



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**PROPOSTA PARA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA
DE PROJETOS HÍBRIDOS ISOLADOS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Marcelo Nunes Fonseca

Itajubá, Agosto de 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Marcelo Nunes Fonseca

**PROPOSTA PARA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA
DE PROJETOS HÍBRIDOS ISOLADOS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Doutor em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de Concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Edson de Oliveira Pamplona, Dr.

Co-orientador: Prof. Anderson Rodrigo de Queiroz, Dr.

Agosto de 2017
Itajubá



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Marcelo Nunes Fonseca

**PROPOSTA PARA CONFIGURAÇÃO ÓTIMA
DE PROJETOS HÍBRIDOS ISOLADOS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Tese aprovada por banca examinadora em 08 de agosto de 2017, conferindo ao autor o título de *Doutor em Ciências em Engenharia de Produção*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson de Oliveira Pamplona (Orientador)

Prof. Dr. Anderson Rodrigo de Queiroz (Co-orientador)

Prof. Dr. Hector Gustavo Arango

Prof. Dr. Rafael de Carvalho Miranda

Prof. Dr. Luiz Guilherme Azevedo Mauad

Prof. Dr. Paulo Rotela Júnior

Itajubá
2017

*Aos meus pais: Paulo e Valdéia, e aos meus
irmãos: Gustavo, Luara e Thaty.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me abençoado com uma família maravilhosa e por só colocar em meu caminho pessoas especiais. Agradeço pela minha vida, por me prover de saúde e me amparar nos momentos de dificuldade.

Ao meu orientador Prof. Edson de Oliveira Pamplona, primeiramente por ter me dado a oportunidade de ingressar nessa caminhada. Agradeço também pela disponibilidade, orientação, confiança, amizade e pelos conselhos profissionais.

Ao meu coorientador Prof. Rodrigo, principalmente pela paciência, incentivo, orientação e amizade.

Aos meus pais que sempre foram meu porto seguro, obrigado por sempre confiarem em mim e por me darem o apoio necessário para seguir meus sonhos. Aos meus irmãos pelas palavras de incentivo, apoio e confiança, tenham a certeza que vocês foram partes essenciais nessa jornada. Impossível mensurar a importância de vocês na minha vida.

A Thaty, David e Bruna por me darem o prazer de desfrutar da alegria de ser padrinho de seus filhos, João Vicente e Theo.

Aos meus afilhados Raphael, Tamires, João Vicente, Bia e Theo por serem minhas fontes de inspiração e motivação.

A todos meus amigos pelo apoio, amizade incondicional e motivação, principalmente, ao meu amigo Paulo, por ter me acolhido em sua casa durante o período de mestrado.

A minha noiva Thalita, pelo amor, carinho e, acima de tudo, pelo companheirismo e lealdade. Obrigado por me incentivar e estar sempre ao meu lado. Você foi parte fundamental nessa caminhada.

A família Bonazzi (Icílio, Cristina, Caio e Vanessa), que me acolheu como parte da família. Vocês foram os maiores incentivadores dessa minha caminhada. Obrigado pela amizade, carinho e pelo apoio e incentivo nas horas de indecisão. Serei eternamente grato a vocês. A família Rezende pelo apoio e incentivo em todas as minhas decisões.

Ao grupo do GEPE de Economia e Finanças, pela amizade e companheirismo aos amigos Giancarlo, Luiz Célio, Paulo Rotela e, principalmente, ao Victor, por todo o apoio e suporte no desenvolvimento do trabalho e amizade durante o período de mestrado e doutorado.

Aos professores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, principalmente, ao solícito e dedicado Prof. Carlos Mello, que desde a graduação vem contribuindo de forma essencial na minha formação acadêmica.

À Capes pelo apoio financeiro.

RESUMO

O uso de sistemas híbridos é uma forma de se reduzir a dependência a combustíveis fósseis, usando energia de fontes solar e eólica. Contudo, encontrar a configuração ideal para instalação de sistemas híbridos não é tarefa simples. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho consiste no desenvolvimento de um método estruturado para seleção de configurações ótimas de tecnologias renováveis e convencionais de geração de energia em sistemas híbridos isolados baseado em otimização multiobjetivo. A metodologia proposta é composta por três fases, que consiste no desenvolvimento do modelo conceitual a ser otimizado por meio da fusão das técnicas de Projetos de Experimentos de Misturas, Intersecção Normal à Fronteira e análise de supereficiência desenvolvida no modelo DEA CCR. Em seguida, o método proposto é aplicado a um conjunto de 20 regiões isoladas na região Norte do Brasil, mais especificamente no estado do Amazonas. Dessa maneira, no caso prático se busca otimizar a configuração de um sistema híbrido, ajustando adequadamente as variáveis de decisão (sistemas fotovoltaicos e geradores a diesel), de forma que este ajuste possibilite os melhores resultados de acordo com os objetivos selecionados, o custo nivelado de energia e a emissão de CO₂. Os resultados mostram que foram selecionadas como resposta mais eficiente configurações sempre próximas ao sistema híbrido composto igualmente de geradores a diesel e sistemas fotovoltaicos, indicando que as soluções menos eficientes são as localizadas nas extremidades. Em adição, apenas em uma região a parcela de sistemas fotovoltaicos na configuração ótima foi predominante. Entretanto, a partir da aplicação do método proposto foram alcançadas significativas reduções da emissão de CO₂ com as configurações ótimas selecionadas. Em contrapartida, devido a característica conflitante dos objetivos selecionados, a instalação dos referidos sistemas híbridos geram um aumento, apesar de menos acentuados que as reduções nas emissões, do custo nivelado de energia, devido, principalmente, aos altos custos das baterias.

Palavras-chave: sistemas híbridos, energia renovável, otimização multiobjetivo, intersecção normal à fronteira, DEA supereficiência.

ABSTRACT

The use of hybrid systems is a way to reduce dependence on fossil fuels, using energy from solar and wind sources. However, finding the right configuration for installing hybrid systems is no simple task. However, finding the right configuration for installing hybrid systems is not a simple task. In this sense, the objective of the present work is the development of a structured method to select optimal configurations of renewable and conventional technologies of power generation in isolated hybrid systems based on multiobjective optimization. The proposed methodology is composed by three phases, which consists of the development of the conceptual model to be optimized by the fusion of the Techniques of Mixing Design of Experiments, Normal Boundary and super-efficiency DEA model. Then, the proposed method is applied to a set of 20 isolated regions in the northern region of Brazil, more specifically in the state of Amazonas. In this way, in the practical case it is sought to optimize the configuration of a hybrid system, adjusting properly the decision variables (photovoltaic systems and diesel generators), so that this adjustment allows the best results according to the selected objectives, the levelized cost of energy and CO₂ emissions. The results show that the most efficient response to the hybrid system, composed of diesel generators and photovoltaic systems, has been selected as the most efficient response, indicating that the least efficient solutions are located at the extreme points. In addition, in only one region the portion of photovoltaic systems in the optimum configuration was predominant. However, from the application of the proposed method, significant CO₂ emission reductions were achieved with the optimal settings selected. On the other hand, due to the conflicting characteristics of the selected objectives, the installation of such hybrid systems generates an increase, although less accentuated than the reductions in emissions, of the levelized cost of energy, due mainly to the high costs of the batteries.

Key-words: hybrid systems, renewable energy, multi-objective optimization, normal boundary intersection, super-efficiency DEA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema híbrido PV-diesel com baterias	42
Figura 3.1 - Espaço factorial restrito para misturas com 2 componentes	50
Figura 3.2 - Fronteira de Pareto (NBI).....	55
Figura 4.1 - Estrutura Proposta	63
Figura 4.2 – Modelo Conceitual Sistema Híbrido	65
Figura 4.3 - Modelo para Otimização	68
Figura 4.4 - Comparação dos Métodos	71
Figura 5.1 - Modelo conceitual PV-Diesel	74
Figura 5.2 - Fronteira de Pareto - Araras	84
Figura 5.3 - Fronteira de Pareto - Boca do Acre.....	84
Figura 5.4 - Fronteira de Pareto - Canutama.....	84
Figura 5.5 - Fronteira de Pareto - Tapauá	84
Figura 5.6 - Config. Ótima - Araras.....	85
Figura 5.7 - Config. Ótima - Boca do Acre	85
Figura 5.8 - Config. Ótima - Tapauá.....	85
Figura 5.9 - Config. Ótima - Canutama	85
Figura 5.10 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Araras.....	91
Figura 5.11 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Boca do Acre.....	92
Figura 5.12 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Tapauá.....	92
Figura 5.13 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Canutama	93
Figura 5.14 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Lote B.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Publicações técnicas (ISI Web of Knowledge).....	19
Tabela 1.2 – Publicações técnicas e escopo (ISI Web of Knowledge).....	20
Tabela 2.1 – Previsão de crescimento do consumo de eletricidade por classe.....	23
Tabela 2.2 – Previsão de crescimento do consumo de eletricidade por região.....	23
Tabela 2.3 - Participação regional na capacidade instalada do SIN	24
Tabela 2.4 - Evolução da oferta interna de energia no horizonte 2015-2024	24
Tabela 4.1 – Trabalhos relacionados com as variáveis respostas	64
Tabela 5.1 - Localização e mercado de energia (lote B/II).....	73
Tabela 5.2 - Fatores Gerador a Diesel	75
Tabela 5.3 - Características Placa Fotovoltaica	75
Tabela 5.4 - Premissas de custos.....	76
Tabela 5.5 - Premissas de CAPEX e Custo de Combustível	77
Tabela 5.6 - Radiação solar no plano inclinado.....	78
Tabela 5.7 - Premissas de custos.....	78
Tabela 5.8 – Premissas de investimentos.....	78
Tabela 5.9 - Premissas WACC	79
Tabela 5.10 – Distribuição triangular (custos do diesel)	80
Tabela 5.11 – Distribuição triangular (custos dos sistemas fotovoltaicos)	81
Tabela 5.12 - Coeficientes estimados para os modelos cúbicos completos.....	82
Tabela 5.13 - Valores de R2 (adj.).....	83
Tabela 5.14 - Ranqueamento - Araras	86
Tabela 5.15 - Ranqueamento - Boca do Acre	86
Tabela 5.16 - Ranqueamento - Canutama.....	87
Tabela 5.17 - Ranqueamento - Tapauá	87
Tabela 5.18 - Configuração ótima (lote B).....	88
Tabela 5.19 - Configuração ótima vs. Configuração 100% diesel	90
Tabela 5.20 - Melhores Configurações (HOMER®).....	95
Tabela 5.21 - Ranqueamento - HOMER® X NBI + DEA (Araras).....	95
Tabela 5.22 – Ranqueamento - HOMER® X NBI + DEA (Boca do Acre).....	96
Tabela 5.23 – Ranqueamento - HOMER® X NBI + DEA (Tapauá)	96
Tabela 5.24 – Ranqueamento - HOMER® X NBI + DEA (Canutama).....	97

