelo

4.2.

Descrição da fase da avaliação dos projetos candidatos

A gestão de energia seguindo as diretrizes da ISO 50001:2018 é uma das formas mais divulgadas e adotadas para a elaboração de projetos para gestão de

energia. A implementação de um sistema de gerenciamento de energia determinado por esta Norma tem como objetivo resultar na melhoria contínua desempenho de energia. Portanto, ela se baseia na premissa de que a organização irá revisar e avaliar periodicamente seu sistema de gestão de energia a fim de identificar oportunidades de melhoria e sua implementação. A organização deve ter flexibilidade na forma como irá implementar o sistema de gerenciamento de energia, por exemplo, a taxa, extensão e escala de tempo do processo de melhoria contínua são determinados pela organização (ISO 50001:2018).

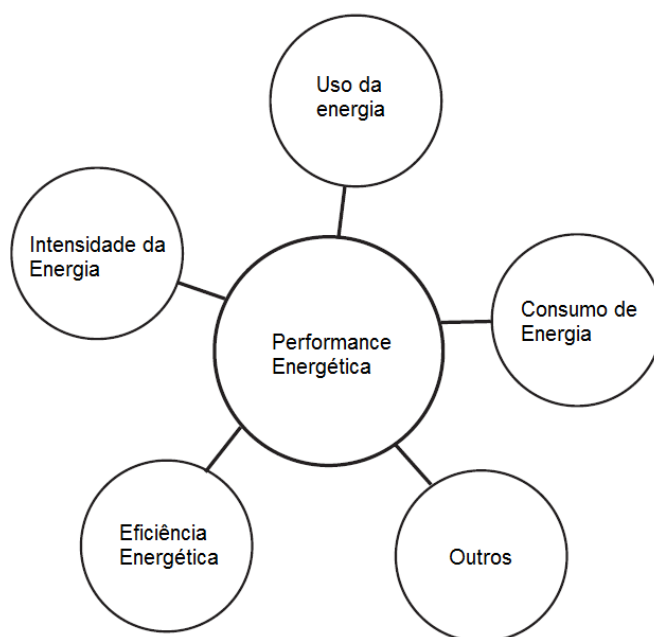


Figura 4.2: Modelo conceitual da performance energética
Retirado da ISO50001:2018. Tradução própria.

O conceito de desempenho energético inclui o uso de energia, eficiência energética e consumo de energia. Assim, a organização pode escolher entre uma ampla gama de atividades de desempenho energético. Por exemplo, a organização pode reduzir a demanda de pico, utilizar o excedente ou melhorar as operações de seus sistemas, processos ou equipamentos.

Como já foi dito, na figura 4.1 a primeira fase do modelo conceitual representa a avaliação de projetos para gestão de energia e pode ser seguida através de duas etapas, caso o projeto de gestão de energia seja pelo lado da oferta devem ser avaliados projetos capazes de aumentar a oferta de energia por meio da criação de novas usinas, por exemplo. Tendo como foco a sustentabilidade, no modelo proposto, a opção escolhida para a etapa de avaliação pelo lado da oferta foi a

geração distribuída utilizando fontes renováveis. Já pelo lado da demanda, as opções escolhidas podem ser quaisquer projetos de eficiência energética, contemplando projetos que façam análise de processos específicos da organização, bem como medidas de conservação de energia (treinamento, cursos e palestras, por exemplo). Nas subseções a seguir, cada uma das fases é melhor descrita.

4.2.1 Geração Distribuída com fontes renováveis

Primeiramente, deve ser realizada uma avaliação minuciosa a respeito de todas as possibilidades de fontes renováveis e a viabilidade técnica de utilizá-las no local em que se pretende criar a usina de geração distribuída.

Khetrpal (2020) apresentou em seu trabalho uma revisão criteriosa das definições e tecnologias de geração distribuída, capazes de propiciar o crescimento da GD e os benefícios oferecidos pela integração da GD à rede de distribuição. Em seu trabalho é possível entender as diferentes definições para GD e também as possíveis tecnologias, conforme demonstrado na figura 4.3, tendo como pano de fundo o arcabouço regulatório definido pela Resolução Normativa 482/2012, 687/2015 e RN 786/2017. Esses critérios servem como orientação para a elaboração do projeto de GD com fontes renováveis em atendimento ao fluxo estabelecido na figura 4.1 para o levantamento de qual tecnologia utilizar para a GD. Nesse trabalho será considerada a tecnologia solar fotovoltaica.

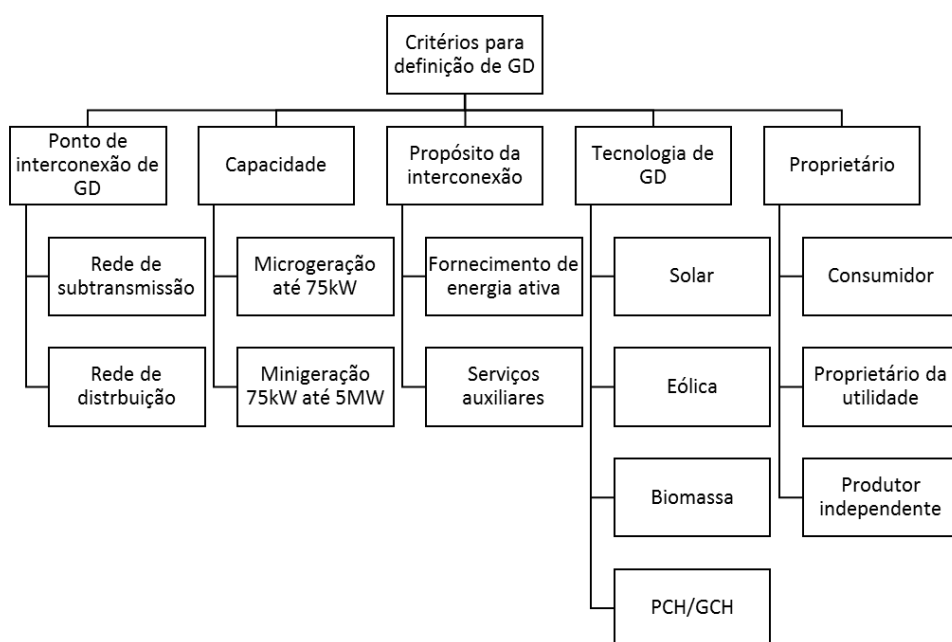


Figura 4.3: Critérios para definição da GD.
Adaptado de Khetrpal (2020)

O próximo passo dentro do modelo conceitual para a etapa de avaliação do projeto de geração distribuída é o levantamento da demanda de energia que a usina deverá atender, para tal se faz necessária a avaliação de um período capaz de abranger a sazonalidade do consumo energético. É aconselhável que seja avaliado pelo menos o período de 1 ano de consumo, pois se consegue ter uma estimativa mínima do padrão sazonal. Dessa forma, é possível determinar o consumo médio anual necessário para o dimensionamento da usina de geração de energia solar fotovoltaica.

Com a definição do valor médio da energia consumida, deve-se levantar os custos totais de implementação da usina geradora no local, de maneira a garantir pleno atendimento a demanda estimada, para posteriormente se fazer a avaliação financeira. O levantamento de custo para implementação da usina considerando os equipamentos, mão de obra, homologação junto a concessionária e a manutenção podem ser feitos através de consultas a empresas especializadas em energia solar. Nesse trabalho não será discutido a forma de previsão de geração de energia solar fotovoltaica e suas incertezas associadas, o foco será no custo do projeto como um todo.

4.2.2

Ações de Eficiência Energética

A fase de avaliação técnica de projetos para gestão de energia ainda possui um segundo viés, o de implementação de ações de eficiência energética.

O Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP) fornece várias diretrizes que servem como padrões da indústria para M&V de energia (Hamer *et al.*, 2017). O racional apresentado no PIMVP foi descrito no capítulo 2 e para essa etapa do modelo conceitual apresentada no item 4.1 deve-se seguir tal racional e determinar qual o método de M&V a ser empregado.

Com o método escolhido é necessária a avaliação dos riscos da implementação das medidas de eficiências energéticas, esses sendo aceitáveis deve-se seguir para a definição do método para elaborar a linha de base.

Para a determinação da linha de base são necessários modelos matemáticos capazes de prever o consumo de energia no período pós a implementação das ações de eficiência energética baseando-se nos dados existentes do período pré implementação das AEE. Geralmente, a linha de base é elaborada através de um modelo de regressão dinâmica, mas modelos mais simples também podem ser empregados a depender da AEE empregada.

A regressão dinâmica trata-se de um modelo matemático de regressão linear utilizado quando valores presentes de uma série temporal dependem de valores passados. A equação 4.1 representa a forma genérica do modelo de regressão dinâmica:

$$y = f\left(Y_{t-1}, \dots, Y_{t-k}, X_{1,t}, X_{1,t-1}, \dots, X_{1,t-k}, X_{2,t}, X_{2,t-1}, \dots, X_{2,t-k}, X_{m,t}, X_{m,t-1}, \dots, X_{m,t-k}\right) \quad (4.1)$$

Em modelos de séries temporais, um período substancial de tempo pode passar entre o período de tomada de decisão e o impacto final de uma mudança em uma variável. Pode-se dizer que é da natureza das relações econômicas que o ajuste de y às mudanças em x seja amplamente distribuído ao longo do tempo. Se o período de decisão e resposta apropriado for suficientemente longo, as variáveis explicativas defasadas devem ser incluídas explicitamente no modelo. Uma maneira de modelar as respostas dinâmicas é incluir valores defasados de x no lado direito da equação de regressão (4.1), além de um termo estocástico representando outras variáveis não inclusas no modelo.

$$Y_t = \beta_0 + \alpha Y_{t-1} + \alpha Y_{t-2} + \dots + \alpha Y_{t-k} + \beta_1 X_{1,t} + \beta_1 X_{1,t-1} + \dots + \beta_1 X_{1,t-k} + \beta_2 X_{2,t} + \beta_2 X_{2,t-1} + \beta_2 X_{2,t-k} \quad (4.2)$$

onde:

- Y_{t-k} é a variável dependente (endógena) no instante $t-k$, $k \geq 0$ e $t-k \geq 1$;
- α é o coeficiente da variável dependente;
- $X_{i,t-k}$ é a variável causal (exógenas) i no instante $t-k$, $i \geq 1$, $k \geq 0$ e $t-k \geq 1$;

- β_i é o coeficiente da variável causal i , $i \geq 1$;
- ε_t é o ruído aleatório associado ao modelo, $\varepsilon_t \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$;

Dada a equação 4.2, α é o coeficiente da parte autorregressiva. Se a variável explicativa (entrada) x sofre uma mudança de uma unidade (impulso) em algum período t ; então o impacto imediato em y é dado por β_0 ; β_1 é o impacto em y após um período, β_2 é o impacto após dois períodos e assim por diante. O impacto final em y é β_k e ocorre após k períodos. Portanto, são necessários k períodos para que todos os efeitos do impulso sejam realizados. No caso do modelo proposto, a variável y pode ser o consumo de energia ou demanda de potência por exemplo, já as variáveis x , dependem das AEE implementadas (por exemplo, para ar-condicionado, pode-se usar ocupação da edificação e/ou temperatura externa).

Para Barros e Souza (1995), utilizar um modelo de regressão para modelar uma série temporal adotando a hipótese de independência dos ruídos não retrata a realidade e a auto correlação dos resíduos traz algumas consequências como:

- 1) Os estimadores usuais por mínimos quadrados não possuem variância mínima.
- 2) Os estimadores da variância e dos erros padrões dos coeficientes da regressão são subestimados, o que levaria à conclusão de que os estimadores são mais precisos do que na realidade. (Araujo, 2013)
- 3) Os intervalos de confiança para os parâmetros da regressão e os testes de hipóteses relacionados a estes intervalos perdem a validade, como uma consequência direta de 2). (Araujo, 2013)

As consequências citadas acima mostram a necessidade de atenção ao problema de autocorrelação dos erros, porque ignorá-los, em geral, pode-se levar a diversas conclusões falsas.

Os modelos de regressão dinâmica são a combinação da dinâmica das séries temporais e o efeito de variáveis explicativas. Eles devem ser usados quando existe uma estrutura de dependência entre a variável de interesse e possíveis variáveis causais e, ao mesmo tempo, quando a estrutura de correlação da série dependente indicar que não se pode supor a independência dos erros (Araujo,

2013). Nestes modelos, a variável dependente é explicada por seus valores defasados e pelos valores atuais e passados de variáveis causais ou exógenas. (Zanini, 2000).

Para construir um modelo de regressão dinâmica, geralmente, se adota a estratégia *bottom-up*, onde inicialmente é considerado um modelo mais simples, que é aperfeiçoado à medida que novas variáveis são incluídas para se encontrar o modelo mais ajustado. Nem sempre esse procedimento é fácil de ser empregado, porque também é necessário se escolher as defasagens das variáveis a serem incluídas no modelo. Por outro lado, softwares estatísticos podem facilitar no desenvolvimento do modelo.

Para se definir um modelo mais adequado, é importante verificar se os coeficientes estimados são coerentes, além de observar a significância dos parâmetros. (Araujo, 2013)

A figura 4.4 representa o esquema a ser seguido para a elaboração de um modelo de regressão dinâmica.

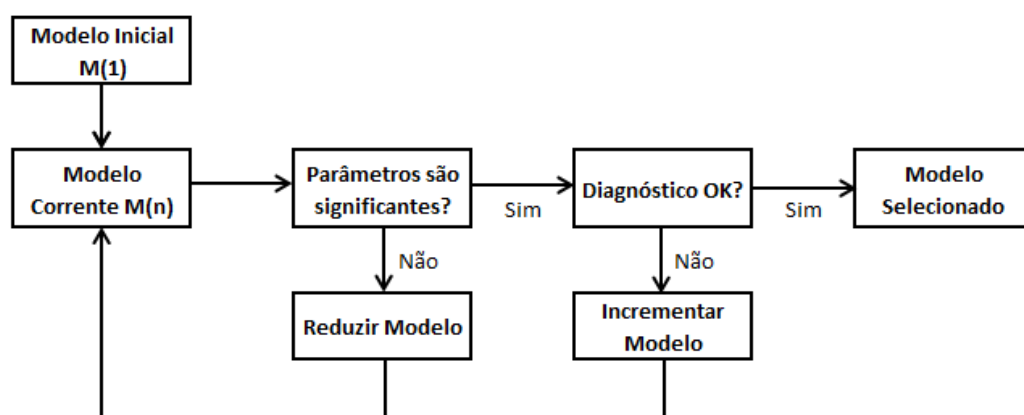


Figura 4.4: Elaboração de um modelo de Regressão Dinâmica

Fonte: Zanini, 2000.

Após a definição da linha de base, deve-se verificar se ela está bem ajustada aos dados e, então calcular as métricas estatísticas que demonstram a incerteza na LB em relação aos dados reais, para isso as métricas informadas no capítulo 2 podem ser utilizadas.

Com a linha de base bem ajustada e com incerteza aceitável, é possível se estimar a economia de energia alcançada com a implementação das medidas de

eficiência energética.

4.3.

Descrição da Avaliação financeira com Opções Reais

Os projetos para gestão de energia têm tipicamente uma constante presença de risco e incerteza. As opções reais possibilitam que o gestor modele a incerteza e o risco atrelado ao projeto, tendo uma tomada de decisão de investimento de forma mais precisa.

O modelo adotado para precificação de projetos de gestão de energia foi o modelo binomial. Baidya e Castro (2001) afirmam que um modelo baseado na elaboração de árvores binomiais é bastante utilizado devido a sua simplicidade, flexibilidade e facilidade em ser implementado computacionalmente. Outro ponto favorável para a sua aplicação é que não se faz necessário o uso de modelos estocásticos em tempo contínuo, dessa forma não exigem o uso de técnicas matemáticas complexas. Na árvore binomial, a distribuição de probabilidades do valor do projeto em cada período, é aproximada por uma distribuição binomial, assim, em cada período o preço do ativo pode mudar para somente dois valores possíveis, o que torna a utilização da árvore binomial mais atrativo para a análise de exercício ou não das opções.

Para a avaliação financeira de um projeto de gestão energética, primeiramente deve-se estimar o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto. O VPL será calculado através da abordagem tradicional de fluxo de caixa, sem flexibilidade.

O segundo passo consiste na modelagem das variáveis de incerteza envolvidas na avaliação financeira. Trata-se das incertezas do ponto de vista financeiro como o custo, investimento e a taxa mínima de atratividade. A Simulação de Monte Carlo (SMC) será utilizada para essa modelagem.

A terceira etapa é a determinação da volatilidade, que pode ser interpretada como a incerteza do projeto, para esse cálculo Brandão, Dyer e Hahn (2012) indicam o uso das equações 4.3 e 4.4:

$$\tilde{V}_1 = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{\tilde{F}_t}{(1+\mu)^{t-1}} \quad (4.3)$$

$$\tilde{Z} = \ln\left(\frac{\tilde{V}_1}{\tilde{V}_0}\right) \quad (4.4)$$

V_0 é o valor presente em $t = 0$ e o “-” indica que ele é um valor determinístico e V_1 é o valor do projeto em $t = 1$, o “~” indica que ele é uma variável estocástica, que é resultado do processo de difusão do Movimento Geométrico Browniano, assim como F_t , por sua vez Z também é uma variável estocástica

A etapa seguinte consiste na precificação do projeto de gestão de energia e para tal será adotado o Modelo Binomial de Cox, Ross e Rubinstein (1979), esse modelo permite não só a generalização para múltiplos períodos do processo de dois cenários, como também possibilita a escolha dos fatores de subida e descida u e d , além das suas probabilidades neutras ao risco p e $(1-p)$, de forma que a árvore binomial com n períodos seja uma aproximação discreta do processo estocástico em tempo contínuo. (Dias, 2014)

As equações para o Modelo Binomial CRR, são:

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (4.5)$$

$$d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} = 1/u \quad (4.6)$$

$$p = \frac{(1 + r) - d}{u - d} \quad (4.7)$$

A partir do valor inicial do ativo (V_0) dos movimentos ascendentes e descendentes, u e d , constrói-se a árvore binomial, em passos de tamanho: Δt , até o período final T .

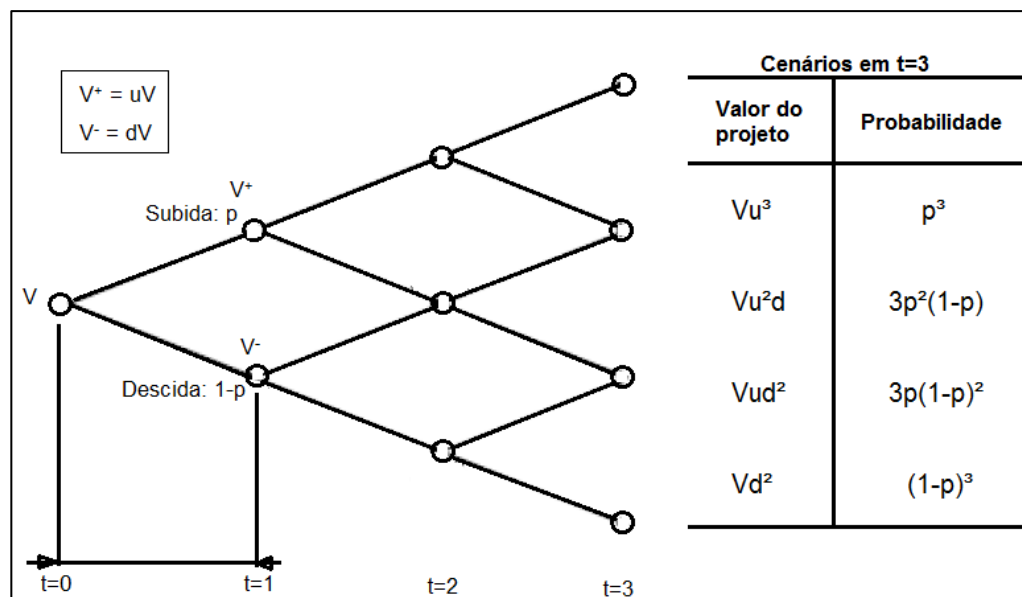


Figura 4.5: Exemplo de árvore Binomial Recombinante com $d = 1/u$.

Fonte: Dias, 2014.

A partir do último passo T, em cada nó da árvore, são exercidas as Opções Reais, calculando-se o valor Máximo, entre exercer estas ou continuar com o valor do nó. Passa-se então ao passo anterior, por Programação Dinâmica (Indução Retroativa) então cada nó em T-1 calcula-se o valor Máximo entre exercer a(s) opção(ões) ou aguardar. Ou seja, isso significa, calcular o Valor Presente no nó, dos Valores nos nós posteriores, ponderados por p e (1-p) e descontados à r_f (abordagem neutra ao risco).

Nesta metodologia, as principais características financeiras do projeto de gestão de energia são levadas em consideração, como a questão da irreversibilidade, deixando claro na maioria dos projetos que esse valor inicial é quase ou totalmente irreversível. Outra característica importante são as incertezas que se fazem presentes no projeto e, por fim, a questão da adaptação do projeto a situações inesperadas no mercado, permitindo que o investimento possa ser postergado (Saito, 2010).

Por fim, com a análise técnica e financeira realizada as incertezas em relação ao negócio devem ser avaliadas a fim de se obter uma avaliação geral do projeto do ponto de vista técnico-financeiro.

4.4.

Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo foi apresentado, na seção 4.1, o modelo proposto para avaliação técnico-financeira de um projeto de gestão de energia a partir de uso da geração distribuída com fontes renováveis e ações de eficiência energética. Este é um modelo conceitual genérico de avaliação, com base em metodologias para previsão do consumo energético gerado por ações de eficiência energética e M&V para determinação da energia conservada com estas ações. Além disso, utilizou-se modelos de opções reais para a avaliação financeira das ações de gestão energética, seja pelo lado da oferta ou demanda.

As demais seções do capítulo apresentaram o que deve ser considerado em cada uma das etapas do modelo conceitual. A seção 4.2 abordou as características tanto de projetos de geração distribuída, quanto de projetos para medidas de eficiência energética, também tratou do modelo a ser empregado para a determinação da linha de base para o projeto de eficiência energética.

A seção 4.3 apresentou os passos para a avaliação financeira utilizando Opções Reais, determinando o que deverá ser considerado para a aplicação do modelo conceitual.

Esse modelo deverá ser testado para que seja realizada a avaliação de sua aplicabilidade em situações reais. Para tal o modelo será aplicado para um caso em que uma fábrica possui um projeto para gestão de energia que servirá de exemplo numérico.

5

Validação do modelo: estudo empírico aplicado a um projeto de gestão de energia em uma indústria farmacêutica

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo proposto no capítulo anterior, aos dados de uma indústria farmacêutica. Inicialmente se faz necessária a contextualização desse setor industrial frente aos projetos para gestão de energia, principalmente em geração distribuída de médio porte. Também serão apresentados os dados utilizados para a aplicação do modelo e como eles foram obtidos, formatados e tratados. Além disso será apresentada a discussão dos resultados finais da aplicação do modelo.

5.1.

Contexto de aplicação: projetos para gestão de energia para o setor industrial farmacêutico

Conforme dito no capítulo 1, o setor industrial consumiu, em 2020, 32,1% da energia do Brasil (EPE, 2021), logo houve um aumento na participação do setor industrial no consumo energético do país.

Devido a questões de confidencialidade, a empresa sob estudo não terá seu nome divulgado e os dados de produção serão utilizados em Unidade Farmacêuticas não revelando qual o produto da fábrica, mas mantendo suas características para as análises. O parque industrial da farmacêutica, de onde os dados foram coletados, foi submetido a um *retrofit* em seu sistema de AVAC para modernização e atualização de seus *chillers* e instalação de uma torre de termoacumulação visando melhorar a eficiência energética da fábrica. Em uma revisão sobre a “produção verde” em processos farmacêuticos, Jimenez-Gonzalez *et al* (2012) destacam uma grande barreira para monitorar a energia do processo, pois o equipamento de medição adequado precisa estar no local para separar o uso de energia de operações de unidades individuais da energia total da planta consumida. Porém, devido a necessidade de se monitorar a energia consumida pelo sistema após a implementação das ações de eficiência energética foram instalados medidores de

energia inteligentes nos grupos de máquinas do sistema de refrigeração, justamente para uma avaliação em separado do total de energia consumida.

Essas AEE foram a primeira etapa do projeto de gestão de energia e já foram realizados pela empresa, servindo como base para a análise do próximo investimento através da instalação de uma usina de geração distribuída, tendo como fonte de energia a solar fotovoltaica. No processo de verificação da performance desta AEE, será apresentado os resultados da linha de base e ganhos auferidos com este projeto.

A segunda etapa consiste na análise técnica e de viabilidade econômica para um projeto de geração distribuída solar, utilizando a abordagem de opções reais. Como os investimentos destes sistemas são elevados, é necessária uma análise mais sofisticada cujas incertezas possam ser modeladas.

5.2.

Coleta, análise e formatação dos dados dos projetos de uma indústria farmacêutica

Esta seção descreve os métodos adotados na coleta, análise e formatação dos dados utilizados para demonstração e aplicação do modelo proposto no capítulo 4 desta dissertação. Esta demonstração será feita considerando um projeto de eficiência energética já implementado e um projeto de geração distribuída com energia solar fotovoltaica.