GLOSSÁRIO E ABREVIATURAS

AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i> (Análise Hierárquica de Processos)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BCC	Banker, Charnes e Cooper
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> (Investimentos)
CCR	Charnes Cooper e Rhodes
COP	Conferência das Partes
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i> (Análise Envoltória de Dados)
DMU	<i>Decision Making Unit</i> (Unidade Produtivas)
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Projeto e Análise de Experimentos)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPG	Erro Percentual Global
FC	<i>Fuel Cell</i> (Células de Combustível)
FER	Fonte de Energia Renovável
FGS	Sistema de Geração Futura
GCC	<i>Global Climate Change</i> (Alteração Climática Global)
GEE	Gases de Efeito Estufa
LCE	<i>Equivalent Carbon Dioxide Life Cycle Emissions</i> (Emissões Equivalentes de Ciclo de Vida de Dióxido de Carbono)
LCOE	<i>Levelized Cost of Electricity</i> (Custo Nivelado de Eletricidade)
MAPE	Modelo Ambiental de Planejamento de Expansão Elétrica
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MDOE	<i>Mixture Design of Experiments</i> (Projeto Experimentos de Misturas)
MELP	Modelo de Expansão de Longo Prazo
MESSAGE	<i>Model for Energy Supply System Alternatives and Their General Environmental Impacts</i> (Modelo de alternativas ao sistema de abastecimento de energia e seus impactos ambientais)
MGB	Movimento Geométrico Browniano
MME	Ministério de Minas e Energia
MNBI	<i>Modified Normal Boundary Intersection</i> (Intersecção Normal à Fronteira
NBI	<i>Normal Boundary Intersection</i> (Intersecção Normal à Fronteira Modificada)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreador de Máxima Potência)
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> (Mínimos Quadrados Ordinários)
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> (Custos de Operação)
PD	Profundidade Máxima de Descarga
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PV	<i>Photovoltaic</i> (Sistema Fotovoltaico)
RCEs	Reduções Certificadas de Emissões
ROA	<i>Real Option Analysis</i> (Teoria das Opções Reais)
SARIMA	Sazonal Auto Regressivo Integrado de Média Móvel
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMC	Simulação de Monte Carlo
SPEA	<i>The Strength pareto Evolutionary Algorithm</i> (Algoritmo Evolutivo da Força de Pareto)

TEP	Toneladas Equivalentes de Petróleo
TOPSIS	<i>Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution</i> (Técnica para avaliar o desempenho de alternativas através de similaridade com a solução ideal)
TOTEX	<i>Total Expenditure</i> (Custos Totais, incluindo os investimentos)
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança de Clima)
VPL	Valor Presente Líquido
VPC	Valor Presente dos Custos
VRS	<i>Variable Returns of Scale</i> (Retorno Variável de Escala)
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i> (Custo Médio Ponderado de Capital)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	16
1.3	LIMITAÇÕES	17
1.4	CONTRIBUIÇÃO DA TESE.....	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2	ENERGIA RENOVÁVEL	22
2.1	SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	22
2.2	ENERGIA FOTOVOLTAICA	25
2.3	EMISSÕES E MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	27
2.4	PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE DE EXPANSÃO.....	29
2.5	PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE DE EXPANSÃO COM QUESTÕES AMBIENTAIS	31
2.6	ANÁLISE DE INVESTIMENTOS NO SETOR DE ENERGIA	34
2.7	SISTEMAS HÍBRIDOS	36
2.7.1	<i>SISTEMAS HÍBRIDOS DIESEL-FOTOVOLTAICO</i>	41
2.7.2	<i>DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DIESEL-FOTOVOLTAICO</i>	42
2.8	CUSTO NIVELADO DE ENERGIA	44
2.9	ENTROPIA	46
3	PROJETO DE EXPERIMENTOS E OTIMIZAÇÃO MATEMÁTICA	48
3.1	PROJETO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS (DOE).....	48
3.1.1	<i>PROJETO DE EXPERIMENTOS DE MISTURAS (MDOE)</i>	49
3.1.2	<i>SIMPLEX LATTICE</i>	51
3.2	INTERSECÇÃO NORMAL À FRONTEIRA (NBI).....	53
3.2.1	DESCRIÇÃO DO MÉTODO NBI	53
3.2.1	TRABALHOS RELACIONADOS AO NBI.....	56
3.3	ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS	57
3.3.1	<i>CONSIDERAÇÕES INICIAIS DEEA</i>	57
3.3.2	<i>MODELO DEEA DE SUPEREFICIÊNCIA</i>	59
4	MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1	MÉTODO PROPOSTO.....	62
4.1.1	<i>FASE I (FASE PRELIMINAR) – MODELO CONCEITUAL</i>	63

4.1.2	<i>FASE II – MODELAGEM (EXPERIMENTOS DE MISTURAS)</i>	65
4.1.3	<i>FASE III – OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO</i>	67
4.2	CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS	68
5	<u>APLICAÇÃO E RESULTADOS DO MÉTODO</u>	72
5.1	OBJETO DE ESTUDO	72
5.2	MODELO CONCEITUAL	74
5.3	COLETA DE DADOS	75
5.3.1	CARACTERÍSTICAS DAS TECNOLOGIAS	75
5.3.2	PARÂMETROS DETERMINÍSTICOS DE ENTRADA	76
5.3.3	PARÂMETROS ESTOCÁSTICOS DE ENTRADA	79
5.4	DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS	81
5.5	FASE I – MODELAGEM	81
5.6	OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	83
5.6.1	FRONTEIRAS DE PARETO (NBI)	84
5.6.2	ANÁLISES DE EFICIÊNCIAS	85
5.7	COMENTÁRIOS GERAIS E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	89
5.7.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	89
5.7.2	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	89
5.8	VALIDAÇÃO DO MODELO	94
6	<u>CONCLUSÕES</u>	98
6.1	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	98
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
	<u>REFERÊNCIAS</u>	102

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

As fontes tradicionais de energia, como carvão, petróleo e gás natural são as principais contribuintes para a poluição ambiental e o aquecimento global (LUTHRA *et al.*, 2016). De acordo com Crook *et al.* (2011), acredita-se que, dentro dos próximos 100 anos, o clima da Terra vai passar por uma mudança notável por causa da emissão de gases de efeito estufa e aerossóis. A mudança climática é considerada como um dos principais riscos sistemáticos para a sociedade global no século 21 (FUSS *et al.*, 2008).

Luhtra *et al.* (2015) relata que a atual crise energética e as preocupações ambientais podem ser minimizadas por meio do aumento da utilização de fontes de energia renováveis (FERs) e que o crescimento dessa fonte é substancial. Em 2014, as FERs representaram mais de 59% das adições líquidas a capacidade global de energia (ELLISTON, RIESZ e MACGILL, 2016). Em relação ao Brasil, a previsão da continuidade da forte presença das fontes renováveis na matriz energética brasileira será de 45,2% em 2024, indicador superior aos 39,4% verificado em 2014 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015). Na matriz de geração de energia elétrica, as fontes renováveis deverão representar aproximadamente 86% em 2024, superando a atual predominância destas fontes (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015).

Conforme apresentado por Elliston, Riesz e Macgill (2016), muitos países e regiões estão acelerando o investimento em fontes renováveis através de vários mecanismos e políticas de incentivo. A política de incentivo mais utilizada para alavancar a energia renovável nos Estados Unidos e na Espanha foi o regime *feed-in-tariffs* (MENDONÇA, 2007 e RINGEL, 2006). No Brasil, a tarifa *feed-in-tariff* já foi adotada no Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), um programa que enfrentou algumas dificuldades na realização dos seus objetivos. Os leilões de energia que visam a promoção de fontes renováveis, por outro lado, foram muito bem-sucedido e, a cada ano, ter conseguido melhores resultados em termos de redução do custo de energia negociada (PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2013). À vista disso, o Brasil adota uma política de incentivo à base de leilões de longo prazo desde 2004 (AQUILA *et al.*, 2016, MALAGUETA *et al.*, 2013 e MORENO *et al.*, 2010), seguido por países da América Latina, tais como Chile, Peru, Colômbia e Panamá durante os anos de 2005 a 2009 (MORENO *et al.*, 2010).

No Brasil, uma parcela da população não tem acesso a energia elétrica (CGEE, 2010).

Segundo Silveira, Tuna e Lamas (2013), uma parcela dessa população está localizada em áreas rurais onde o custo de acesso aos sistemas de distribuição de energia é alto, como o exemplo de pequenas aldeias da região amazônica, que utilizam sistemas geradores a diesel para produção de energia elétrica, uma vez que os investimentos em sistemas de transporte de energia para conexão a redes interligadas de distribuição são inviáveis economicamente. Nesse contexto, estatísticas destacam que cerca de 930.000 pessoas não tem acesso a tais serviços em áreas remotas na região amazônica (GOMEZ e SILVEIRA, 2015).

De acordo o Ministério de Minas e Energia (2009), na Amazônia, área que engloba nove estados do Brasil pertencentes à Bacia amazônica representando aproximadamente 61% do território nacional, estima-se que cerca de 300 mil comunidades isoladas não têm acesso à energia elétrica, prejudicando tanto a prestação de serviços essenciais, tais como saúde, comunicação e educação quanto as condições de vida locais, o desenvolvimento social e a economia regional. A geração de energia através de geradores diesel de pequeno porte é a principal fonte produção de energia elétrica para as comunidades dessa região, no entanto, embora viáveis, esse tipo de fonte impõe sérias restrições às condições de operação, na qual destaca-se as frequentes interrupções de energia, o desempenho de baixa qualidade e aos altos custos de manutenção (SILVA, SEVERINO e OLIVEIRA, 2013).

Ainda segundo Silva, Severino e Oliveira (2013), o aumento da demanda por energia, os altos custos dos combustíveis convencionais, as crises políticas nas áreas de produção de combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a conservação ambiental têm estimulado a busca de fontes alternativas de energia. Considerando todas as novas formas de geração de energia elétrica, o uso da energia solar tem se apresentado gradualmente como uma importante alternativa, por ser economicamente viável, ambientalmente aceita e bem adaptada às áreas isoladas, onde os custos de instalação de sistemas convencionais são relativamente altos (SILVEIRA, TUNA e LAMAS, 2013). Além disso, Martins *et al.* (2008) destacam que a enorme quantidade de radiação solar incidente durante todo o ano na região amazônica pode ser aproveitado por sistemas fotovoltaicos (PV, do inglês *photovoltaic*) para produzir energia elétrica para essas comunidades.

Entretanto, Trepani e Millar (2016) relatam que em razão da variabilidade e intermitência da eletricidade gerada a partir de sistemas fotovoltaicos, estes sem o auxílio de sistemas de armazenamento de energia, provavelmente, não irão substituir um conjunto gerador diesel de forma definitiva em sistemas isolados. Porém, o sistema fotovoltaico terá que operar em paralelo com motores diesel e potencialmente com outras plantas que podem armazenar

energia elétrica, formando os chamados sistemas híbridos. De acordo com Musselli, Notton e Louche (1999), sistemas híbridos isolados, também chamados de sistemas híbridos autônomo, são mais confiáveis e, frequentemente, mais baratos do que sistemas que utilizam apenas uma fonte de energia. Vale destacar, portanto, a importância de se garantir a diversidade de sistemas híbridos fotovoltaicos-diesel (PV-diesel), uma vez que tal configuração implica em maior confiabilidade e robustez do sistema. Contudo, encontrar a configuração ideal para instalação de sistemas híbridos não é tarefa simples.

Nesse sentido, alguns estudos vêm empregando métodos de otimização multiobjetivo para verificar a melhor configuração de sistemas híbridos, dentre estes pode-se destacar os trabalhos de Dufo-López *et al.* (2011) e Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006). No entanto, dentre os vários métodos de otimização multiobjetivo que são capazes de construir fronteiras de Pareto, o método de Intersecção Normal à Fronteira (NBI, do inglês *Normal Boundary Intersection*), desenvolvido por Das e Dennis (1998), é um dos mais promissores (NAVES *et al.*, 2017).

O método NBI se destaca por gerar pontos equidistantes e uniformes na geração da fronteira de Pareto para problemas multiobjetivo, desenvolvendo um conjunto de soluções ótimas. Uma vez gerado esse conjunto de soluções, a próxima fase consiste na escolha da solução ótima da fronteira de Pareto. Nesse sentido, há na literatura estudos que buscam aplicar métodos para tomada de decisão com o intuito selecionar soluções que se mostram mais adequadas, conhecidos como métodos *a posteriori* (AHMADI *et al.*, 2015, IZADBAKHSI *et al.*, 2015, ROCHA *et al.*, 2015a e ROCHA *et al.*, 2015b).

Com base nas considerações acima, a ideia central do presente trabalho leva em consideração a associação de técnicas matemáticas de modelagem, otimização e método *a posteriori* em sistemas híbridos isolados. Dessa forma, o objetivo do trabalho compreende o desenvolvimento de um método para seleção da configuração ótima em tais sistemas. Para demonstrar a aplicabilidade do método proposto, um objeto de estudo é selecionado para aplicação prática e seus resultados são discutidos.

1.2 Objetivos do trabalho

Diante do exposto na seção anterior, é possível estabelecer três questões que motivaram o desenvolvimento do presente trabalho, conforme apresentado a seguir:

- 1) É possível desenvolver um método para seleção das soluções mais eficientes para configuração de um sistema híbrido em problemas multiobjetivo?

- 2) Considerando que o método multiobjetivo gera um conjunto de soluções ótimas para o decisor, como determinar a configuração que deverá ser selecionada para compor o sistema híbrido?
- 3) Em regiões próximas, a mesma configuração de um sistema híbrido deve ser selecionada?

Dessa forma, o seguinte objetivo geral é estabelecido:

- Desenvolvimento de um método para seleção da configuração ótima de sistemas híbridos isolados de geração de energia em problemas de otimização multiobjetivo;

Desdobrando o objetivo mencionado acima, pode-se chegar aos seguintes objetivos específicos:

- Aplicação do projeto de experimentos de mistura para modelagem das funções objetivo do problema;
- Aplicação da simulação de Monte Carlo para inserção de variáveis estocásticas no modelo;
- Seleção da configuração ótima por meio da aplicação do método proposto para regiões isoladas brasileiras, considerando a associação do método NBI com o modelo DEA de supereficiência;
- Utilização da entropia como saída do modelo DEA para garantir a diversidade do sistema híbrido;
- Comparação dos métodos propostos para otimização de sistemas híbridos disponíveis na literatura com o método desenvolvido no presente trabalho;
- Aplicação do método proposto para otimização de um sistema híbrido fotovoltaico-diesel em uma região isolada;
- Validação do modelo proposto.

1.3 Limitações

Apesar do principal objetivo do presente estudo seja apresentar um método para configuração ótima de um sistema híbrido isolado, visando estendê-lo para os mais diversos estudos nesse contexto, verifica-se que os resultados aqui apresentados encontram-se delimitados por algumas características desse estudo.

Referente as variáveis inseridas no modelo, apenas as variáveis custo de combustível, custo dos sistemas fotovoltaicos e consumo de combustível foram consideradas estocásticas.

As outras variáveis foram mantidas determinísticas e o impacto de suas variações no resultado final não foi capturado.

No que diz respeito aos arranjos experimentais, para o planejamento e realização dos experimentos, considerou-se apenas os arranjos *simples lattice* de grau 5. Dessa forma, os modelos matemáticos desenvolvidos ficam restritos aos comportamentos desses arranjos. Dessa forma, vale destacar que caso sejam utilizados mais do que dois componentes no experimento, torna-se interessante analisar a utilização de arranjos de graus mais elevados.

Quanto aos métodos de otimização, considera-se a utilização do método NBI, uma vez que dos métodos utilizados para geração da fronteira de Pareto, este vem sendo considerado como um dos mais promissores por apresentar como vantagem a geração de pontos equidistantes. No entanto, para aplicação do método proposto, pode-se aplicar as diversas técnicas de otimização disponíveis na literatura. Além disso, o presente estudo se limitou a utilização do modelo DEA de supereficiência para seleção da configuração ótima, visto que a partir dessa técnica é possível considerar a influência de mais de uma variável na análise de eficiência dos pontos gerados pelo método NBI. Contudo, outras técnicas, tais como Erro Percentual Global (EPG), entropia, TOPSIS (técnica para avaliar o desempenho de alternativas através de similaridade com a solução ideal), entre outras, poderiam ser utilizadas, gerando, possivelmente, outras soluções para a configuração ótima do sistema híbrido isolado.

1.4 Contribuição da tese

A energia elétrica é considerada como um aspecto crítico da vida moderna, desempenhando um papel central na situação econômica da maioria dos países, tornando-se o principal motor da produtividade e contribuindo para a melhoria do bem-estar social e do desenvolvimento geral (LIMA, FERREIRA e VIEIRA, 2013).

Com o intuito de comprovar a relevância do trabalho e sua contribuição no campo da pesquisa, realizou-se uma análise bibliométrica em que se buscou por pesquisas que foram estruturadas com as mesmas técnicas matemáticas propostas ao mesmo contexto de estudo, isto é, geração de energia por meio de sistemas híbridos.

As buscas foram realizadas no dia 27/02/2017 e abrangeram trabalhos publicados na base de dados *ISI Web of Knowledge*, *Scopus* e *Science Direct*. A análise bibliométrica foi estruturada em duas etapas. O objetivo da primeira etapa é mostrar a relevância das técnicas matemáticas utilizadas, comprovando, portanto, a consistência do método proposto neste projeto. Dessa forma, para a realização dessa etapa, buscou-se publicações com as mesmas

técnicas matemáticas utilizadas no presente estudo, porém, sem qualquer delimitação de escopo de aplicação. Em seguida, realizou-se buscas de pesquisas associando as técnicas utilizadas.

O objetivo da segunda etapa é demonstrar o caráter inovador da tese. Para tanto, realizou-se buscas de pesquisas estruturadas com as mesmas técnicas matemáticas delimitando, desta vez, o escopo de aplicação ao estudo de sistemas híbridos. Na análise bibliométrica foram realizadas buscas, adotando como estratégia a utilização de uma palavra chave principal com as suas possíveis variações. Dessa forma, os resultados encontrados nessas duas etapas podem ser vistos a seguir.

No que se refere às técnicas matemáticas, adotou-se o descritor “*Response Surface*”, com as possíveis variações “*Design of Experiments*” e “DOE”, para representar a técnica de modelagem estatística de processos. Para representar as técnicas de otimização multiobjetivo, as palavras chaves adotadas foram “*Normal-Boundary Intersection*”, “*Multi-objective Optimization*” e “*Pareto Frontier*”. No que diz respeito as técnica de análise de eficiência, foram adotadas as palavras chaves “*Data Envelopment Analysis*” e “DEA”. Além disso, buscas foram feitas por meio do descritor “*Super-efficiency DEA*” com as variações “*Super-efficiency in DEA*” e “*Super-efficiency in Data Envelopment Analysis*”.

Em seguida, foram feitas buscas associando as técnicas matemáticas de otimização.

A Tabela 1.1 apresenta os resultados de busca pelas técnicas matemática, objetivo da primeira fase.

Tabela 1.1 – Publicações técnicas (ISI Web of Knowledge)

Técnicas	ISI (Web of Knowledge)	Scopus	Science Direct
DOE	50.170	57.844	43.454
Otimização Multiobjetivo (NBI)	13.543	24.101	13.019
DEA	15.901	12.854	7.365
Modelo DEA de Supereficiência	147	385	404
Otimização Multiobjetivo + DEA	42	50	141
Otimização Multiobjetivo + DEA Supereficiência	0	4	7

A grande quantidade de trabalhos encontrados evidencia a robustez de utilização destas técnicas matemáticas. No que diz respeito a escassez de publicações associando técnicas de otimização multiobjetivo e modelo DEA de supereficiência indica uma lacuna na literatura.

Para realização da segunda fase, buscou-se publicações que foram estruturadas a partir das possíveis associações entre as técnicas matemáticas supracitadas e os escopos do trabalho

(energia renovável ou sistemas híbridos). A Tabela 1.2 apresenta as publicações associando as técnicas aos escopos do projeto.

Tabela 1.2 – Publicações técnicas e escopo (ISI Web of Knowledge)

Palavra-Chave	ISI (Web of Knowledge)	Scopus	Science Direct
DEA + Energia renovável	109	94	435
Otimização multiobjetivo + Energia renovável	145	342	1.270
Otimização Multiobjetivo + DEA + Energia Renovável	1	1	21
Modelo DEA de Supereficiência + Energia Renovável	1	3	25
Otimização multiobjetivo + Sistemas Híbridos	7	18	132
DEA + Sistemas Híbridos	0	1	5
Otimização Multiobjetivo + Sistemas Híbridos + DEA	0	0	1
Otimização Multiobjetivo + Sistemas Híbridos + DEA de Supereficiência	0	0	0

Conforme pode ser visto, apenas uma publicação foi encontrada quando associados a otimização multiobjetivo, DEA e sistemas híbridos, ver Mallikarjun e Lewis (2015), no qual, apesar de ter sido abordado o tema otimização multiobjetivo, os autores não fizeram uso do método NBI. Além disso, quando associados a otimização multiobjetivo, o modelo de supereficiência e sistemas híbridos, nenhuma publicação foi encontrada a partir das buscas na base de dados *ISI Web of Knowledge*, *Scopus* e *Science Direct*.

Neste sentido, pautado no reduzido número de publicações, principalmente quando associada as técnicas matemáticas a sistemas híbridos, e pela atualidade das mesmas, pode-se atestar que a proposta formulada neste projeto possui um caráter inovador com o potencial de preencher algumas lacunas conceituais ainda existentes. Portanto, com base no exposto anteriormente, identificada essa lacuna onde o presente trabalho visa contribuir, o presente projeto tem como objetivo desenvolver um método para configuração de um sistema híbrido isolado por meio da fusão das técnicas de Projetos de Experimentos de Misturas, Intersecção

Normal à Fronteira, e modelo DEA de Supereficiência. Pretende-se com esta abordagem alcançar resultados de configuração ótima para diferentes regiões de projetos híbridos isolados.

1.5 Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo desse trabalho trata da contextualização sobre o problema de pesquisa, justificativa da escolha do tema, apresentação dos objetivos propostos, e, por fim, apresentação das contribuições específicas do trabalho. Em seguida, a estruturação proposta para os Capítulos 2 e 3 foi desenvolvida com o intuito de dar suporte ao desenvolvimento do método proposto, descrito no Capítulo 4. Dessa maneira, no Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos relacionados à energia renovável e sistemas híbridos, assim como o crescimento da geração dessa fonte no Brasil e trabalhos relacionados à essa expansão, com foco nas questões ambientais. Além disso, são apresentadas as formulações matemáticas para dimensionamento de sistemas híbridos, assim como importantes considerações acerca do custo nivelado de energia e entropia, variáveis utilizadas para otimização do problema proposto. Já o Capítulo 3 se dedica a apresentação das ferramentas matemáticas utilizadas nesse trabalho. Para cumprir com os objetivos desenvolvidos para elaboração do presente trabalho, o método proposto foi estruturado em três fases, conforme descrita no Capítulo 4. Nesse contexto, a primeira fase consiste na elaboração do modelo conceitual. A segunda fase (Fase II) consiste na modelagem das variáveis resposta, selecionadas na fase preliminar, por meio da utilização da técnica de projeto de experimentos de mistura. Em associação, algumas variáveis foram consideradas estocásticas, inseridas no modelo a partir da Simulação de Monte Carlo (SMC). Na Fase III, as funções objetivo são otimizadas por meio da técnica de Intersecção Normal à Fronteira. Uma vez que as fronteiras de Pareto são geradas, utiliza-se um método *a posteriori* para seleção da configuração ótima. Para esse fim, utiliza-se um modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA, do inglês *Data envelopment analysis*), denotado de modelo DEA de supereficiência. Para mostrar a aplicabilidade do método proposto, no quinto Capítulo é apresentada uma aplicação prática desse método para um conjunto de regiões isoladas no Amazonas, descrita no Leilão de Energia número 02/2016 (ANEEL, 2016c). O Capítulo 6 apresenta uma discussão dos resultados obtidos. Finalmente, no Capítulo 7 encerra o trabalho, apresentando as conclusões, as contribuições e limitações deste trabalho, além de sugestões para estudos futuros.