5.2.1.

Projeto de eficiência energética

Para o projeto de eficiência energética, a fábrica realizou uma parceria com a concessionária responsável pela distribuição de energia onde ela está localizada para a realização do *retrofit* das máquinas do sistema AVAC, instalação de medidores inteligentes e instalação de uma torre de termoacumulação. O custo total do projeto foi de R\$ 2,9 milhões. O projeto foi implementado a partir de 2016.

Com o projeto implementado é possível se avaliar a performance das medidas adotadas para a aplicação do modelo conceitual elaborado no capítulo 4. A subseção a seguir trará a avaliação da performance do projeto de eficiência energética implementado.

5.2.1.1.

Determinação da linha de base

Para determinação da linha de base os dados de consumo de energia são fundamentais, pois através deles será possível a comprovação da eficiência da ação de eficiência energética empregada caso as medições pós implementação da AEE demonstrem a redução do consumo, caso contrário a AEE terá se mostrado ineficiente.

A fábrica tinha até 2016 apenas seu consumo total monitorado e medido pelo setor de engenharia da empresa, porém com a implementação da AEE foram instalados, em 2018, medidores inteligentes nos grupos de máquinas do sistema de AVAC, de maneira que passou a ser possível não só a medição total do consumo, mas também da energia consumida pelo sistema de AVAC.

Tabela 5.1: Consumo total versus consumo AVAC

| DATA | Consumo (kWh) | | % |
|--------|---------------|------------|-----|
| | TOTAL | AVAC | |
| Jan/18 | 1.335.459,35 | 432.792,24 | 32% |
| Fev/18 | 1.387.763,66 | 445.871,76 | 32% |
| Mar/18 | 1.468.364,62 | 483.912,48 | 33% |
| Abr/18 | 1.397.063,57 | 427.472,64 | 31% |
| Mai/18 | 1.401.059,59 | 504.751,92 | 36% |
| Jun/18 | 1.308.082,51 | 185.895,84 | 14% |
| Jul/18 | 1.392.574,37 | 365.177,52 | 26% |
| Ago/18 | 1.330.017,33 | 352.209,60 | 26% |
| Set/18 | 1.314.123,03 | 328.193,28 | 25% |
| Out/18 | 1.440.449,99 | 374.700,72 | 26% |
| Nov/18 | 1.367.002,23 | 400.644,00 | 29% |
| Dez/18 | 1.461.034,94 | 228.727,92 | 16% |
| Jan/19 | 1.346.987,73 | 391.961,52 | 29% |
| Fev/19 | 1.246.118,52 | 387.616,56 | 31% |
| Mar/19 | 1.274.164,56 | 423.633,60 | 33% |
| Abr/19 | 1.250.016,51 | 422.658,96 | 34% |
| Mai/19 | 1.302.025,56 | 501.753,60 | 39% |
| Jun/19 | 1.346.607,60 | 249.946,80 | 19% |
| Jul/19 | 1.205.463,20 | 362.618,16 | 30% |
| Ago/19 | 1.221.961,44 | 357.514,32 | 29% |
| Set/19 | 1.236.836,52 | 387.229,68 | 31% |
| Out/19 | 1.278.689,76 | 375.534,00 | 29% |
| Nov/19 | 1.381.676,40 | 415.561,20 | 30% |
| Dez/19 | 1.348.669,44 | 231.465,84 | 17% |

A tabela 5.1 representa os valores medidos de energia para o consumo total da fábrica e para o consumo do sistema de AVAC, a terceira coluna informa o percentual do consumo do AVAC em relação ao consumo total. Pode-se reparar que o sistema de AVAC responde em média por 28% da energia consumida pela fábrica, ou seja, um terço de toda a energia consumida. Alguns meses possuem porcentagens bem abaixo da média, mas essas indicações podem representar os momentos de parada das utilidades para manutenção preventiva. Os dados percentuais mostrados na tabela 5.1 reforçam ainda mais a importância de medidas de gestão de energia para o sistema de AVAC.

Como os medidores inteligentes foram instalados apenas a partir de 2018, os dados considerados serão os de consumo total, já que através dele será possível realizar a comparação entre os períodos pré e pós ação de eficiência energética.



Figura 5.1: Histórico de consumo total de energia

A figura 5.1 representa o histórico de consumo energético da fábrica, nele é possível notar dois grandes vales durante o ano de 2016, período onde a fábrica precisou parar em dois momentos.

Como foi dito no capítulo 2, a temperatura é fator importante para a avaliação do consumo de energia em sistemas de ar condicionado, por isso o primeiro passo para se realizar a avaliação da ação de eficiência energética realizada foi o levantamento dos dados históricos de temperatura do local onde a fábrica está instalada. Para tal foram coletados os dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET para a estação meteorológica automática localizada a 3km da fábrica.

Foram coletados dados de temperatura de 2015 até 2019, pois a ação de eficiência energética foi empregada ao longo do ano de 2016, então os dados de 2015 serviriam para a elaboração da linha de base e os dados posteriores a 2016 serviram para a verificação da AEE, de maneira a determinar se houve redução no consumo.

Os dados fornecidos pelo INMET são horários e baseados no *Coordinated Universal Time* (UTC), por isso o horário das medições precisou ser diminuído de 3 horas para que fosse possível determinar o real momento de medição no local de instalação da estação meteorológica devido ao fato do Brasil estar no fuso GMT-3. Primeiramente planejou-se determinar o valor diário das temperaturas, porém devido a grande quantidade de dados dificultou a visualização e interpretação dos dados, além disso os dados de consumo como será mostrado nas próximas seções também era mensal, logo foram realizadas médias aritméticas dos valores horários para cada mês. A figura 5.2 demonstra o gráfico gerado utilizando os valores de temperatura para o período de 2015 à 2019.

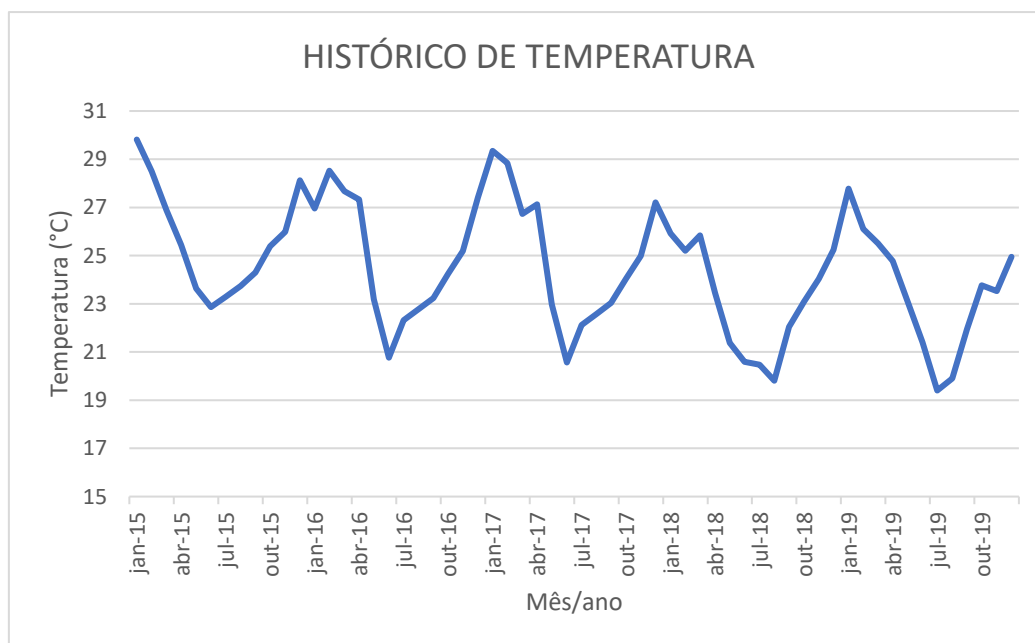


Figura 5.2: Histórico de temperatura

Através do gráfico acima é possível notar a sazonalidade da temperatura como já era esperado com temperaturas mais baixas no período do inverno e mais quentes durante o verão, porém há ainda uma outra forma de uso dos dados de temperatura além de simplesmente aplica-los para a elaboração dos modelos de eficiência energética, Tonchin (2013) utiliza em seu trabalho o conceito de Graus-

Dia Acumulado (GDA), que representa o somatório da temperatura que ficou acima da média de cada dia durante o mês e é utilizado principalmente para sistemas de ar condicionado, portanto, com base nos dados de temperatura obtidos foram calculados o GDA de cada mês.

$$GDA_{dia} = \overline{TM} - T_{min} \quad (5.1)$$

$$GDA_{mês} = (GDA_{dia1} + \dots + GDA_{dia31}) \quad (5.2)$$

Onde:

GDA_{dia} = Grau-Dia Acumulado de 1 dia

$GDA_{mês}$ = Grau-Dia Acumulado de 1 mês

TM = Temperatura média do dia

T_{min} = Temperatura mínima do dia

A figura 5.3 representa graficamente o GDA para cada mês ao longo dos anos de 2015 a 2019.

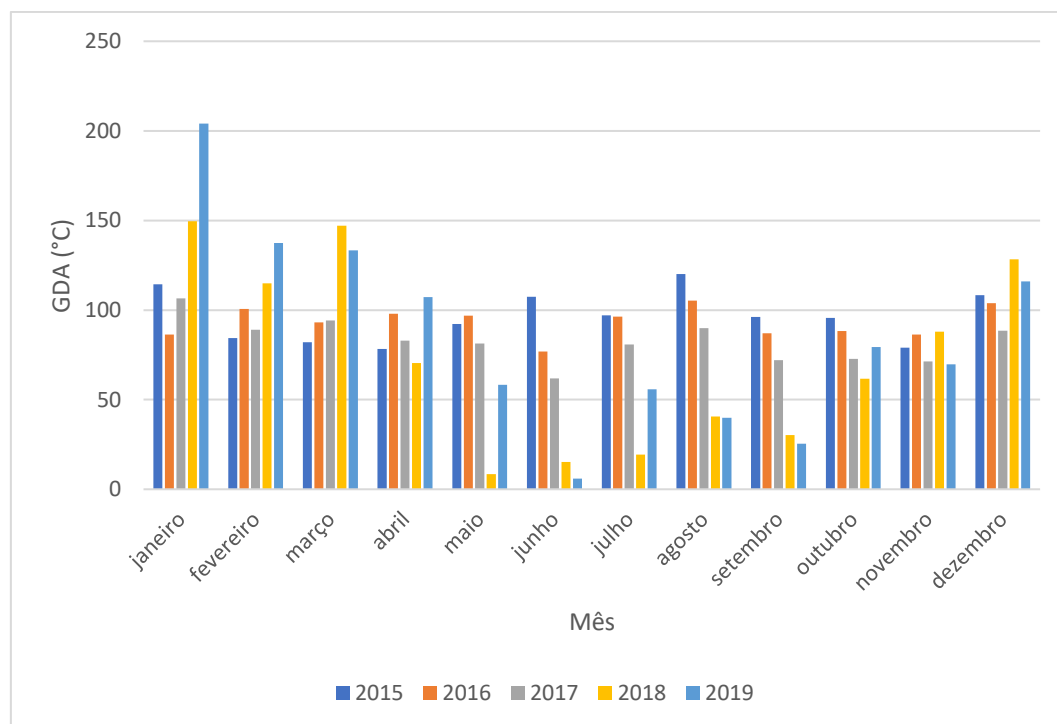


Figura 5.3: GDA

Essa indicação pode ter forte ligação com o consumo de energia e por isso será considerada no lugar da temperatura para a elaboração da linha de base.

Além dos dados de temperatura, outra variável importante trazida pelo capítulo 2, para estudos de eficiência energética em sistemas de AVAC, é a ocupação, porém por se tratar de uma fábrica com ambientes controlados e procedimentos de produção pré-definidos, a ocupação é sempre a mesma nas áreas produtivas, pois o número de operadores em cada ambiente é fixo. Como a ocupação é fixa, o que faz com que o consumo energético da fábrica possa oscilar é o ritmo da produção, pois há períodos de maior produção e outros em que o ritmo produtivo cai, logo para esse trabalho os dados de produção serão considerados como variável para a aplicação do modelo conceitual.

Os dados de produção foram coletados com base em análises do planejamento de produção dos últimos anos, trata-se de uma fábrica de comprimidos com demandas de produção predominantemente de segunda a sexta-feira, as salas de produção são abastecidas pelo sistema de refrigeração e possuem controle de temperatura, por isso quanto maior o trabalho das máquinas e a movimentação dos operadores, maior o esforço do sistema AVAC para manter a temperatura da sala no *set point* e por consequência, maior o consumo de energia das máquinas do sistema HVAC. Os dados serão apresentados em unidades farmacêuticas¹ e escalonados para manter sua significância, mas descaracterizá-los devido as questões de confidencialidade da empresa.