2 ENERGIA RENOVÁVEL

2.1 Setor elétrico brasileiro

A demanda por energia do Brasil, principalmente no setor industrial, aumentou nas últimas décadas (EPE, 2014). Uma alta participação da geração de energia brasileira vem de fontes hidrelétricas e uma nova expansão da geração de energia é necessário devido as altas taxas de crescimento na demanda (SCHMIDT, CANCELLA e PEREIRA JUNIOR, 2016). No entanto, no que concerne a produção de energia a partir de fontes hídricas, os referidos autores atentam para uma complexidade operacional, o fator sazonalidade das chuvas, uma vez este fato pode provocar diminuição na produção e a necessidade maior da utilização de fontes térmicas mais caras.

Conforme destacado por Santos e Legey (2013), o sistema elétrico brasileiro é dividido em duas partes, sendo a primeira um aglomerado de sistemas disjuntos na região Amazônica, conhecido como sistema isolado. A segunda parte é o Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável por oferecer 97% da energia elétrica que o país necessita. Segundo Ferreira *et al.* (2016) e Pereira Junior *et al.* (2013), o sistema brasileiro é hidrotérmico com predomínio de geração hidrelétrica, sendo que aproximadamente 80% da produção anual de energia do SIN é oriundo dessa fonte.

De acordo com Pereira Junior *et al.* (2013), o sistema é caracterizado pela forte presença de barragens hidrelétricas, grandes reservatórios com regularização plurianual, localizados em diferentes bacias hidrográficas e distantes dos consumidores e, por esta razão, o sistema está ligado por longas linhas de transmissão. As linhas de transmissão também tem o papel de ser um facilitador para a otimização dos recursos energéticos entre os subsistemas elétricos. A coordenação do parque hidrotérmico do SIN é feita de maneira centralizada onde o operador nacional do sistema (ONS) realiza o despacho otimizado das centrais geradoras para o atendimento da demanda ao menor custo possível.

O consumo de energia no Brasil tornou-se uma variável amplamente discutido nos últimos anos, principalmente após a sequência de crises no setor nas ultimas décadas (TORRINI *et al.*, 2016). Segundo o Ministério de Minas e Energia (2015), a previsão do consumo total de energia elétrica (excluindo a autoprodução) resultou em crescimento do consumo *per capita* na ordem de 3,9% ao ano no período decenal (2015 – 2024), sendo a maior variação no norte, conforme são apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2. De acordo com Santos e Legey (2013), esse

crescimento contínuo da demanda de eletricidade no Brasil requer uma significativa expansão de seu sistema de geração de energia.

Tabela 2.1 – Previsão de crescimento do consumo de eletricidade por classe

Ano	Residencial	Industrial	Comercial	Outros	Total
	Consumo (GWh)				
2015	135.346	170.173	92.275	73.125	470.919
2019	156.267	187.571	109.183	84.372	537.393
2024	197.193	239.587	147.806	107.551	692.137

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2015)

Tabela 2.2 – Previsão de crescimento do consumo de eletricidade por região

Ano	Norte	Nordeste	Sudeste/CO	Sul	Sistemas Isolados	Total
	Consumo (GWh)					
2015	34.177	72.617	276.678	85.070	2.377	470.919
2019	41.625	84.839	312.820	95.992	2.177	537.393
2024	58.598	110.954	399.410	119.706	3.468	692.137

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2015)

De acordo com dados da Empresa de Pesquisa energética (EPE), em 2011, o Brasil tinha uma capacidade instalada de cerca de 106 GW, dos quais mais de 79 GW é hidrelétrica, 24 GW termelétrica, 2 GW de energia nuclear e 0,602 GW de energia eólica (EPE, 2011), configuração que mantém as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) do setor elétrico a um nível relativamente baixo (PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2013). Em 2016, o Brasil possuía no total 4.568 empreendimentos em operação, totalizando 147,6 GW de potência instalada. No entanto, com base nos 214 empreendimentos atualmente em construção e mais 671 com construção não iniciada, está prevista para os próximos anos uma adição de 26,7 GW na capacidade de geração do País (ANEEL, 2016a).

A previsão é que em 2024 o Brasil atinja 206,4 GW de potência instalada, com destaque para a elevação da participação da região Norte na expansão de projetos de geração de energia elétrica, passando de 14% da capacidade instalada do SIN, no início de 2015, para 23%, em 2024, conforme apresenta a Tabela 2.3 (MINISTÉRIO DE MINAS e ENERGIA, 2015).

Em relação a composição da oferta interna de energia, de acordo com Ministério de Minas e Energia (2015), as energias renováveis exibem um crescimento médio anual de 4,5%, destacando-se o crescimento de 11,8% na oferta de outras fontes renováveis (energia eólica, solar e biodiesel, entre outros). No entanto, segundo Pereira Junior *et al.* (2013) este perfil,

poderia mudar consideravelmente, dependendo do crescimento da demanda de energia, da disponibilidade de recursos para a geração, das restrições ambientais e dos custos de exploração desses recursos.

A Tabela 2.4 mostra a previsão da oferta interna de energia em toneladas equivalentes de petróleo (tep) no horizonte 2015-2024. Com base na referida tabela, é possível notar a tendência para o aumento da oferta interna de energia pela utilização de fontes de energia renovável.

Tabela 2.3 - Participação regional na capacidade instalada do SIN

Ano	Norte	Nordeste	Sudeste/CO	Sul	Total
	Capacidade (MW)				
2015	18.242	21.641	72.202	20.793	132.878
2024	45.353	45.499	87.635	27.960	206.447
Variação(%)	149%	110%	21%	34%	55%

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2015)

Tabela 2.4 - Evolução da oferta interna de energia no horizonte 2015-2024

	2015		2019		2024	
	mil tep	%	mil tep	%	mil tep	%
Energia Não Renovável	172.074	57,5%	183.717	55,0%	218.792	54,8%
Petróleo e Derivados	114.319	38,2%	122.109	36,6%	139.250	34,9%
Gás Natural	33.949	11,3%	33.305	10,0%	46.956	11,8%
Carvão Mineral e Derivados	17.941	6,0%	19.320	5,8%	22.991	5,8%
Urânio (U308) e Derivados	4.038	1,3%	6.858	2,1%	6.986	1,7%
Outras Não Renováveis	1.827	0,6%	2.125	0,6%	2.609	0,7%
Energia Renovável	127.288	42,5%	150.246	45,0%	180.658	45,2%
Hidráulica e Eletricidade	40.417	13,5%	45.073	13,5%	53.270	13,3%
Lenha e Carvão Vegetal	22.403	7,5%	22.993	6,9%	27.444	6,9%
Derivados da Cana-de-Açúcar	50.212	16,8%	60.171	18,0%	67.586	16,9%
Outras Renováveis	14.256	4,8%	22.009	6,6%	32.358	8,1%
Total	299.362	100%	333.963	100%	399.450	100%

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2015)

Pereira Junior *et al.* (2011) destacam que em pouco mais de uma década, o país tem passado por experiências com políticas relacionadas a incentivos de FERs, ainda mais após aos racionamentos e apagões ocorridos entre 2001 e 2002. Em relação às políticas para incentivos a utilização das FERs, o programa PROINFA foi considerado o marco para o setor de energias renováveis no Brasil (DUTRA e SZKLO, 2008). Segundo os autores, o referido programa teve

como objetivo aumentar a contribuição da parcela de eletricidade produzida a partir da energia eólica, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa. Juárez *et al.* (2014) afirmam que em relação ao mecanismo político, o PROINFA se baseou nas FIT. A FIT é uma estratégia baseada em um sistema de preço, no qual o governo garante comprar eletricidade proveniente de FER por um preço fixo pelo kWh de energia produzida, durante um longo período (DEL RÍO, 2012). Contudo, as reformas concretizadas no setor elétrico em 2004 culminaram na adoção dos leilões de energia como principal mecanismo de contratação de projetos de geração, substituindo, portanto, as FIT do PROINFA (SILVA *et al.*, 2013).

Dessa forma, em relação modelo de comercialização de energia, de acordo com Aquila *et al.* (2016), a partir de 2004 foi estabelecido dois ambientes para negociação de contratos de energia elétrica: o Ambiente de Comercialização Regulado, caracterizado pelos leilões de energia e o Ambiente de Comercialização Livre, baseado em contratos bilaterais livremente negociados entre as partes.

2.2 Energia Fotovoltaica

Tendo em vista à crescente demanda de eletricidade em conjunto com as preocupações ambientais, novos investimentos em energias renováveis são essenciais para atender essas demandas sem contribuir com a ameaça do aquecimento global (QUEIROZ *et al.*, 2016). Ao longo dos anos, vários métodos foram implementados para usar fontes renováveis de energia, como energia eólica, energia hidráulica, energia solar, energia térmica, energia das marés, etc. Contudo, Malagueta *et al.* (2013) afirma que, depois da fonte hidráulica, as alternativas renováveis mais utilizadas no Brasil são a energia solar e a eólica. Como a demanda global por energia solar está crescendo, associado ao interesse de sustentabilidade da sociedade, o desenvolvimento e a implantação de tecnologias usando painéis fotovoltaicos também está aumentando (FLOWERS *et al.*, 2016).

De acordo com Malagueta *et al.* (2013), a energia solar é obtida através da conversão de irradiação solar em eletricidade, usando painéis fotovoltaicos ou por meio de sistemas solares concentrados, este último que de acordo com Zhang, Zhou e Zhou (2016) vem ganhando notoriedade nos últimos anos. Em relação a energia gerada a partir de painéis fotovoltaico, um sistema típico de energia solar consiste em três elementos básicos: módulos fotovoltaicos, controladores de carga e as baterias, quando necessárias (SILVEIRA, TUNA e LAMAS, 2013).

A energia fotovoltaica está se desenvolvendo rapidamente, uma vez que sua capacidade instalada cresceu cerca de 14 GW em 2008 para 180 GW em 2014 em todo o mundo (IHS,

2015). Em alguns países, a sua participação no mix de energia elétrica vai rapidamente atingir um limiar que exige uma mudança na gestão técnico-econômica do sistema de energia (GAUDARD e ROMERIO, 2014). Conforme apresentado por Silveira, Tuna e Lamas (2013), os sistemas fotovoltaicos por serem caracterizados por alta confiabilidade e baixa manutenção, possuem altos custos iniciais que são muitas vezes compensado por baixos custos operacionais. A implantação de sistemas fotovoltaicos tem potencial para colaborar tanto com o atendimento da demanda crescente da energia global quanto para reduzir os efeitos ambientais nocivos do consumo de combustíveis fósseis (FLOWERS *et al.*, 2016).