¹ Unidades farmacêuticas representa o produto produzido pela indústria farmacêutica, e.g. doses de um imunobiológico, comprimidos, dentre outros

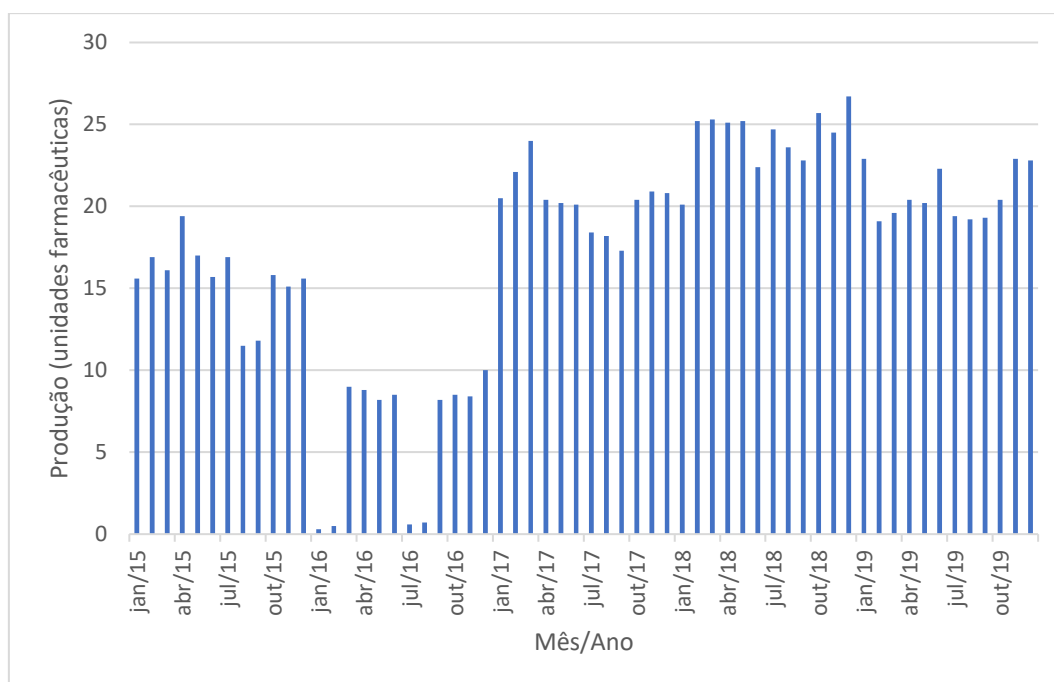


Figura 5.4: Dados de produção

Na figura 5.4 são apresentados os dados de produção obtidos. Por meio da análise das informações passadas pela empresa foi constatado que devido aos contratos e demandas solicitadas, a fábrica de fato trabalhou durante esse período em capacidades abaixo do limite de produção.

De posse dos dados consumo de energia, GDA e produção da indústria farmacêutica, a linha de base pôde ser elaborada com base em modelos de regressão dinâmica, que são a combinação da dinâmica das séries temporais e o efeito de variáveis explicativas. Para a determinação do modelo foi utilizado o software Forecast Pro for Windows (FPW).

De acordo com o manual do software FPW um modelo de regressão é muito mais difícil de ajustar aos dados históricos do que um modelo Box-Jenkins por vários motivos. Em primeiro lugar, a parte dinâmica do modelo (variável dependente defasada e termos de Cochrane-Orcutt) deve ser determinada termo a termo com base em testes de hipóteses, em vez de automaticamente. Em segundo lugar, não há termos de erro de média móvel na regressão dinâmica; se forem necessários, devem ser aproximados por complexidade adicional no modelo de regressão dinâmica. Terceiro, a parte explicativa do modelo adiciona uma camada adicional de complexidade sobre o caso univariado. Além disso, a distribuição defasada das variáveis explicativas também deve ser considerada. Como resultado,

pode haver centenas de termos específicos que devem ser considerados em um modelo específico.

Esta situação complexa exige uma estratégia ordenada e sistemática. Os diagnósticos de regressão do Forecast Pro são modularizados em três baterias de testes voltados para duas fases do processo de desenvolvimento do modelo. Essas fases são: desenvolvimento do modelo dinâmico; e desenvolvimento do modelo explicativo.

O software realiza uma sequência de testes de regressão dinâmica e fornece diagnósticos específicos para o modelo em estudo, sendo a maioria dos diagnósticos estatísticas qui-quadrado baseadas em testes do multiplicador de Lagrange.

Ainda de acordo como o manual do software cada diagnóstico testa uma deficiência específica no modelo. No entanto, eles não são independentes um do outro. Uma deficiência em uma área específica pode fazer com que várias outras estatísticas de teste também se tornem significativas. Por isso, é melhor encontrar o teste em que a hipótese nula é rejeitada com a maior probabilidade e fazer essa alteração específica. Em seguida, reexaminar o diagnóstico do modelo alterado.

No FPW ainda é possível realizar testes para verificar eventuais problemas na especificação das variáveis independentes. A tabela 5.2 apresenta os testes e suas descrições baseada nas informações do manual do software.

Tabela 5.2: Testes para verificação de variáveis independentes

| Teste | Descrição |
|-----------------------------------|---|
| Variáveis excluídas | Um teste do multiplicador de Lagrange é calculado para cada variável inativa no script |
| Tendência temporal | A hipótese alternativa é que uma tendência de tempo linear melhora o modelo. Um teste significativo não indica necessariamente que uma variável de tendência de tempo deva ser adicionada. O problema geralmente reside na dinâmica do modelo ou na exclusão de alguma outra variável |
| Termo constante | A hipótese alternativa é que um termo constante melhora o modelo. |
| Variáveis independentes defasadas | Um teste é feito para cada variável independente agora presente no modelo. A hipótese alternativa é que sua primeira defasagem também deve estar no modelo. |

Fonte: Manual FPW.

Para a elaboração da linha de base foram considerados os dados de GDA, Produção e Consumo no período pré-AEE de janeiro/2015 até março/2016. Os dados foram inseridos na mesma planilha e formatados de forma a permitir que o

FPW pudesse ser utilizado para geração do modelo. Os dados de consumo e produção eram mensais, os dados de GDA foram obtidos através de dados horários de temperatura e trabalhados para uma medida mensal de GDA.

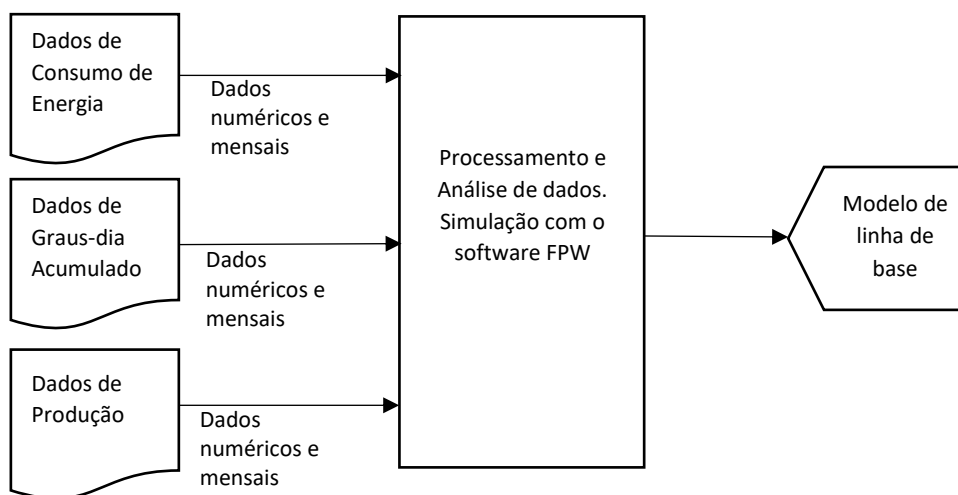


Figura 5.5: Fontes de dados usados para gerar o modelo de linha de base

As variáveis foram inseridas no FPW e partir daí foram realizados diversos testes nas variáveis para obtenção do modelo da linha de base. Esses testes consistem em verificar por meio da estatística-T os parâmetros fornecidos pelo FPW para avaliar se todas as variáveis envolvidas servem ou não para o modelo, por fim os parâmetros indicados para a elaboração da linha de base foram a variável *PROD*, que representa os dados de produção, e uma constante. A variável *GDA* considerada inicialmente na simulação não se mostrou significativa após a adição do termo constante, esse termo foi indicado pelo próprio software durante a simulação. A tabela 5.3 apresenta os valores de significância para o teste considerando as variáveis *PROD*, *GDA* e *_CONST*.

Tabela 5.3: variáveis *PROD*, *GDA* e *_CONST*

| Variável | Coefficiente | Estatística-T | Significância (1 - <i>p</i> -value) |
|----------|--------------|---------------|--|
| PROD | -1464,919 | -1,257 | 0,767 |
| GDA | 27498,395 | 10,697 | 1,000 |
| _CONST | 900009,155 | 7,477 | 1,000 |

A tabela 5.4 apresenta os coeficientes selecionados através do FPW após a retirada da variável *GDA* devido ao seu baixo nível de significância e nova simulação considerando apenas as variáveis *PROD* e *_CONST*.

Tabela 5.4: Variáveis e seus coeficientes para LB

| Variável | Coeficiente | Estatística-T | Significância (1 - p-value) |
|----------|-------------|---------------|--------------------------------|
| PROD | 27803,049 | 10,629 | 1,000 |
| _CONST | 755850,247 | 20,234 | 1,000 |

Com os dados da tabela 5.4 tem-se que o modelo é representado pela equação 5.3.

$$\text{Consumo}_t = 27803,049 * \text{Produção}_t + 755850,247 \quad (5.3)$$

A tabela 5.5 mostra 3 métricas estatísticas utilizadas como indicadores para a avaliação do ajuste da equação proposta como modelo para a linha de base, o MAPE, o R^2 e o CV. Pode-se concluir que o modelo possui um bom ajuste, visto que o MAPE e o CV ficaram abaixo de 5% e o R^2 foi alto, sendo maior que 75% conforme solicitado no capítulo 2.

Tabela 5.5: Métricas estatísticas

| Métrica | Valor |
|---------|--------|
| R^2 | 89,68% |
| MAPE | 4,29% |
| CV | 4,69% |

A fim de avaliar os resíduos do modelo proposto para a linha de base foram utilizadas duas métricas para confirmar que os resíduos se comportam como um ruído branco, o método de Durbin-Watson e Ljung-Box. A análise do valor de Durbin-Watson indica uma autocorrelação positiva dos resíduos, porém a análise gráfica da Função de Autocorrelação, figura 5.6, demonstra que nenhum *lag* ultrapassou os limites de confiança, além disso o teste Ljung-Box reforça a confirmação de que os resíduos não apresentam autocorrelação, porque o p-valor apresentou valor superior ao nível de significância de 0,05 não rejeitando a hipótese nula de que os resíduos seguem um resíduo branco. Os valores de Durbin-Watson e Ljung-Box estão apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Teste de Durbin-Watson e Ljung-Box

| Métrica | Valor |
|---------------|-------|
| Durbin-Watson | 1,243 |
| p-valor | 0,603 |

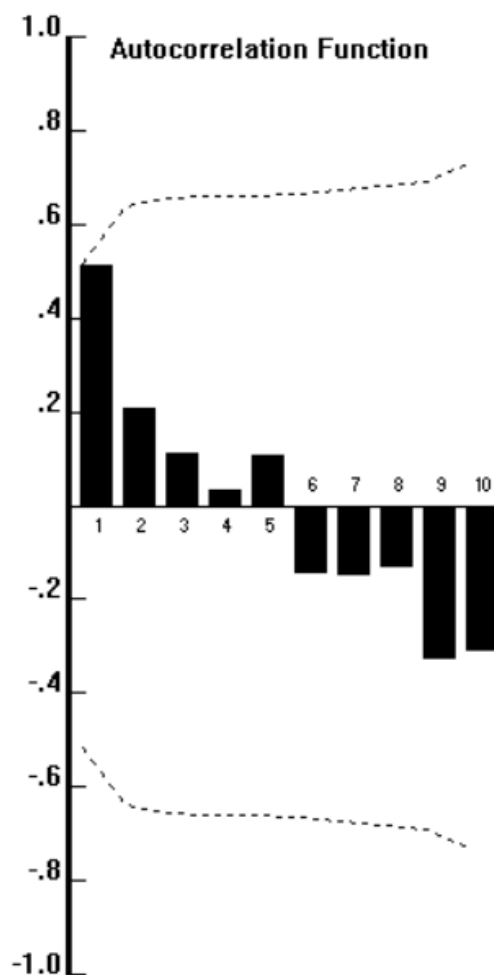


Figura 5.6: FAC dos resíduos

Com o modelo da linha de base bem estabelecido, se tornou possível a projeção da LB com base nos valores de produção para o período após a implementação das ações de eficiência energética para se determinar a economia de energia alcançada pela AEE. A figura 5.7 apresenta o gráfico da linha de base projetada para o período após a AEE, foi considerado para a LB o período entre jan/2015 e mar/2016, para a implementação da AEE o período de abr/2016 até dez/2016 e para o período de verificação da eficácia da AEE o período de jan/2017 até dez/2019.

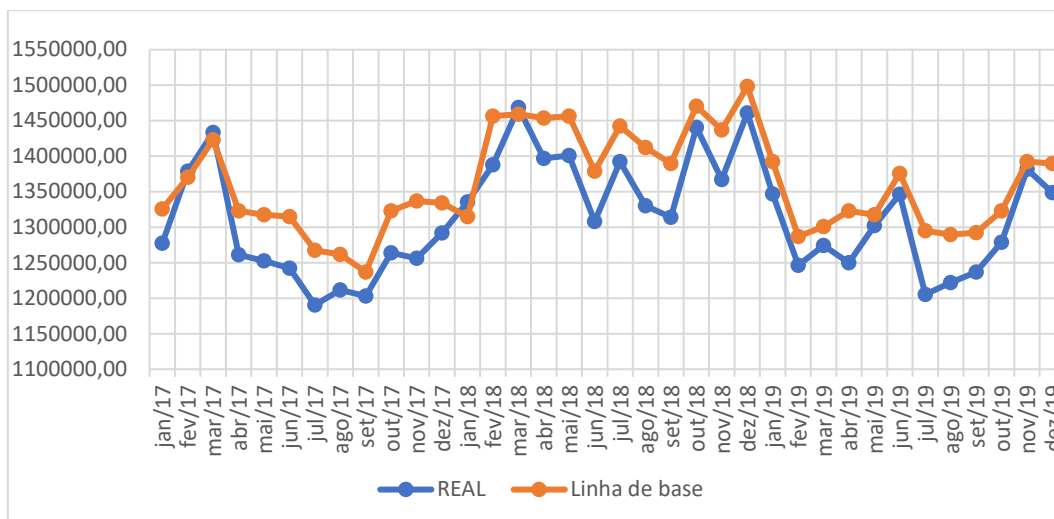


Figura 5.7: Projeção da linha de base para o período pós-AEE

Tabela 5.7: Dados de Consumo Real versus Projetado

| Mês/Ano | Consumo (kWh) | | Redução (%) |
|---------|---------------|--------------|-------------|
| | Real | Projetado | |
| jan/17 | 1.277.556,30 | 1.325.812,75 | 4% |
| fev/17 | 1.378.933,93 | 1.370.297,63 | -1% |
| mar/17 | 1.433.316,60 | 1.423.123,42 | -1% |
| abr/17 | 1.261.049,04 | 1.323.032,45 | 5% |
| mai/17 | 1.252.484,64 | 1.317.471,84 | 5% |
| jun/17 | 1.242.068,96 | 1.314.691,53 | 6% |
| jul/17 | 1.190.476,08 | 1.267.426,35 | 6% |
| ago/17 | 1.211.649,60 | 1.261.865,74 | 4% |
| set/17 | 1.203.124,52 | 1.236.843,00 | 3% |
| out/17 | 1.263.820,36 | 1.323.032,45 | 5% |
| nov/17 | 1.256.096,80 | 1.336.933,97 | 6% |
| dez/17 | 1.291.746,88 | 1.334.153,67 | 3% |
| jan/18 | 1.335.459,35 | 1.314.691,53 | -2% |
| fev/18 | 1.387.763,66 | 1.456.487,08 | 5% |
| mar/18 | 1.468.364,62 | 1.459.267,39 | -1% |
| abr/18 | 1.397.063,57 | 1.453.706,78 | 4% |
| mai/18 | 1.401.059,59 | 1.456.487,08 | 4% |
| jun/18 | 1.308.082,51 | 1.378.638,55 | 5% |
| jul/18 | 1.392.574,37 | 1.442.585,56 | 4% |
| ago/18 | 1.330.017,33 | 1.412.002,21 | 6% |
| set/18 | 1.314.123,03 | 1.389.759,77 | 6% |
| out/18 | 1.440.449,99 | 1.470.388,61 | 2% |
| nov/18 | 1.367.002,23 | 1.437.024,95 | 5% |
| dez/18 | 1.461.034,94 | 1.498.191,66 | 3% |
| jan/19 | 1.346.987,73 | 1.392.540,07 | 3% |
| fev/19 | 1.246.118,52 | 1.286.888,48 | 3% |
| mar/19 | 1.274.164,56 | 1.300.790,01 | 2% |

Tabela 5.7: Dados de Consumo Real versus Projetado

| Mês/Ano | Consumo (kWh) | | Redução (%) |
|---------|---------------|--------------|-------------|
| | Real | Projetado | |
| abr/19 | 1.250.016,51 | 1.323.032,45 | 6% |
| mai/19 | 1.302.025,56 | 1.317.471,84 | 1% |
| jun/19 | 1.346.607,60 | 1.375.858,24 | 2% |
| jul/19 | 1.205.463,20 | 1.295.229,40 | 7% |
| ago/19 | 1.221.961,44 | 1.289.668,79 | 6% |
| set/19 | 1.236.836,52 | 1.292.449,09 | 4% |
| out/19 | 1.278.689,76 | 1.323.032,45 | 3% |
| nov/19 | 1.381.676,40 | 1.392.540,07 | 1% |
| dez/19 | 1.348.669,44 | 1.389.759,77 | 3% |

A tabela 5.7 apresenta a redução percentual dos valores reais em relação aos valores projetados, com isso é possível notar que houve uma redução média de 4% (média de 46,63MWh) no consumo de energia total da empresa após a implementação das ações de eficiência energética, considerando que a AEE foi realizada apenas no sistema de AVAC o índice de 4% no consumo total da empresa é uma marca significativa e positiva.

5.2.2

Projeto de Geração distribuída – Solar fotovoltaica

Com base nos critérios de definição e nas tecnologias apresentadas por Khetrupal (2020), foi adotado, para este trabalho, a avaliação de um projeto de geração distribuída utilizando a energia solar fotovoltaica como fonte de energia renovável. Essa escolha é perfeitamente justificável devido ao fato da existência dos incentivos governamentais e por possibilitarem a instalação sobre os telhados ou outros locais dentro do local onde a energia será utilizada, além de ser um sistema modular e leve (Gehlot *et al.*, 2016). Além disso de acordo com a 2ª edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar publicado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) o Brasil possui um alto nível de irradiação solar com baixa variação ao longo do ano, o que reforça a escolha por uma usina de geração solar fotovoltaica para o estudo, pois garante maior possibilidade de alcançar a demanda necessária.



Figura 5.8: Níveis de irradiação solar por região do Brasil.

Fonte: 2ª edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar publicado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

O projeto para instalação da usina de geração distribuída utilizando a fonte de solar fotovoltaica foi considerado como uma das ações a serem realizadas dentro do projeto de gestão de energia como opção para uma segunda fase, visando promover o aumento na redução dos gastos com energia na empresa.

O planejamento para o projeto de geração distribuída foi realizado com base no consumo médio do sistema AVAC, pois a área já havia passado por *retrofit* e também devido ao espaço físico disponível para a instalação dos painéis solares não

seria possível abranger todo o consumo de energia da empresa, logo como o sistema de AVAC compreende cerca de 30% do consumo da fábrica, a redução no gasto com energia elétrica seria significativa.

Com base nos dados de consumo do sistema de AVAC da tabela 5.1 foi adotado para projeto um alvo de 300MWh. Para os estudos a respeito do tamanho do parque solar foi utilizado o site <https://globalsolaratlas.info/>, pois através dele é possível realizar estudos a fim de determinar a potência a ser instalada para que a geração de energia alcance o alvo proposto de 300MWh. A figura 5.9 representa o gráfico fornecido pelo site do *Global Solar Atlas* para a estimativa de geração ao longo do ano de um parque com potência instala de 3MWp.

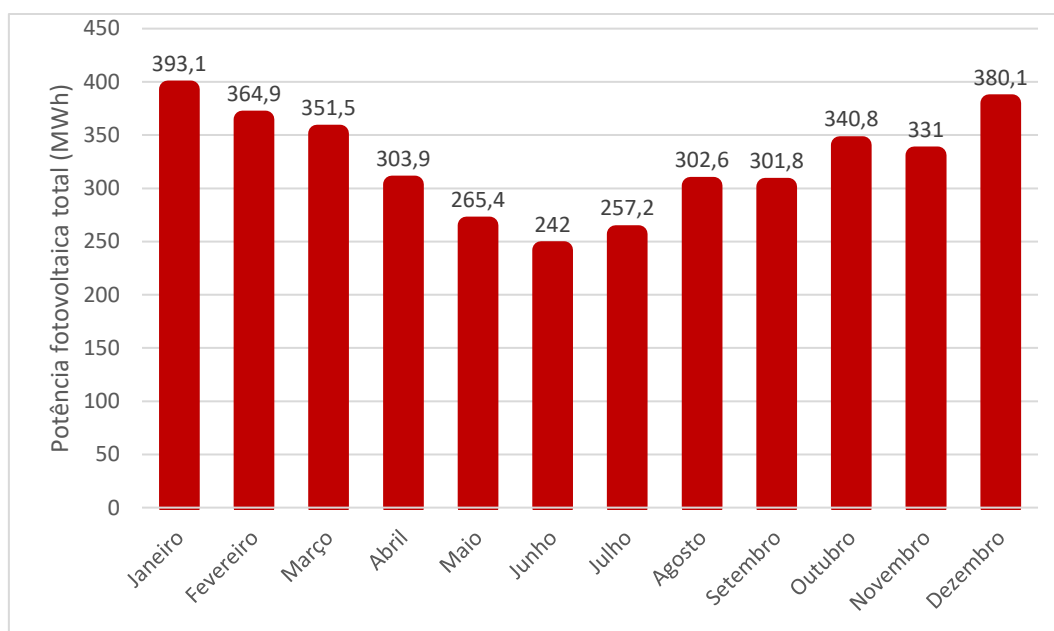


Figura 5.9: Estimativa de geração do parque solar fotovoltaico

É possível notar que a geração de energia média anual é de 319,53MWh estando um pouco acima do alvo do projeto, o que garante maior segurança de atingimento da meta de redução de gastos com a energia elétrica na empresa. Com base no tamanho do parque solar fotovoltaico foi levantado o orçamento com uma empresa especializada em instalação de usinas geradoras de energia solar fotovoltaica e o custo total do investimento para material, instalação, homologação junto a concessionária e manutenção foi de R\$ 10,5 milhões.

A segunda fase do modelo conceitual apresentado no capítulo 4 trata da avaliação financeira do projeto de gestão energética, com essa avaliação é possível

determinar a viabilidade financeira do projeto e para isso a abordagem de opções reais foi utilizada.

Marques, Bastian-Pinto e Brandão (2021) publicaram em seu trabalho um tutorial para modelar árvores binomiais de opções reais a partir da projeção de fluxo de caixa, os autores ainda tornaram público o código desenvolvido por eles em um software aberto para a execução do modelo com o objetivo de tornar o processo intuitivo e de fácil utilização por pesquisadores e profissionais. Este tutorial serviu como base para o desenvolvimento desta fase da aplicação do modelo proposto.

Partindo do investimento no projeto de geração distribuída, o preço da tarifa de energia foi considerado a maior fonte de incerteza do projeto, logo, assim como no tutorial, ele foi tratado como uma variável estocástica que segue o Movimento Geométrico Browniano (MGB). Utilizando o código disponibilizado por Marques, Bastian-Pinto e Brandão (2021), escrito no software de estatística R, o preço da tarifa de energia foi determinado usando a Simulação de Monte Carlo, caso não fosse realizada o preço projetado teria valores aumentados de forma linear ao longo do tempo. A tabela 5.8 apresenta os parâmetros considerados para a simulação do preço da tarifa energia.