A energia solar cumpre várias finalidades nos setores industriais, agrícolas, domésticos e comerciais da economia (SHARMA, 2011) e as vantagens desse tipo de energia são diversas. Sumathi *et al.* (2017) atribuem a popularidade da energia solar devido à sua característica ubíqua e baixo custo de manutenção. Para Hernandez *et al.* (2012), além dessas vantagens, a energia solar é limpa e está livre para uso. Já Ameen, Pasupuleti e Khatib (2015) destaca que os sistemas fotovoltaicos são considerados sistemas de energia simples, confiáveis, econômicos, ambientalmente amigáveis e que requerem baixo custo de manutenção.

Diversos fatores favorecem o uso de energia solar no Brasil, dentre estes podem ser citadas a grande proporção de dias ensolarados, a intensidade de radiação ótima, a grande área geográfica do país e, além disso, os custos referentes aos equipamentos solares estão diminuindo, enquanto o custo das fontes convencionais está aumentando (ECHEGARAY, 2014). De acordo com Mohammed *et al.* (2015), estes sistemas podem utilizar recursos locais de energia renovável em níveis de segurança elevados, especialmente em áreas remotas. Além disso, a energia solar contribui para o desenvolvimento da economia, uma vez que seus retornos são visíveis economicamente, socialmente e ambientalmente (KAPOOR *et al.*, 2014). Em contrapartida, Crook *et al.* (2011) destacam que as usinas de energia solar representam um investimento considerável na planta, infra-estrutura e terra.

Dentro desse contexto, Krukanont e Tezuka (2007) destacam que a consciência do aquecimento global tornou as tecnologias de energia renovável uma das mais promissoras opções de solução para o século 21. Corroborando com essa afirmação, Ferreira *et al.* (2016) sugerem que uso de fonte renovável é a solução mais valiosa para reduzir os problemas ambientais associados à produção de energia de combustíveis fósseis e consequente emissão de gases de efeito estufa.

2.3 Emissões e Mudanças Climáticas

O CO₂ é o principal gás de efeito estufa e o principal impacto das emissões de gases de efeito estufa é o aquecimento global (SEDDIGHI e AHMADI-JAVID, 2015b). Emissões de CO₂ são também uma importante fonte de acidificação do oceano, quando o CO₂ se dissolve em água para formar o ácido carbônico (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2010). Pesquisas têm mostrado uma crescente preocupação, na medida em que o aquecimento global de mais de 2°C em relação aos níveis pré-industriais terá efeitos perigosos para o nosso clima (GRAßL *et al.*, 2003), podendo levar a situações de mudanças climáticas globais (SEDDIGHI e AHMADI-JAVID, 2015b).

De acordo com Gaudard e Romerio (2014), todas as tecnologias de produção de energia são afetadas pelas mudanças climáticas, na medida em que os escoamentos de água, a velocidade do vento, as nuvens e as elevadas temperaturas podem influenciar a geração hídrica, eólica, fotovoltaica e nuclear, respectivamente. Além disso, os autores supracitados destacam que episódios climáticos extremos são particularmente prejudiciais, pois podem provocar tempestades destrutivas, inundações, deslizamentos de terra, secas e ondas de calor. Entretanto, prever o momento e a medida necessária de possíveis alternativas de mitigação é extremamente difícil (FUSS *et al.*, 2008).

De acordo com Hernandez *et al.*, (2012), para lidar com o problema em relação às alterações climáticas, as Nações Unidas criaram, em 1992, o primeiro tratado internacional sobre o clima, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, também conhecida como UNFCCC (do original em inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change*). Em 1997, com o intuito de reduzir a emissão do gás de efeito estufa, o UNFCCC estabeleceu o Protocolo de Quioto, entrando em vigor somente em 2005 (LAU, LEE e MOHAMED, 2012).

Do Protocolo de Quioto surgiu o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), criado para auxiliar o processo de redução de emissões de gases de efeito estufa ou de captura de carbono. Esse mecanismo possibilita que países em desenvolvimento se beneficiem das atividades de redução de emissões de gases de efeito estufa, por meio da venda das Reduções Certificadas de Emissões (RCEs), permitindo, dessa forma, a obtenção de receitas adicionais negociando esses créditos derivados da emissão de carbono evitada em relação a tecnologias mais poluentes. Conforme apontado por Elliston, Riesz e Macgill (2016), os mecanismos de

política climática, tal como a licença para emissão de carbono pode ser considerado como um motivador para o desenvolvimento das fontes de energias renováveis.

Segundo Lau, Lee e Mohamed (2012), após o Protocolo de Quioto, as discussões sobre as questões climáticas por parte da Conferência das Partes (COP) têm sido realizadas anualmente, com destaque para o acordo de Copenhague, elaborada conforme as negociações pós-Quioto, com os EUA e países em desenvolvimento, como China, Índia, Brasil e África do Sul, estes que têm um papel crucial na elaboração do documento. O Acordo de Copenhague se compromete a reduzir a emissão de gases a patamares entre 25% e 40% até 2020, com base nas medições realizadas em 1990.

De acordo com Zhang, Zhou e Zhou (2016), muitos países perceberam a importância do desenvolvimento e da utilização das energias renováveis na redução da dependência da energia fóssil e na mitigação das alterações climáticas. Nesse sentido, segundo os autores, a China, maior emissora mundial de CO₂, tem feito esforços substanciais para promover o desenvolvimento e a utilização de energias renováveis, no qual o objetivo do país é aumentar a utilização de FER de 10%, do consumo total de energia primária em 2014, para 15% até 2020.

Os objetivos traçados pela União Européia são ambiciosos. Primeiramente, como meta para 2030, busca-se reduzir em, pelo menos, 40% das emissões de CO₂ em relação a 1990, aumentar a quota de FERs para ao menos 27% do consumo energético e, também, aumentar a eficiência energética em no mínimo 27% (BIGERNA, BOLLINO e MICHELI, 2016). Ainda em relação aos planos traçados pela União Européia, a meta “20-20-20” para 2020 e o mapa do caminho (*road map*) para 2050, adotados pela Comissão Europeia, respectivamente, em 2007 e 2011, tem foco na redução duradoura das emissões de gases de efeito estufa e consumo de energia, além de um forte aumento da eficiência energética e tecnologias renováveis (EUROPEAN COMMISSION, 2010 e EUROPEAN COMMISSION, 2011). Nesse contexto, até 2050, pretende-se alcançar a descarbonização em 60-80%, objetivo que vai exigir a reinvenção do sistema energético Europeu, que por sua vez terá um efeito profundo sobre o seu mix de tecnologia de energia (EUROPEAN COMMISSION, 2007). De acordo com Purvins *et al.* (2011), esse compromisso político levará a uma crescente penetração das energias renováveis, principalmente a partir do vento e do sol.

Em adição, essa estratégia é compartilhada por países como a Noruega e a Suíça, que não fazem parte da União Européia. A decisão tomada por alguns países, na sequência do acidente de Fukushima, de abandono da energia nuclear implica igualmente a promoção da eficiência energética e novas energias renováveis (GAUDARD e ROMERIO, 2014).

Em relação ao Brasil, até 2001, não havia incentivos, o que dificultava os empreendedores de pequenos projetos de energia renovável (WACHSMANN e TOMALSQUIM, 2003). De acordo com Aquila *et al.* (2016), somente com a criação do PROINFA que o Brasil realmente testemunhou a implementação de uma política mais ampla voltada para o setor de energia renovável. Ainda segundo Aquila *et al.* (2016), o programa foi apoiado por esquemas de financiamento especiais por meio do BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) com um requisito mínimo de participação de equipamentos nacionais em projetos contratados. Entretanto, desde 2007, o país começou gradualmente a contratar empresas para geração de energia renovável por meio de leilões.

2.4 Planejamento da capacidade de expansão

O planejamento da expansão da geração pode ser definido como o problema de determinar o que, onde e quando novas unidades de geração deve ser construído ao longo de um horizonte de planejamento de longo alcance, para satisfazer a demanda prevista de energia (GITIZADEH, KAJI e AGHAEI, 2013; TEKINER, COIT; FELDER, 2010 e MEZA, YILDIRIM e MASUD, 2007). De acordo com Tekiner, Coit e Felder (2010) muitos dos estudos em planejamento da expansão da geração são focados em encontrar o plano de expansão de menor custo. A falta de planejamento da capacidade de expansão pode ser um grave problema enfrentado pelo país. Segundo Seddighi e Ahmadi-Javid (2015a), satisfazer a demanda de energia é a função principal da geração, transmissão e distribuição de energia. É crucial, pois leva ao desenvolvimento da comunidade.

O planejamento da expansão da geração é considerado um problema de difícil resolução devido a diversas razões. A primeira delas resulta da incerteza associada aos dados de entrada, tais como as previsões de demanda de energia elétrica, as características econômicas e técnicas de novas tecnologias de geração em evolução, os tempos de construção e as regulamentações governamentais (KAGIANNAS, ASKOUNIS e PSARRAS, 2004). Uma segunda dificuldade resulta do fato de que muitas vezes vários objetivos contraditórios devem ser considerados (TEKINER, COIT e FELDER, 2010 e MEZA, YILDIRIM e MASUD, 2007).

Com relação ao planejamento da expansão da geração, de acordo com Seddighi e Ahmadi-Javid (2015a), modelos são tipicamente formulados usando técnicas de programação inteira mista. O objetivo principal é tomar decisões com relação ao investimento em expansão da capacidade de gerações de diferentes unidades geradoras, em diferentes locais, ao longo de um horizonte de planejamento para minimizar o custo total, incluindo o custo de implantação

de novas unidades geradoras e seus custos operacionais e de manutenção. Park *et al.* (2000) destacam que o planejamento da expansão da geração é uma das mais importantes atividades de tomada de decisão em empresas geradoras de energia elétrica e, portanto, segundo Gitizadeh, Kaji e Aghaei (2013) inúmeras técnicas vêm sendo aplicadas com o intuito de dar suporte para processos de tomada de decisão relacionados ao problema.

Gómes, Dopazo e Fueyo (2016) relatam o caso da expansão do setor de geração elétrica da Espanha. Segundo os autores, de 2000 para 2012, o país praticamente dobrou a capacidade de geração de energia, com foco nas energias renováveis. Esta nova capacidade teve alguns impactos positivos, como redução de emissão de CO₂. No entanto, Gómes, Dopazo e Fueyo (2016) destacam que essas mudanças também provocaram graves problemas: excesso de capacidade no sistema de geração de energia; elevados aumentos nas tarifas de energia elétrica; a falta de estabilidade regulatória para o setor de geração elétrica; e o chamado "déficit tarifário". Esta última é a diferença entre a renda incidente de tarifas definida pelo governo e os custos de geração reconhecidos pelo governo.

Park *et al.* (2000) aplicam um modelo baseado em algoritmo genético em um problema de planejamento de expansão de geração com o objetivo de se minimizar custo. Esses tipos de problemas consistem em determinar o plano de adição de capacidade a um custo mínimo, ou seja, escolher o tipo e o número de plantas candidatas que atendam a uma demanda prevista dentro de um critério de confiabilidade pré-especificado ao longo de um horizonte de planejamento. Em seu trabalho, Park *et al.* (2000) aplicam o modelo em dois sistemas. O primeiro se refere a um sistema de energia com 15 plantas existentes, 5 tipos de opções candidatas e um período de planejamento de 14 anos. O segundo caso consiste na aplicação a um sistema real com um período de planejamento de 24 anos.

Com relação ao Brasil, o Modelo de Expansão de Longo Prazo (MELP) utilizado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética), empresa responsável por estudos de planejamento de expansão no Brasil, não considera qualquer tipo de externalidade ou custo ambiental (SANTOS e LEGEY, 2013). Além disso, os autores supracitados salientam que, devido as características do sistema elétrico brasileiro, predominantemente composto por usinas hidrelétricas, a operação centralizada do SIN e sua estratégia de expansão é definido pelo que é chamado de "planejamento determinativo", que visa atender a demanda futura, a um custo mínimo. À vista disso, a próxima seção será dedicada a discussão de trabalhos que analisam a questão de expansão de geração de energia considerando os custos ambientais.