Tabela 5.8: Parâmetros para simulação do preço da energia

| Descrição | Valor |
|--------------------------|---------------|
| Tempo de depreciação | 25 |
| Taxa de aumento do preço | 7,4% |
| Volatilidade do preço | 11,2% |
| Preço no tempo zero | R\$961,54/MWh |
| Número de simulações | 10.000 |

O tempo de depreciação foi considerado como o tempo de vida útil do parque solar, onde as placas solares possuem garantia de 25 de anos, a taxa de aumento do preço foi calculada como a média dos Log retornos dos preços da tarifa de energia presentes na tabela 5.9, e é uma taxa anual, a volatilidade do preço foi calculada como o desvio padrão amostral desses Log retornos dos preços da tarifa de energia.

O preço da tarifa foi coletado com base no Relatório de Consumidores, Consumo, Receita e Tarifa Média – Empresa, Classe de Consumo e Nível de Tensão fornecido pela ANEEL, onde estão disponíveis os valores da Tarifa Média de Fornecimento com Impostos de 2003 até 2021. A tabela 5.10 apresenta os preços da tarifa retirados do relatório da ANEEL. Como resultado da projeção dos preços tarifários através da simulação de Monte Carlo, o código forneceu uma tabela com 26 colunas e 10.000 linhas, sendo cada coluna para os períodos $t = 0$ até $t = 25$ e as 10.000 linhas representam o número de simulações.

Tabela 5.9: Tarifa Média de Fornecimento com Impostos

| Ano | Tarifa (R\$/MWh) |
|------|------------------|
| 2003 | 255,33 |
| 2004 | 271,43 |
| 2005 | 300,62 |
| 2006 | 385,57 |
| 2007 | 393,75 |
| 2008 | 398,38 |
| 2009 | 409,22 |
| 2010 | 406,1 |
| 2011 | 417,96 |
| 2012 | 447,21 |
| 2013 | 403,93 |
| 2014 | 404,86 |
| 2015 | 606,65 |
| 2016 | 703,19 |
| 2017 | 705,99 |
| 2018 | 824,99 |
| 2019 | 845,23 |
| 2020 | 894,15 |
| 2021 | 961,54 |

Após a simulação do preço da energia (tarifa), fez-se a estimativa da receita do projeto e para tal considerou-se a produção como a quantidade média de energia que se deixaria de consumir da concessionária com a implementação do parque solar fotovoltaico, logo o valor do parâmetro produção foi de 300 MWh de. Não foi

considerada a queda de rendimento de geração das placas para esse parâmetro, nem a troca dos inversores ao longo do tempo. A equação 5.3 representa o cálculo realizado no software para a estimação da receita do projeto.

$$\tilde{R}_t = Q\tilde{P}_t \quad (5.3)$$

R_t é a receita, Q é a produção e P_t é o preço da energia, o \sim é um indicador de variável estocástica. A receita também é fornecida como uma matriz 10.000x26, assim como o preço.

Com a receita calculada, o próximo passo é o cálculo do fluxo de caixa do projeto. Marques, Bastian-Pinto e Brandão (2021) consideraram para a determinação do fluxo de caixa os parâmetros: taxa livre de risco, taxa de perpetuidade, taxa de desconto, custos variáveis, custos fixos, investimento, investimentos extras e imposto de renda, porém devido as características do projeto de geração distribuída e da empresa onde ele será implementado, apenas os parâmetros taxa livre de risco, taxa de desconto e produção foram considerados. A equação 5.4 representa o cálculo realizado pelo software para estimar o fluxo de caixa.

$$F_t = [R_t(1 - \gamma) - \lambda_t - \Gamma](1 - \pi) + \lambda_t \quad (5.4)$$

Onde:

F_t = fluxo de caixa

R_t = receita total anual

γ = representa os custos variáveis

π = imposto de renda

λ = depreciação anual

Γ = representa os custos fixos

Como os parâmetros envolvidos na equação 5.4 não foram considerados com exceção da receita, temos que o fluxo de caixa calculado é igual a R_t . O próximo passo foi calcular o valor presente e para a execução do código a taxa livre de risco adotada foi 6% e a taxa de desconto igual a 12%, o cálculo foi realizado com base na equação 5.5 e com o auxílio do pacote desenvolvido por Signorell *et*

al. (2016), para o software R. O resultado encontrado para o valor presente do projeto V_0 é R\$ 57.571.673,00, que é o valor médio dos valores presentes projetados para o fluxo de caixa.

$$V_0 = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{F_t}{(1-\mu)^t} \quad (5.5)$$

V_0 é o valor presente do projeto em $t = 0$ e μ é a taxa de desconto ajustada ao risco. Considerando o valor investido de R\$10,5 milhões e um custo de operação e manutenção (O&M) de 5% do valor do investimento, tem-se que o valor presente líquido (VPL) do projeto será positivo:

$$\text{VPL} = \text{R\$}57.571.673,00 - \text{R\$}10.500.000,00 - \text{R\$}525.000,00 = \text{R\$}46.546.673,00 \quad (5.6)$$

Após o cálculo do valor presente do projeto (V_0), a próxima etapa foi calcular a volatilidade do projeto. Com base na SMC tem-se que a volatilidade do projeto é o desvio padrão dos valores de Z . A volatilidade estimada foi 11,24%.

A próxima etapa para a elaboração da árvore binomial é o cálculo dos parâmetros u , d e p , conforme equações 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente. O resultado obtido por meio do software foi $u = 1,119$; $d = 0,894$; e $p = 0,738$. Com esses parâmetros definidos foi possível gerar a árvore binomial para valores antes e após a subtração do fluxo de caixa. Os apêndices II e III demonstram essas árvores. No apêndice III é possível notar que os últimos valores da árvore estão zerados, isso se deu devido ao fato deste trabalho não considerar a perpetuidade do projeto, diferente do modelo proposto por Marques, Bastian-Pinto e Brandão (2021), logo como na árvore binomial após o desconto do fluxo de caixa, o último valor seria o da perpetuidade, ele ficou zerado.

Com a árvore binomial elaborada, a etapa seguinte foi a modelagem da opção real. Para esse trabalho foi considerada apenas a opção de expansão, que daria ao gestor a opção de decisão sobre investir ou não no projeto de geração distribuída com fonte solar fotovoltaica a qualquer momento pelos próximos 25 anos, pois trata-se de uma opção de compra americana. O exercício da expansão, ou seja, o investimento no projeto de geração distribuída traria o aumento na economia de energia elétrica consumida da concessionária em 300 MWh, logo o

fator de expansão de acordo com a equação 5.7 seria de 7,44. Para economia atual foi considerada a economia atingida na fase I do projeto de gestão energética.

$$\text{Fator de Expansão} = \frac{\text{Economia atual} + \text{economia futura}}{\text{Economia atual}} \quad (5.7)$$

Os apêndices IV e V representam as árvores binomiais obtidas do software após o exercício da opção de expansão. É possível notar que o valor inicial no primeiro nó da árvore binomial do Apêndice V é de R\$417.833.247,19, o que resulta em um aumento significativo em relação ao valor sem o exercício da opção, demonstrando assim que a execução do projeto de geração distribuída é viável e pode ser exercida nos pontos mostrados na árvore.

5.3.

Discussão dos resultados e considerações sobre o capítulo

Os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo conceitual proposto para a avaliação técnico-financeira de projetos para gestão de energia trazem algumas discussões importantes, além de demonstrar o potencial do modelo.

A primeira delas é que o estudo e o planejamento do escopo do projeto de gestão de energia é fundamental para a correta execução e avaliação de sua viabilidade financeira, pois os investimentos nessa área costumam ser altos e por isso é necessário meios de avaliação que incluam as incertezas na avaliação de um ativo real.

A segunda é que de forma geral o modelo de regressão dinâmica se mostrou satisfatório para a realização da Medição & Verificação da ação de eficiência energética da fábrica, produzindo métricas estatísticas relacionadas às incertezas do modelo abaixo de 5%, que refletem um bom ajuste do modelo aos dados reais permitindo uma melhor determinação da redução do consumo de energia. Dessa forma a aplicação do modelo de M&V proposto permitiu a determinação de que o *retrofit* empregado no sistema de AVAC proporcionou uma redução média de consumo de energia elétrica pela fábrica de 4%. Em relação ao próprio sistema de AVAC não houve como determinar o percentual de redução em relação ao período antes da AEE, pois não havia equipamentos de medição específicos para as máquinas do sistema de AVAC, mas levando em conta que o sistema de refrigeração representa aproximadamente 1/3 da energia consumida pela fábrica,

pode-se estimar que a redução de consumo do sistema de AVAC ficou em torno de 12%.

Outra consideração importante a ser feita é a respeito da avaliação financeira, pois uma vez que o VPL do investimento é positivo, a OR também o é. As opções reais permitem ao tomador de decisão enxergar diferentes cenários facilitando a avaliação entre esperar ou não para se realizar um investimento. Caso o VPL deste projeto fosse negativo, a OR poderia ter valor. Esta ferramenta poderia ajudar muito no contexto atual de mudança regulatório da GD, pois os fluxos de receitas devem reduzir ao longo dos anos por conta do PL 5829.

No caso de investimentos em projetos é importante notar que como não há comercialização no mercado, não há como determinar o valor real e as características de risco-retorno, logo considera-se que o valor do projeto é o próprio valor presente (V_0) do projeto (Marques, Bastian-Pinto e Brandão, 2021).

Os resultados obtidos através da análise financeira com opções reais, considerando a opção americana de expansão, onde o gestor pode executar a opção a qualquer momento revelou que a segunda etapa do projeto de gestão de energia é viável, pois o valor presente obtido ao retroagir a árvore binomial, por meio da opção de expansão foi significativamente maior que o VP sem o exercício da opção.

Outro ponto que vale ser ressaltado é em relação as incertezas, pois conforme dito no capítulo três existem 3 tipos de incerteza de acordo com Trigeorgis (1995) e Dias (2014), as incertezas econômicas, as técnicas e as estratégicas. A incerteza técnica no estudo realizado vem da Medição & Verificação dos valores de economia de energia alcançados com a implementação da AEE na primeira etapa do projeto, por isso a importância de se desenvolver um modelo bem ajustado, com baixo nível de incerteza em sua estimação, as incertezas econômicas são refletidas nas volatilidades tanto do preço da tarifa, quanto no preço do projeto e as incertezas estratégicas estão relacionadas ao comportamento da empresa em relação ao mercado e a novos investimentos. Logo, pode-se concluir que a abordagem de opção real pode englobar todos os três tipos de incerteza, combinando-os no momento de elaboração da árvore binomial ao se criar cenários de sucesso e fracasso, permitindo que o gestor responsável pela tomada de decisão possa atuar ciente dos riscos envolvidos no exercício ou não do investimento.

Com base na aplicação ao longo desse capítulo do modelo conceitual proposto no capítulo 4 é possível concluir que o modelo indicado funciona bem

como ferramenta técnico-financeira para avaliação de projetos para gestão de energia, uma vez que permite a modelagem de fases anteriores de forma satisfatória a fim de se obter dados para avaliação financeira de fases futuras do projeto de gestão.

6 Conclusão

O objetivo geral da dissertação foi propor uma ferramenta técnico-financeira para mensurar a energia conservada em projetos para a gestão de energia, buscando modelar as incertezas relacionadas ao processo de Medição e Verificação da performance e ao investimento no projeto.

Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre as principais referências em métodos de Medição & Verificação aplicados em projetos para gestão de energia a fim de levantar não só os guias que norteiam o processo de M&V, mas também identificar e analisar os métodos adotados para definição de linha de base para comprovação da energia elétrica conservada em projetos para a gestão de energia.

O resultado desse levantamento proporcionou o entendimento de que há diferentes abordagens para a estruturação da M&V, sendo a utilizada por esse trabalho a opção C do ÌMVP, que considera a implementação da M&V em toda a instalação. Além disso a comparação entre os guias proporcionou a escolha das duas métricas estatísticas utilizadas para avaliar o modelo de linha de base proposto. A ocupação e a temperatura externa foram apontadas como os parâmetros mais comuns para estudos em sistemas de AVAC, porém devido às características a empresa em que o estudo empírico foi realizado a ocupação foi alterada para produção, pois por se tratar de uma fábrica a ocupação das áreas é fixa, variando assim em períodos com mais ou menos produção, já o parâmetro temperatura não se mostrou significativo para a construção do modelo da linha de base, isso se deu devido às características construtivas da fábrica, pois as salas de produção são geralmente construídas nas áreas centrais dos prédios, sem contato com o ambiente externo e os prédios possuem parede espessas, o que gera maior isolamento das salas de produção. Através da análise dos métodos utilizados para construção da linha de base, foi adotado o modelo de regressão dinâmica.

Outro levantamento realizado foi a respeito das Opções Reais para análise de investimento, sendo avaliado os conceitos de risco e incerteza e as aplicações de OR em projetos para gestão de energia, que revelou ser perfeitamente aplicável para os investimentos em projetos para gestão de energia.