2.5 Planejamento da capacidade de expansão com questões ambientais

Seddighi e Ahmadi-Javid (2015a) apresentam um modelo de programação estocástica de múltiplos-estágios com o intuito de abordar o planejamento sustentável da geração e transmissão de energia. O modelo é aplicado a um caso real de 400 kV da rede de energia do Irã, ao longo de um horizonte temporal de dez períodos e incorpora as incertezas sobre a demanda futura de eletricidade, os custos dos combustíveis, as emissões de gases de efeito estufa, bem como a possibilidade de perturbações em que o sistema de energia está sujeito. A demanda de longo prazo é projetada utilizando o modelo estatístico SARIMA (Sazonal Auto Regressivo Integrado de Média Móvel). Para modelar o preço do combustível (gás natural), os autores utilizam o movimento geométrico browniano (MGB). Para este estudo de caso, o modelo proposto é resolvido usando o CPLEX, que é um otimizador comercial. O modelo consiste em quatro funções objetivo (minimização dos custos de geração, transmissão, sócio-ambientais e corte de carga) e 17 restrições estruturais que envolvem as capacidades para as unidades geradores, capacidade de transmissão, quantidade de energia que pode ser transmitida, conservação de potência em cada nó (lei de Kirchhoff), lei de tensão de Kirchhoff, preocupações ambientais (ruído total das unidades geradores e aceitação social), restrições orçamentárias, perda de carga, restrição de funcionamento da unidade geradora, restrições de não negatividade sobre a potência gerada para cada unidade geradora, fluxos de potência e ângulos de tensão.

Tendo em vista o crescimento da demanda de energia no Brasil, Pereira Junior *et al.* (2013) utilizam o modelo MESSAGE (*Model for Energy Supply System Alternatives and Their General Environmental Impacts*) para examinar o desenvolvimento de fontes renováveis no país com o objetivo de verificar as possibilidades para a penetração dessas fontes no setor elétrico dentro do horizonte temporal 2010-2030. Segundo os autores mencionados acima, o modelo MESSAGE foi desenvolvido para formular e avaliar estratégias alternativas para o fornecimento de energia, em linha com restrições, como limitações de investimento, disponibilidade e preço dos combustíveis, regulamentação ambiental e taxas de penetração de mercado para novas tecnologias, entre outros fatores. Além disso, podem ser avaliados os aspectos ambientais, apresentando e, se necessário, a limitação das emissões de poluentes por tecnologias diferentes em vários níveis da cadeia de energia.

Santos e Legely (2013) propõem uma metodologia para representar os custos associados aos impactos ambientais em um sistema que engloba vários tipos de plantas de geração. Tais custos são externamente introduzidos em um novo modelo proposto, denominado MAPE (Modelo Ambiental de Planejamento da Expansão Elétrica). Os autores utilizam uma metodologia estruturada em duas etapas, na qual a primeira representa uma otimização determinística e, na segunda etapa, os autores utilizam um algoritmo de otimização estocástica denominado critério min-max, cujo o objetivo é encontrar a mínima perda econômica para cada cenário simulado. Os autores concluíram que os resultados obtidos no modelo MAPE, quando se deseja considerar o efeito das variáveis ambientais, pode ser considerado melhores que no MELP.

Meza, Yildirim e Masud (2007) desenvolvem um modelo multiobjetivo de longo prazo para o planejamento da expansão da geração de energia. Neste estudo, os objetivos são a minimização dos custos de investimento, operação e transmissão, impacto ambiental, importações de combustíveis e risco dos custos dos combustíveis de todo o sistema. A abordagem proposta para solução deste modelo consiste em duas fases. Na primeira fase, um conjunto de soluções não-denominadas (planos de expansão) é encontrada usando quatro métodos de programação multicritério: max-min, min-max, programação por compromisso e abordagem ponderada. Estes métodos não requerem qualquer informação de preferência do tomador de decisões (DM). Para a segunda fase, as soluções são classificadas por ordem, usando a Análise Hierárquica de Processos (AHP). Para tanto, com o intuito de ilustrar a estrutura proposta, os autores utilizam um estudo de caso do sistema de energia elétrica Mexicano.

Em resposta às preocupações de sustentabilidade envolvidas na resolução dos problemas de gerenciamento de sistemas de energia em eventos, tais como o furacão Katrina em 2005 e o furacão Sandy em 2012, que causam interrupções no fornecimento de energia, Seddighi e Ahmadi-Javid (2015b) propõem introduzir uma nova abordagem sustentável para o projeto e planejamento de redes de geração de energia considerando o risco de interrupção. Para solução do problema, os autores utilizam uma técnica de programação não linear e aplicaram ao sistema de energia no Sudoeste do Irã. Os resultados mostraram que, ao considerar os riscos de interrupção, os custos totais decrescem significativamente quando comparados com os modelos que desconsideram esses riscos.

Tekiner, Coit e Felder (2010) utilizam uma otimização multiobjetivo para minimizar o custo e o impacto ambiental (minimização das emissões de CO₂ e NO_x). A disponibilidade de

componentes do sistema é considerada como uma parte do problema de planejamento de expansão. Simulação de Monte Carlo utilizada para gerar cenários baseados na incerteza de disponibilidade dos componentes do sistema. Em seguida, os autores propõem um modelo de programação estocástica em dois estágios para resolver o problema de planejamento da expansão da geração. Os resultados apresentados mostram que, quando a importância da redução da emissão de gases é aumentada, as tecnologias com menor emissão de gases são selecionadas. Quando o objetivo é encontrar o plano de menor custo, sem considerar seu efeito ambiental, as unidades que utilizam carvão como combustíveis são usadas em larga escala.

Baseando-se em estudos que avaliam a variação do custo incremental com a inserção de maiores parcelas de energias renováveis na matriz energética, Elliston, Riesz e Macgill (2016) utilizam como objeto de estudo o mercado de energia elétrica australiano (NEM – *Australian National Electricity Market*). Visto que 75% da geração da energia desse país é originado de combustíveis fósseis (predominantemente o carvão), para avaliar os custos incrementais de níveis mais elevados de energia renovável (RE), os autores utilizam um modelo de otimização conhecido como Otimizador Nacional de Mercado de Eletricidade (NEMO, do inglês *National Electricity Market Optimiser*) para encontrar portfólios de geração de eletricidade com menores custos.

De acordo com Queiroz *et al.* (2016), ao se projetar um sistema de energia robusto para o futuro, é necessário considerar os diferentes cenários climáticos na avaliação das FER. Nesse contexto, os autores avaliam o impacto de cenários de mudanças climáticas na energia assegurada das centrais hidrelétricas no Brasil. Para Queiroz *et al.* (2016), a avaliação das projeções climáticas na energia assegurada, que é a métrica adotada no Brasil para identificar a disponibilidade de energia que as centrais hidrelétricas podem comercializar no mercado, é crucial uma vez que orienta os investimentos futuros e, conseqüentemente, direciona a composição da futura carteira de geração de eletricidade do país. Os resultados obtidos pelos autores mostram que a energia assegurada será menor em termos percentuais (afetando diretamente os fluxos de caixa desses projetos) quando a informação climática for considerada no parque gerador futuro (FGS, do inglês *future generation system*), uma vez que a maior redução de chuva ocorreria na região Norte, onde os novos investimentos em usinas hidrelétricas estão planejados.

2.6 Análise de investimentos no setor de energia

Segundo Yang *et al.* (2008), investimentos no setor de energia tem pelo menos três características cruciais. Primeiramente, o investimento é parcialmente ou completamente irreversível. Em segundo lugar, sem coberturas (*hedges*), as incertezas relacionadas aos riscos do preço, a evolução do mercado e as intervenções políticas podem ter um efeito substancial sobre o desempenho financeiro. Por fim, os autores afirmam que, sem um planejamento central, o tempo de um investimento é discricionário.

De acordo com IEA (1998), como resposta às mudanças climáticas, uma variedade de modelos de energia tem sido amplamente desenvolvida não só para otimizar a alocação de mercado, mas também para analisar as políticas de redução de emissão, particularmente nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). No entanto, segundo Krukasant e Tezuka (2007) avaliar cenários futuros ou opções políticas inevitavelmente envolve grandes incertezas no processo de tomada de decisão. Na maioria dos modelos tradicionais de energia, a análise de cenários futuros é geralmente conduzida assumindo informação perfeita sobre o futuro, ignorando assim as incertezas. Kann e Weyant (2000) destacam que a programação estocástica surge como uma das ferramentas mais apropriadas para modelar as políticas climáticas e planejar os problemas que são estrategicamente resolvidos por tomar ações ótimas hoje frente as incertezas futuras.

A seleção da política climática tem de ser feita em um ambiente de extrema incerteza, uma vez que tanto os benefícios quando os custos de uma determinada política climática são desconhecidos e, no melhor dos casos, poderiam ser descritos por uma distribuição de probabilidade de vários resultados (ANDA, GOLUB e STRUKOVA, 2009). Nesse sentido, os autores mencionados acima ilustram uma aplicação dos conceitos de Opções Reais (ROA, do inglês *Real Option Approach*) para analisar os benefícios de se adotar metas provisórias de emissão de gases combinada com um futuro ajuste da política em resposta a novas informações sobre os custos e benefícios de uma política climática. Os resultados obtidos demonstram valores positivos de flexibilidade obtido por uma política climática provisória destinada a evitar alterações irreversíveis.

Yang *et al.* (2008) analisam os efeitos da incerteza da política climática do governo sobre a tomada de decisão dos investidores privados no setor de energia. Dessa forma, por meio da técnica de Opções Reais, os autores mencionados acima avaliam os riscos associados à incerteza na política de mudança climática com o intuito de fazer recomendações sobre como a

política poderia ser implementada para reduzir o risco de investimento. Vale ressaltar que nesse estudo toda a incerteza relativa à política de mudança climática é expressa por meio do preço do carbono. Os resultados do modelo proposto por Yang *et al.* (2008) indicam quatro conclusões gerais: i) os riscos das políticas de mudanças climáticas podem se tornar grandes se houver apenas um período curto de tempo entre um futuro evento de política climática e o momento em que a decisão de investimento está sendo tomada; ii) a forma como as variações dos preços do CO₂ e do combustível se repercutem nas variações dos custos da eletricidade é um determinante importante do risco global de investimento que as empresas enfrentarão; iii) os riscos de investimentos variam de acordo com a tecnologia considerada, com a energia nuclear aparentemente exposta aos riscos associados ao preço do combustível e ao preço de CO₂; e iv) o governo será capaz de reduzir os riscos dos investidores através da implementação de políticas climáticas de longo prazo (10 anos) em vez de políticas de curto prazo (5 anos).

Existem alguns questionamentos recorrentes na literatura, tais como: Qual o nível adequado de redução de emissões de gases de efeito estufa? Quando as emissões deveriam ser reduzidas? Baseando nesses dois questionamentos referentes ao aquecimento global e a posição do governo em relação as decisões de investimento ambiental, Lin, Ko e Yeh (2007) avaliam o tempo ótimo para adoção de políticas climáticas, por meio da expansão do modelo contínuo de tomada de decisão elaborado por Pyndyck (2002), considerando as incertezas econômicas e ambientais, por meio da utilização do ROA. Com base em um exemplo numérico, Lin, Ko e Yeh (2007) destacam que os decisores deveriam adotar uma política climática quando a quantidade de poluentes atingir um nível mundial de 48 milhões de toneladas.

Zhang, Zhou e Zhou (2016) desenvolvem um modelo de opções reais para avaliar o investimento em energia renovável na China, considerando quatro fatores de incerteza, incluindo preço do dióxido de carbono (CO₂), custo de energia não renovável, preço de mercado da eletricidade e os investimentos de projeto de energia renovável. Em seguida, os autores aplicam o modelo proposto para avaliar empiricamente o valor de investimento e o tempo ideal para geração de energia solar fotovoltaica na China. Primeiro, os autores encontram o ambiente de investimento atual na China não positivo o suficiente para atrair investimento imediato. Em segundo lugar, quando se considera a negociação de emissões de carbono, o valor de investimento tende a aumentar substancialmente e o momento ótimo de investimento também pode ser alterado para um ano anterior. Em terceiro lugar, o aumento da capacidade de geração das unidades, o preço de mercado da eletricidade, o preço do CO₂ e o subsídio poderiam aumentar o valor do investimento e antecipar o tempo ótimo de investimento, enquanto o

aumento do custo do investimento desempenha um papel oposto. A volatilidade no preço de mercado de eletricidade e do preço do CO₂ poderiam atrasar o tempo ótimo de investimento, além de aumentar o valor do investimento. Por fim, Zhang, Zhou e Zhou (2016) destacam que a volatilidade do custo de investimento poderia impulsionar ligeiramente o momento ótimo da decisão de investir e reduzir o valor do projeto.

Como relação ao Brasil, Pereira *et al.* (2013) e Lucena *et al.* (2010) analisam os impactos das mudanças climáticas nos investimentos em projetos de energia renovável. De acordo com Pereira *et al.* (2013) e Lucena *et al.* (2010), apesar da produção de energia eólica ter aumentando recentemente, os projetos eólicos de longo prazo não incluem os impactos ainda desconhecidos das mudanças climáticas. À vista disso, Pereira *et al.* (2013) avaliam esses impactos por meio da aplicação de projeções de um modelo climático e análise de tendências sobre séries temporais climatológicas no Sul e Nordeste do Brasil. Os resultados indicam que o impacto global das mudanças climáticas globais sobre a energia eólica nessas regiões possa ser favorável à rentabilidade dos projetos existentes e futuros.

Já Lucena *et al.* (2010) analisam os possíveis impactos da alteração climática global (GCC, do inglês *Global Climate Change*) sobre o potencial eólico do Brasil, por meio da simulação de condições de vento associadas aos cenários A2 e B2 do Relatório Especial do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) sobre cenários de emissões. Os resultados apresentados por Lucena *et al.* (2010) indicam que, assim como em Pereira *et al.* (2013), o potencial eólico no Brasil não ficaria comprometido no futuro devido a possíveis condições climáticas futuras representadas pelos cenários considerados. Pelo contrário, são esperadas condições melhores de vento, particularmente na costa nordeste do país. Portanto, os investimentos em geração de energia eólica podem ser uma forma interessante de ampliar a produção de energia renovável no Brasil.

2.7 Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos de energia são sistemas que combinam duas ou mais fontes, pelo menos uma de energia renovável e uma de fontes convencionais de energia (EI KHADIMI, BACHIR e ZEROUAL, 2004). O uso de sistemas híbridos é uma forma de se reduzir a dependência a combustíveis fósseis, usando energia de fontes solar e eólica (BELFKIRA, ZHANG e BARAKAT, 2011). De acordo com Belfkira, Barakat e Nichita (2008), em sistemas remotos, tais como telecomunicações de rádio, estações terrenas de satélites ou em locais distantes de um sistema de energia convencional, os sistemas de energia híbridos são

considerados mais adequados na maioria dos casos. Tais sistemas são equipados com geradores a diesel para atender a demanda pico, quando não há geração por outras fontes (BOROWY e SALAMEH, 1996). Para Mohammed *et al.* (2015), os sistemas híbridos compostos por sistemas fotovoltaicos e geradores a diesel estão amplamente espalhados pelo mundo, devido a fatores econômicos e técnicos.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2008), inúmeros sistemas híbridos têm sido instalados em muitos países do mundo nas últimas três décadas, basicamente com o intuito de fornecer eletricidade para comunidades isoladas, para pequenos sistemas de bombeamento e dessalinização de água, refrigeração, entre outras aplicações. O primeiro sistema híbrido do Brasil corresponde ao sistema eólico-diesel de Fernando de Noronha, no estado de Pernambuco, implantado no ano de 1986. Uma grande quantidade de sistemas híbridos implantados no Brasil encontram-se na Região Amazônica suprindo vilas isoladas. Tais sistemas buscam principalmente reduzir o consumo de óleo diesel e promover a troca de conhecimentos e experiências através da formação de mão-de-obra especializada, além de proporcionar benefícios socioeconômicos aos moradores locais.

Ainda segundo o Ministério de Minas e Energia (2008), no Brasil, ainda não há políticas bem definidas de incentivos para o emprego desses sistemas. Contudo, diversas instituições nacionais, como a ANEEL o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás (CEPEL), o Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDEA)/Universidade Federal do Pará (UFPA), o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE)/Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), o Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR)/Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), a Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás); e internacionais, como o *U.S. Department of Energy* (DOE), através do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), interessadas na utilização desses sistemas, têm promovido a instalação e/ou monitoração de sistemas híbridos no Brasil, além de estudos diversificados.

Dessa forma, como pode ser visto, apesar da geração híbrida se mostrar uma alternativa interessante e viável para investidores e governo, não há no Brasil um ambiente de contratação específico e nem modelos que buscam orientar a contratação desses tipos de projeto. Nesse sentido, visto a importância desses sistemas e sua ampla utilização no mundo, principalmente em áreas isoladas, diversos autores analisam sistemas híbridos, aplicando tanto modelos de otimização quanto análises técnico-econômicas, e algumas dessas abordagens são analisadas no decorrer deste trabalho.

Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006) aplicam um Algoritmo Evolutivo da Força de Pareto (SPEA, do inglês *Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) para a otimização multiobjetivo de um sistema autônomo fotovoltaico-eólico-diesel. Os objetivos a serem minimizados são o custo total e as emissões de gases CO₂. De acordo com os autores estes dois objetivos estão em conflito, uma vez que a redução dos custos implica em um aumento das emissões de poluentes e vice-versa. Portanto, a tarefa de se obter bons resultados em problemas desse tipo (multiobjetivo) é complicada. O modelo foi aplicado para dois diferentes perfis de carga na cidade espanhola de Zaragoza, resultando em fronteiras de Pareto contendo cinco soluções, na qual encontra-se duas soluções extremas que contém as configurações que resultam no menor custo total e no menor nível de emissão de gases. As três soluções restantes mostram as configurações que expõem os resultados intermediários dessas duas variáveis.

Assim como Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006) e Dufo-López *et al.* (2011) descrevem uma aplicação do SPEA para a otimização multiobjetivo de um sistema autônomo fotovoltaico-eólico-diesel com armazenamento utilizando baterias. No entanto, nesse caso, os objetivos a serem minimizados são o custo nivelado de energia (LCOE) e as emissões equivalentes de ciclo de vida de dióxido de carbono (LCE). No cálculo do LCOE, por se tratar de sistemas isolados, considera-se apenas a carga consumida e não a produção gerada, uma vez que nesses tipos de sistemas uma parcela da produção gerada é desperdiçada. Em relação a emissão de gases CO₂, são incluídas as emissões equivalentes a manufatura, transporte e reciclagem dos componentes do sistema, além das emissões provenientes da queima do combustível. Para tanto, os autores aplicam o modelo a duas localizações na Espanha (Aeroporto de Zaragoza e Jaca) e duas cargas anuais distintas. Dessa forma, quatro casos de otimização são analisados, interagindo cada localização com as cargas anuais e para cada caso o modelo gera uma fronteira de Pareto com as combinações de PV-eólico-diesel-baterias-inversores e controles estratégicos com diferentes LCOE e LCE. Os melhores resultados para os dois casos de Zaragoza incluem sistemas híbridos PV-eólico-diesel com baterias. Já para o caso de Jaca, nos dois casos analisados, as melhores soluções excluem a utilização de geração eólica, sendo os melhores resultados derivados de sistemas híbridos PV-diesel com baterias. Observa-se-se que em nenhum cenário descarta-se a utilização de sistemas fotovoltaicos.

Como pode ser observado, o trabalho de Dufo-López *et al.* (2011) apresenta como evolução para o trabalho de Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006) a consideração das emissões oriundas dos processos de manufatura, transporte e reciclagem na análise de

emissão para cada fonte de energia. Permitindo, dessa forma, que o diesel seja considerado como uma boa opção em ocasiões que as emissões desses processos forem suficientemente altas. Além disso, ao invés de se considerarem os custos totais no modelo, Dufo-López *et al.* (2011) buscam a minimização do LCOE.

Belfkira, Zhang e Barakat (2011) apresentam uma metodologia de otimização de dimensionamento em um sistema híbrido autônomo fotovoltaico-eólico-diesel com e sem bateria. Para tanto, um algoritmo determinístico, conhecido como método DIRECT, é utilizado para apresentar o número ótimo de turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos e baterias, buscando o objetivo de se minimizar o custo total do sistema no atendimento da demanda de energia. Os dados de radiação, temperatura e velocidade do vento utilizados são referentes a Dakar, no Senegal. Dessa forma, a partir da aplicação do modelo proposto, Belfkira, Zhang e Barakat (2011) apresentam as configurações ótimas dos sistemas com e sem baterias, mostrando a quantidade de cada tecnologia que deve ser usada e qual o custo resultante dessa configuração. Além disso, os resultados apresentados pelos autores sugerem que o sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel com baterias é a melhor solução para atender a demanda de regiões isoladas de Dakar, uma vez que os custos para utilização da bateria, reduzindo as horas de operações do gerador a diesel, resultaram em menores custos.

Apesar do modelo apresentado por Belfkira, Zhang e Barakat (2011) sugerir a configuração de um sistema isolado por meio de um modelo de otimização, este pode ser considerado uma abordagem simplificada, uma vez que há apenas um objetivo a ser alcançado, a minimização do custo total, desconsiderando importantes fatores, tais como a emissão de poluentes e a área de instalação necessária para cada tecnologia.

Rezzouk e Mellit (2015) analisam a viabilidade técnico-econômica de um sistema híbrido de energia fotovoltaica-diesel-bateria destinado a abastecer uma unidade de pesquisa localizada no Norte da Argélia. Para este fim, os autores utilizam o *software* HOMER® com o intuito de estudar e comparar as configurações distintas do sistema com penetrações de PV (25%, 50% e 75%), um sistema autônomo de gerador a diesel e um sistema autônomo de geração de energia fotovoltaica. O desempenho destes sistemas foi analisado com base em alguns critérios determinantes tais como valor presente dos custos (VPC), LCOE, excesso de energia, satisfação da demanda, economia de consumo de combustível, custos de manutenção e operação de geradores a diesel e taxas de CO₂ e poluentes evitados. Os resultados expostos por Rezzouk e Mellit (2015) sugerem que o sistema autônomo de gerador a diesel é o mais econômico quando comparado aos outros sistemas analisados, uma vez que os custos de

instalações de fontes renováveis são mais elevados. Em adição, esse sistema satisfaz a demanda com apenas 3% de excesso de energia produzida. No entanto, a partir da análise dos sistemas modelados, recomenda-se a utilização do sistema híbrido com 25% de penetração de energia fotovoltaica, uma vez que nesse sistema encontra-se o menor valor de VPC e LCOE quando comparado com os outros sistemas evitando, ainda, a emissão de 102,251kg/ano de CO₂.