Com base no referencial teórico dos capítulos 2 e 3 foi proposto um modelo conceitual visando abranger as questões técnicas da determinação da energia conservada para o caso de uma etapa já implementada de eficiência energética do projeto de gestão somadas à avaliação de um possível investimento em um parque de geração distribuída utilizando fonte solar fotovoltaica como segunda etapa do projeto de gestão energética. Como dito anteriormente para a parte técnica foi adotado um modelo de regressão dinâmica e para a etapa de avaliação financeira o modelo proposto se alimentava de informações da etapa técnica para gerar a árvore binomial de opções reais sendo considerada no modelo a opção americana de expansão.

Foi feita a aplicação do modelo conceitual proposto no capítulo 4 utilizando um estudo de caso onde uma indústria farmacêutica implementou, como parte de um projeto de gestão de energia, medidas de eficiência energética realizando *retrofit* no sistema de AVAC e instalando medidores inteligentes que possibilitam medir a energia consumida pelo sistema de AVAC. A segunda etapa do estudo de caso aplicado ao modelo proposto foi a possibilidade de investimento em um projeto de geração distribuída para aumentar a economia da empresa com os gastos em energia elétrica. Foi observado que o modelo proposto possibilita a avaliação técnico-financeira de forma satisfatória, pois a parte financeira do modelo recebe, como entrada, os resultados provenientes da parte técnica do modelo e ao se utilizar Opções Reais como método de avaliação as incertezas técnicas são englobadas na análise por meio da elaboração da árvore binomial de opções reais, possibilitando medir o valor da opção de expansão dentro de um projeto para gestão de energia.

Contudo a proposta apresentada nesse trabalho não é exaustiva. Um ponto importante observado ao longo desse trabalho foi que há o uso do termo precisão no PIMVP devido a tradução do termo “*accuracy*” da versão em inglês, porém do ponto de vista metrológico esse termo não deve ser utilizado com a finalidade pretendida, devendo ser substituído pelo termo exatidão de acordo com as

definições estabelecidas no Vocabulário Internacional de Metrologia. Uma avaliação mais ampla no âmbito da eficiência energética pode ser realizada, levando-se em consideração mais parâmetros que possam contribuir para a formação da linha de base, como o consumo dos ar condicionados de janela ou do tipo split, ou ainda diferentes tipos de investimentos a serem associados a parte técnica, considerando outros parâmetros financeiros, como o tempo de depreciação dos inversores, placas solares e os custos para troca dos inversores, para tornar ainda mais real e exata a avaliação financeira poderiam ser objeto de futuros trabalhos e um grande avanço dentro do tema.

Referências bibliográficas

AHMAD M. W., MOURSHED M., REZGUI Y. **Trees vs Neurons: Comparison between random forest and ANN for high-resolution prediction of buildings energy consumption.** Energy and Buildings, v 147, p. 77-89, 2017.

AMRAM M., KULATILAKA N. **Real options: Managing strategic investment in an uncertain world.** Harvard Business School Press, Boston, 1999.

ANDRADE, E. L. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para análise de decisões.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 5ed, 2017, 646p.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição.** <https://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>. Acessado em: 05/08/2021

ARAUJO T. G. **Ajuste das Séries de Carga de Energia Elétrica Influenciadas pelos Ofensores Calendário e Temperatura.** Rio de Janeiro, 2013. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – PUC-Rio.

ARAYA, *et al.* **An ensemble learning framework for anomaly detection in building energy consumption.** Energy and Buildings, v 144, p. 191-206, 2017.

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Guideline 14 - Measurement of Energy, Demand, and Water Savings.** 145 p. 2014.

AYDINALP-KOKSAL M., UGURSAL V. I. **Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector.** Applied Energy, v. 85, p. 271-296, 2008.

BACKLUND S., *et al.* **Extending the energy efficiency gap.** Energy Policy, v 51 p. 392–396, 2012.

BAIDYA, T.K.N., CASTRO, A. L. **Convergência dos Modelos de Árvores Binomiais para Avaliação de Opções.** Pesquisa Operacional, v 21, n 1, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

BARROS M., SOUZA R. C. **Regressão Dinâmica.** Núcleo de Estatística Computacional. PUCRio, 1995.

BERNARDI E., *et al.* **Fault-tolerant energy management for an industrial microgrid: A compact optimization method.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 124, sem paginação, 2021.

BRANDÃO, L. E. T., DYER, J. S., HAHN, W. J. **Volatility estimation for stochastic project value models.** European Journal of Operational Research, 220(3), 642- 648, 2012.

BREALEY R., MYERS S. C. **Princípios de Finanças Empresariais.** Portugal. 753 p. Editora Mc Granw Hill, 1992.

BUNSE K., *et al.* **Integrating energy efficiency performance in production management gap analysis between industrial needs and scientific literature.** Journal of Cleaner Production, v. 19, p. 667-679. 2011.

BURKHART M. C., HEO Y., ZAVALA V. M. **Measurement and verification of building systems under uncertain data: a Gaussian process modeling approach.** Energy and Buildings, v 75, p. 189-198, 2014.

CARLEY S. **Distributed generation: An empirical analysis of primary motivators.** Energy Policy, v. 37, i. 5, p. 1648-1659, 2009.

COPELAND, T.; ANTIKAROV A. **Opções Reais: Um Novo Paradigma para Reinventar a Avaliação de Investimentos.** Tradução de Maria José Cyhlar. Rio de Janeiro: Campus, 2001, 368p.

DALGLEISH A. Z., GROBLER L. J. **Measurement and verification of a motor sequencing controller on a conveyor belt.** Energy, v. 28, p. 913-927, 2003.

Dixit A. K., Pindyck R. S. **Investment Under Uncertainty.** Princeton University Press, 468P. 1994.

DONG B., CAO C., LEE S. E. **Applying support vector machines to predict building energy consumption in tropical region.** Energy and Buildings, v. 37, p. 545-553, 2005.

EIA - U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **How many smart meters are installed in the United States, and who has them.** Disponível em: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=108&t=1>. Acesso em: 13/07/2020.

EVO – EFFICIENCY VALUATION ORGANIZATION. **Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance – Conceitos e Opções para a Determinação de Economias de Energia e de Água** - vol. 1 - EVO 10000 – 1:2010 (Br). Sofia: EVO, 2012.

FLATH C. M., STEIN N. **Towards a data science toolbox for industrial analytics applications.** Computers in Industry, v. 94, p. 16–25, 2018.

GALITSKY C., CHANG S., WORREL E., MASANET E., **Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pharmaceutical Industry - An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers**. 2005, p. 17-28.

GALLAGHER C. V., *et al.* **Development and application of a machine learning supported methodology for measurement and verification (M&V) 2.0**. Energy and Buildings, v 167, p. 8-22, 2018.

GALLAGHER C. V., *et al.* **IntelliMaV: A cloud computing measurement and verification 2.0 application for automated, near real-time energy savings quantification and performance deviation detection**. Energy and Buildings, v 185, p. 26-38, 2019.

GARSTENS H. *et al.* **Measurement uncertainty in energy monitoring: Present state of the art**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 2791–2805.

GEHLOT R., *et al.* **Solar PV Integrated World Super Grid (WSG): Possibilities, Implementation Issues and Impacts**. Journal of Clean Energy

GELLINGS, C. W. **The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities**. n. 10, p. 1468–1470, 1985.

HAMER W., BOOYSEN W., MATHEWS E. **A Practical Approach to Managing Uncertainty in the Measurement and Verification of Energy**. Efficiency Savings, v. 28, p. 128–146, 2017.

HEO Y., ZAVALA V. M., **Gaussian process modeling for measurement and verification of building energy savings**. Energy and Buildings 53 (2012) 7–18

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.
<https://portal.inmet.gov.br/>. Acessado em: 15/03/2021.

JIMENEZ-GONZALEZ C., CONSTABLE D. J. C., PONDER C. S. **Evaluating the ‘Greenness’ of chemical processes and products in the pharmaceutical industry a green metrics primer**. Chemical Society Reviews, v. 41, n. 4, p. 1485–1498, 2012.

JOHANSSON, M.T., THOLLANDER, P. **A review of barriers to and driving forces for improved energy efficiency in Swedish industry– Recommendations for successful in-house energy management**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, n. 1, p. 618-628, 2018.

KAJL S., ROBERGE M.A., LAMARCHE L., MALINOWSKI P., **Evaluation of building energy consumption based on fuzzy logic and neural network applications**. Proceedings of CLIMA 2000 Conference, Bruchela, Bélgica, 1997, p. 264.

KHETRAPAL P. **Distributed Generation: A Critical Review of Technologies, Grid Integration Issues, Growth Drivers and Potential Benefits**. International Journal of Renewable Energy Development, v. 9, i. 2, p. 189-205, 2020.

KNIGHT F. H. **Risk, uncertainty and profit**. Dover Ed., 2006 (original by Houghton Mifflin Co., Coston, 381p., 1921).

LABREN - Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed. 2017. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 25/03/2021.

LAPPONI, J. C. **Projetos de Investimento na Empresa**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017, 512p.

LEE C. K. M., ZHANG S. Z., NG K. K. H. **Development of an industrial Internet of things suite for smart factory towards re-industrialization**. *Advances in Manufacturing*, v. 5, n. 4, p. 335–343, 2017.

MANJARRES D., MERA A., PEREA E., LEJARAZU A., GIL-LOPEZ S., **An energy-efficient predictive control for HVAC systems applied to tertiary buildings based on regression techniques**. *Energy and Buildings* 152 (2017) 409–417

MARQUES N. L., BASTIAN-PINTO C. L., & BRANDÃO L. E. T. **A tutorial for modeling real options lattices from project cash flows**. *Revista de Administração Contemporânea*, 25(1), e200093, 2021.

MEIRELLES J. L. F. **A Teoria de Opções Reais como Instrumento de Avaliação de Projetos de Investimentos**. São Paulo, 2004. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo.

MORGAN D. T., DALY T., GALLAGHER J., MCNABOLA A. **Reducing energy consumption and increasing filter life in HVAC systems using an aspiration efficiency reducer: Long-term performance assessment at full-scale**. *Journal of Building Engineering* 12 (2017) 267–274.

MULRENNAN K., *et al.* **A Data Science Approach to Modelling a Manufacturing Facility's Electrical Energy Profile from Plant Production Data**. *IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics*, p. 387-391, 2018.

O'DONOVAN P., *et al.* **An industrial big data pipeline for data driven analytics maintenance applications in large-scale smart manufacturing facilities**. *Journal of Big Data*, v. 2, n. 1, p. 25, 2015.

REDISKE G., *et al.* **Determinant factors in site selection for photovoltaic projects: A systematic review**. *International Journal of Energy Research*, 43, p. 1689-1701, 2019.

SAITO M. B. **Teoria de Opções Reais: Uma Aplicação Considerando-se o Valor de Flexibilidade Gerencial a Projetos de Investimento de Inovação Tecnológica**. Recife, 2010. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco

SAMED M.M.A., *et al.* **Sistema de Gestão Energética: Plano de Ação e Monitoramento Visando a Minimização do Desperdício do Uso Final de Energia em uma Pequena Indústria.** Enegep, 11 p., 2011.

SHI j., YUN., YAO W. **Energy efficient building HVAC control algorithm with real-time occupancy prediction.** Energy Procedia 111 (2017) 267 – 276

SHROUF F., GONG B., ORDIERES-MERTE J. **Multi-level awareness of energy used in production processes.** Journal of Cleaner Production, v. 142, p. 2570–2585, 2017.

SHROUF F., ORDIERES J., MIRAGLIOTTA G. **Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm.** IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, p. 697–701, 2014.

SIGNORELL, A., et al. (2016). **escTools: Tools for descriptive statistics.** R package version 0.99, 18.

TONIM G. **A Gestão de Energia Elétrica na Indústria – Seu Suprimento e Uso Eficiente.** São Paulo, 2009. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da universidade de São Paulo.

TRIGEORGIS, L. **Real Options in Capital Investment: Models, Strategies, and Applications.** Praeger Publishers, Westport, 1995.

TRONCHIN L. **The Calculation of Energy Performance of Buildings with Summer Degrees.** Advanced Materials Research, v. 689, p. 3-7, 2013.

TWAHA S., RAMLIB M.A.M., **A review of optimization approaches for hybrid distributed energy generation systems: Off-grid and grid-connected systems.** Sustainable Cities and Society n. 41, p. 320-331, 2018.

VERGARA, S. C. **Metodologia do trabalho científico.** São Paulo: Cortez, 2002.

XIA X., ZHANG J., **Mathematical description for the measurement and verification of energy efficiency improvement.** Applied Energy, v. 111, p. 247–256, 2013.

Apêndice I – Formatação dos dados para simulação no FPW

Os dados foram formatados no Microsoft Excel e avaliados no software FPW e a partir daí os resultados foram obtidos do software para elaboração da linha de base. Abaixo segue a demonstração de como os dados para a linha de base foram organizados considerando apenas o período antes da implementação de eficiência energética no sistema de AVAC.

| | A | B | C | D |
|----|----------|------------|--------|----------|
| 1 | vertical | | | |
| 2 | | CONS | GDA | PROD |
| 3 | | Consumo | GDA | PRODUÇÃO |
| 4 | | 2015 | 2015 | 2015 |
| 5 | | 1 | 1 | 1 |
| 6 | | 12 | 12 | 12 |
| 7 | | 12 | 12 | 12 |
| 8 | jan/15 | 1107922,00 | 114,4 | 15,6 |
| 9 | fev/15 | 1277652,00 | 84,46 | 16,9 |
| 10 | mar/15 | 1247900,00 | 82,1 | 16,1 |
| 11 | abr/15 | 1358474,00 | 78,24 | 19,4 |
| 12 | mai/15 | 1229737,00 | 92,18 | 17,0 |
| 13 | jun/15 | 1150984,00 | 107,48 | 15,7 |
| 14 | jul/15 | 1281473,00 | 97,12 | 16,9 |
| 15 | ago/15 | 1074466,00 | 120,08 | 11,5 |
| 16 | set/15 | 1087655,00 | 96,1 | 11,8 |
| 17 | out/15 | 1150915,00 | 95,68 | 15,8 |
| 18 | nov/15 | 1109444,00 | 78,96 | 15,1 |
| 19 | dez/15 | 1132136,00 | 108,3 | 15,6 |
| 20 | jan/16 | 707910,00 | 86,32 | 0,3 |
| 21 | fev/16 | 820457,00 | 100,62 | 0,5 |
| 22 | mar/16 | 1083390,00 | 93,06 | 9,0 |

Apêndice II – Árvore binomial com valores antes da subtração do FC

Esta é uma das saídas de código R proposto por Marques, Bastian-Pinto e Brandão (2021) que mostra a árvore binomial de valor do projeto antes da subtração do fluxo de caixa.

```
22930145.53
41806498.450
57173924.19018313553.87
69511334.3103389476.770
79239264.16045662934.8104626433.79
86726604.93055516418.9406667078.090
92296583.03063285796.906469485.79011681652.12
96232069.23069265689.9804339139.83071298119.130
98780291.39073714248.4900544286.7509126980.1109329751.75
100157016.3806857392.02055320230.8805412214.23017010108.010
100550259.6908892573.33058873148.400368061.2103262762.0507451366.2
100123575.0109992118.35061383473.87044182450.87028282572.05013585414.40
99018970.1300306188.86063008906.33047020049.37032240644.2018579203.7605951161.37
97359490.5809965409.83063887076.80024963.8505287071.91022588361.08010850224.140
95251508.02079083198.2064137914.600323143.34037553368.605749543.27014838599.6304752997.06
92786746.0807757826.41063865745.59051024509.2509154627.9208182624.99018040581.8608665717.540
90044073.07074249.99063161152.15051224845.18010191441.2409992641.700565314.2101185110203796062.59
87091087.1074105725.81062102621.24051007472.71040751599.1401271514.9102508536.6504408420.0106921023.890
83985518.29071915242.73060758004.07060444737.08010911600.8502099583.6403954137.52016424840.7909465085.8103031790.48
80776466.1809556789.9209185808.3209599323.200737992.6202546963.3504975531.5407976828.71011507531.6805527594.390
77505493.32067076474.14057436341.6108525421.66040288554.1502674751.46025636882.8309131362.63013117980.7107559453.0602421391.44
74207589.8104513509.6505552722.8407269760.5709613349.8802536096.2705994190.3109947136.4804357502.460190687.4804414708.030
70912023.82061901091.09053571776.1105872518.9908755659.9902177144.5306096250.47020475336.0205279606.75010476900.206037486.801933685.79
67643091.09267163.91051524820.5804368134.5607752804.7301637881.0605985511.1207076075.7705931122.5501466865.5107340300.1303525882.260
64420774.2906635103.63049438367.71042786017.506636873.7900952872.3025698828.17020842217.87016352978.17012203319.9108367555.9804821942.3401544531.04
NaN04024314.39047334736.6101151181.3605435371.3700151924.78025268136.15020753773.99016580893.61012723664.1609158208.7405862456.5502816006.320
051450755.9015232596.5409484800.0104171786.45029260667.404721042.18020524809.73016645994.6403060586.3909746390.6708682892.0503851126.9301233566.2
013147444.9507804698.9602866096.5408301066.8904081351.69020180830.17016575357.42013242614.96010161972.5407314360.4304682151.440249051.730
086125788.7501535212.507291883.13023369533.7019743884.19016392491.1903294609.02010431061.2507784122.0105337406.3103075768.550985208.8
030193371.026249071.5022603132.3019232984.4106117766.02013238193.4010576441.4908116033.605841739.3603739480.5201796243.720
025186138.1501797130.39018664478.77015768791.62013092144.15010617967.4408330945.9106216922.5104262811.0602456515.290786853.9
020964271.018052379.15015360752.78012872730.17010572910.1308447056.3306482009.3804665605.302986600.2301434600.850
017408651.904906705.98012594015.79010456265.3904480221.7406653652.7904965251.7503404567.1401961938.050628434.360
014417842.12012268128.58010281026.6606444235.9508746386.3705176967.9303726265.6702385299.4801145768.560
01905496.31010058426.8408351075.6306772874.4905314053.8803965583.4402719115.9201566935.460501909.870
09798151.2108211118.2106744133.8205388117.1404134674.202976045.9601905060.330915087.710
08033334.8906669729.7305409272.3304244160.2403167181.2102171668.5501251459.870400858.930
06557950.3405386318.1104303312.1303302228.4402376870.1301521509.090930850.490
05326894.0104320208.0903389671.3402529523.5701734440.320999499.880320152.850
04301875.303436914.0202637381.3601898328.0801215179.320583706.270
03450408.2602707219.1302020247.3701385240.50798267.720255695.570
02744950.3102106389.8401516132.270970523.80466187.020
02162166.9801613505.201106346.080637550.20204215.650
01682304.3801210885.030775125.470372328.280
01288653.580883602.260509190.40163100.330
0967094.090519067.250297366.350
0705704.10406673.640130262.870
0494428.670237496.730
0324796.880104036.680
0189680.840
03090.680
```


Apêndice III – Árvore binomial com valores depois da subtração do FC

Esta é uma das saídas de código R proposto por Marques, Bastian-Pinto e Brandão (2021) que mostra a árvore binomial de valor do projeto após a subtração do fluxo de caixa.

20492253.540
37361706.450
51095295.02016366489.640
62121013.81009839567.430
70814687.59010808133.41013071377.580
77505987.71019614012.76033831882.140
82483775.71066557364.38082592115.41010439679.80
86000848.0701901485.94089625081.94019033741.270
88278147.8205877081.68045170508.75026030251.7808337829.260
89508501.87068666051.8209438683.0701647251.07015201623.810
89859936.26070504856.31052613860.7606076201.28020789506.8806659150.290
89478615.94071487499.67064857292.93089485051.8705275619.67012141037.490
88491450.66071768178.77066309912.32042020961.9806812876.68016603896.1105318444.560
87008404.071463630.75067094717.28043812717.5401535413.68020186807.0109696647.750
85124538.37070675214.28067318886.4604972876.92083560761.7402011897.97013260986.3104247666.930
82921825.509490753.64067075653.96045599674.8804991778.04025186298.8016122539.5207744393.980
80470748.51067986172.05066445971.63045778711.42065918359.2206803877.78018378846.88010591114.0803392472.020
77837118.7906226937.65065499981.83045584449.62066418962.1507946783.4800115469.36012876542.62096185193.030
75056328.4804269342.95054298321.95015081543.0306651952.76028666813.4201407376.55014678581.1508459774.840709455.940
72188457.04062161636.65052693279.24044326012.05066406802.24029066628.53023220177.78016065564.49010284071.5304939910.460
69265248.16059945023.6051329812.69043366285.79066005147.2709200830.44022911215.38017097368.3101723300.5108755745.560163953.440
66317971.84067654548.9109646456.89012244124.3305401729.5109076916.8203230534.57017826392.6702831038.51063213550.0503945344.180
63372784.52055319878.01047876120.88010995434.97064635227.670878756128.19023321743.88018298434.9903655106.34093363014.9505395592.0201728278.520
60451398.7802965985.25046046793.99039650994.033738994.1808274198.2402322778.1508535464.7304237354.14010247728.9108559892.5701351016.780
57571673.01050613760.904182169.05088237084.79082741707.0207662018.4102966574.8101862631.85014614358.8301095884.800477932.4004309282.0701380319.270
48280546.09042302192.24036776061.5081667946.1806946226.17012581673.27018547269.9304818042.7101370906.990184524.405239170.6705216613.570
40423547.93085286846.83080538703.35026149725.6802092745.27018342648.74014876222.32011672008.2508710171.88095872738.940471682.0101102415.650
03785371.1109371832.00025292148.1801521065.5308035240.4704813095.1501834683.8709081569.8306536710.7404184353.4902009936.580
08182445.2204390259.0200884926.76017644749.80414649670.9701881150.0109322049.5106956528.1104769942.8402748758.350880463.160
03458317.26020200007.78017188167.97014404154.02011630732.409451973.1807253151.4505220656.103341905.6501605270.310
019479698.55016680104.8304092281.95011700210.8409489804.1607445214.670555950.4501809596.6302195342.980703197.0
016133082.5501372625.0501504124.5709448817.2707548980.4405792853.7604169566.5106699070.2501282076.660
01321851.71011255042.603445733.990758619.7605946248.3504437355.0803042599.6601753348.310561620.340
010963803.1109187966.3307546459.9106029122.6604626561.9803330095.7802131698.7201023952.500
08989032.7407463204.2306052794.6104749073.1903543969.720430024.3901400341.690448547.710
07338126.8406027109.604815262.1803695083.0502659638.0901702517.730817797.220
05960616.0204834168.1903792928.7302830452.1801940780.6401118406.90358240.320
04813654.4203845791.702951141.430124165.5601359744.970653147.770
03860891.3103029287.5602260589.1601550037.730893234.850286114.780
03071507.4802356979.701696501.2401085983.640521647.670
02419392.4501805458.2901237964.210713397.330228510.470
01882442.2501354939.810867339.450416622.850
01441960.220988721.340569767.010182503.810
01082145.910692715.520332742.980
0789659.250455054.190145759.790
0553249.130265750.890
0363436.830116413.560
0212246.500
092975.680

Apêndice IV – Árvore binomial com valores antes da subtração do FC com exercício da opção real

Esta é uma das saídas de código R proposto por Marques, Bastian-Pinto e Brandão (2021) que mostra a árvore binomial de valor do projeto antes da subtração do fluxo de caixa com exercício de opções de abandono.

```
22930145.53
163276611.27
287283313.72
388065034.24
468798593.03
532273192.99
580935143.85
616927584.83
642125752.98
658168288.34
666485011.74
668321564.52
664761256.73
656744432.82
645085629.83
630488773.13
613560629.23
594822707.51
574721787.28
553639221.61
531899156.63
509775787.94
487499762.48
465263823.33
443227782.43
4209476034.63
39877472.73
375975093.63
352975093.63
3303578.73
301188318.21
272822339.63
243203578.73
21188318.21
1872822339.63
159757701.23
135913529.83
10805703.53
89710567.12
67187522.05
44790871.73
34444317.51
25826829.43
18666016.34
12730916.42
7825837.07
3785095.05
1682304.36
1288653.59
967094.09
705704.1
404428.67
324796.88
189680.84
83090.68
1681652.12
38029657.04
10661219.37
45970342.3
5205728.46
7451366.2
5951161.37
1007.08
62997.06
520692.57
20602.67
3368310.4
2115194.66
8543.71
3031790.48
2476400.68
85728.03
2421391.44
7850568.22
1033885.79
155995.93
1544531.04
2816006.32
1233566.2
558118.35
2249051.73
10760.12
985208.8
176243.72
786853.9
1434600.85
628434.36
145768.56
1145768.71
501909.87
400859.93
730850.49
320152.85
583708.27
255665.57
468187.02
204215.65
372328.26
163100.33
297388.35
130262.87
237469.73
104036.68
15087.71
```

Apêndice V – Árvore binomial com valores depois da subtração do FC com exercício da opção real

Esta é uma das saídas de código R proposto por Marques, Bastian-Pinto e Brandão (2021) que mostra a árvore binomial de valor do projeto após a subtração do fluxo de caixa com exercício de opções de abandono.