Neste trabalho, apesar de Rezzouk e Mellit (2015) utilizarem uma vasta gama de variáveis para analisar os benefícios de cada configuração do sistema híbrido, os autores não utilizam um modelo de otimização para escolher a melhor configuração analisando mais de um objetivo simultaneamente. Sendo assim, como cada variável tem que ser analisada separadamente, é possível que se encontre soluções distintas dependendo das variáveis que se deseja otimizar.

Silva, Severino e Oliveira (2013) examinam os aspectos técnicos e econômicos relativos à avaliação e otimização de um sistema híbrido autônomo, composto por um sistema fotovoltaico (PV), células de combustível (FC, dispositivo eletroquímico que produz eletricidade através da reação de hidrogênio e oxigênio na presença de um eletrólito) e baterias para fornecer energia a comunidades isoladas da Amazônia brasileira, mais precisamente no estado de Tocantins. As simulações computacionais foram desenvolvidas com o auxílio do *software* HOMER®. Nesse modelo, para cada hora do dia, o sistema compara a energia demandada e a capacidade do sistema de fornecer a energia, determinando se o sistema é viável e estimando o custo do ciclo de vida do sistema. No processo de otimização, o *software* encontrou que o resultado ótimo quando se utiliza o armazenamento de hidrogênio é alcançado quando o sistema híbrido é composto de módulos fotovoltaicos de 8,78 kWp, uma célula a combustível de 1 kW, um eletrolisador de 2 kW e 4 baterias. E o resultado ótimo encontrado é alcançado quando o sistema é constituído por módulos fotovoltaicos de 6,82 kWp e 16 baterias. Finalmente, os autores destacam que, a partir dos resultados encontrados, o uso de um sistema híbrido PV-FC com baterias não é economicamente viável, uma vez que o investimento inicial, o VPC e o LCOE foram consideravelmente superiores aos valores encontrados para o sistema híbrido composto por módulos fotovoltaicos e baterias.

Assim como em Rezzouk e Mellit (2015), Silva, Severino e Oliveira (2013) descartam a análise multiobjetivo para melhor configuração de sistemas híbridos isolados. No entanto, neste trabalho, diferentemente do trabalho apresentado por Rezzouk e Mellit (2015), todas as variáveis escolhidas apontam para uma mesma configuração, uma vez que, no caso analisado, os custos sempre vão apontar para o sistema híbrido PV com baterias como a solução ótima.

Entretanto, uma análise mais aprofundada, utilizando outras variáveis que, eventualmente, podem incentivar o uso de células combustíveis poderiam ser consideradas em uma análise multiobjetivo.

Ameen *et al.* (2015) apresentam modelos de fluxo de corrente em sistemas híbridos PV-Diesel com baterias, usando o *software* MATLAB, com o objetivo de prever o desempenho desse sistema durante um período de tempo específico. Ainda, os autores fornecem uma validação experimental, comparando os dados resultantes do modelo desenvolvido com dados reais de um sistema localizado em Oman, para mostrar a precisão dos modelos propostos. Para tanto, são utilizados dois dias com características distintas, sendo o primeiro baseado em um dia com o céu claro e o segundo com incertezas em relação a radiação solar. A partir de análises, os autores concluem que o modelo proposto pode prever com precisão o desempenho do sistema em perfis de céu aberto ou incerto.

2.7.1 *Sistemas híbridos diesel-fotovoltaico*

Um típico sistema híbrido diesel-fotovoltaico consiste em um sistema composto por módulos fotovoltaicos, que convertem a luz solar para corrente contínua (DC), controladores de carga, inversores, bancos de bateria para armazenar o excesso de energia, gerador a diesel que fornece corrente alternada (AC) e carga (MOHAMMED *et al.*, 2015 e AMEEN *et al.*, 2015).

Em relação a configuração, os sistemas híbridos podem ser classificados em:

- Série: nessa configuração, tanto as FERs quanto as fontes de energia não renovável (gerador a diesel, por exemplo) são usadas para carregar o banco de bateria. Nesse modelo, as cargas DC são supridas diretamente pelo barramento DC e as cargas AC são supridas através do inversor de tensão;
- Chaveado: O banco de baterias é carregado pelas FERs e/ou pelo grupo gerador a diesel. A carga AC pode ser suprida diretamente pelo gerador a diesel ou pelo inversor de tensão, nunca pelos dois ao mesmo tempo. O chaveamento entre as fontes pode ser feita de maneira manual ou automática;
- Paralelo: nessa configuração, uma ou mais fontes podem suprir as cargas CA, através do sincronismo entre o inversor e o grupo gerador a diesel. Uma vez que no presente trabalho, essa configuração é selecionada, a seguir é apresentada a esquematização desse tipo de sistema (Figura 2.1).

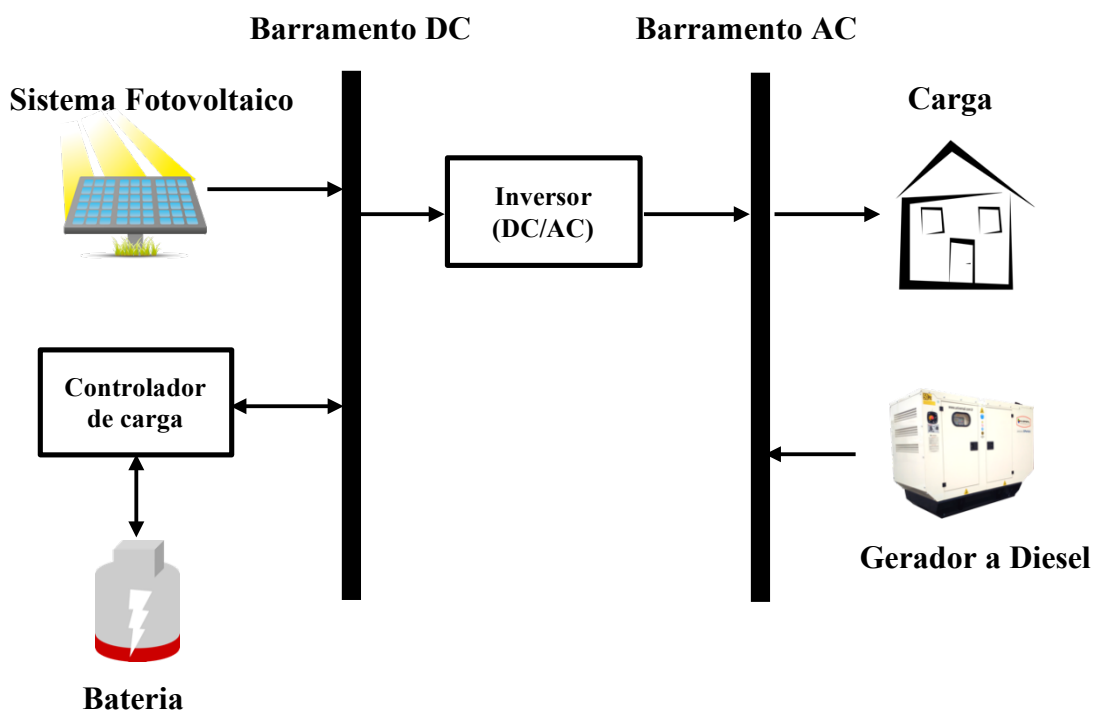


Figura 2.1 - Sistema híbrido PV-diesel com baterias

A Figura 2.1 apresenta um típico sistema PV-diesel para sistemas isolados. Esse sistema é constituído por módulos fotovoltaicos combinados em série ou paralelo, associado a um conjunto gerador diesel. Um controlador de carga que opera em DC é utilizado para controlar a carga e descarga da bateria, evitando, portanto, que a bateria opere em condições anormais. Inversores são necessários para converter a corrente DC, proveniente do sistema fotovoltaico e armazenada pelas baterias, em corrente AC. Como pode ser visto, esse sistema possui um subsistema de armazenamento (banco de baterias).

Segundo Ministério de Minas e Energia (2008) as principais vantagens da configuração em paralelo são:

- Possibilidade de maximização da eficiência do grupo gerador a diesel;
- Possibilidade de redução da manutenção do gerador a diesel.
- Redução das capacidades do grupo gerador, banco de baterias, fontes renováveis e inversor e, conseqüentemente, dos investimentos.

2.7.2 *Dimensionamento de sistemas híbridos diesel-fotovoltaico*

Para dimensionamento do sistema fotovoltaico com baterias, assumindo que o painel é composto pelo sistema rastreador de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point*

Tracking), foram considerados os conceitos apresentados em McEvoy *et al.* (2012) e Khatib *et al.* (2011), representando em etapas, como pode ser visto a seguir:

1. Determinação da hora solar de pico (PSH, do inglês *Peak Solar Hours*):

$$PSH = \frac{G_w}{1kW/m^2} \quad (2.1)$$

Sendo G_w o menor valor de disponibilidade solar do local em kWh/m^2 ;

2. Demanda diária média (L) em Wh;
3. Demanda diária média (L') que deve ser atendida (geração entregue) pelo sistema fotovoltaico. Uma vez que o inversor apresenta uma eficiência igual a η_{inv} , a energia que deverá ser entregue ao inversor, para garantir que este entregue a energia necessária para suprir a demanda, deverá ser calculado de acordo com a Equação 2.2.

$$L' = \frac{L}{\eta_{inv}} \quad (2.2)$$

4. Determinação da tensão nominal de operação do sistema (V_{DC}) em Volts [V].
5. Determinação da tensão da bateria (V_{bat}) normalmente projetada para operar nos níveis de tensão de 12 [V] ou 24 [V];
6. Corrente I_{SC} (corrente em curto circuito) do módulo em Ampere [A];
7. Determinação da corrente a ser fornecida para a carga (I_{DC}) [A]:

$$I_{DC} = \frac{L'}{PSH \times V_{DC}} \quad (2.3)$$

8. Determinação de um fator de segurança (FS) devido a existência de perdas adicionais (sujeira nos módulos e perdas de potência por temperatura, por exemplo) ou para aumentar o desempenho do sistema;
9. Determinação do número de módulos fotovoltaicos conectados em paralelo (N_p)::

$$N_p = FS \times \left(\frac{I_{DC}}{I_{SC}} \right) \quad (2.4)$$

10. Determinação do número de módulos conectados em série (N_s):

$$N_s = \frac{V_{DC}}{V_{bat}} \quad (2.5)$$

11. Determinação do número de módulos totais:

$$N_{mod} = N_p \times N_s \quad (2.6)$$

12. Potência total instalada:

$$P_{total} = N_{mod} \times P_n \quad (2.7)$$

onde, P_n é a potência nominal do módulo fotovoltaico [Watts];

13. Determinação da capacidade do banco de bateria (C_n) em termos de energia que pode ser armazenada em [Wh]:

$$C_n = C_s \frac{L}{PD} \quad (2.8)$$

Sendo C_s o número de dias de autonomia requeridos pelo sistema para funcionar sem geração de energia e PD a profundidade máxima de descarga da bateria.

Na determinação da potência instalada dos inversores, considera-se um fator de segurança para acionamento de dispositivos elétricos que consomem uma alta corrente de partida.

$$P_{inv} = P_{total} \times FS_{inv} \quad (2.9)$$

Para estimativa da potência instalada de gerador a diesel, Kolhe *et al.* (2002) utilizam a Equação (2.10).

$$P_N^D = \frac{D_{Max}}{H_p \times F_c} \quad (2.10)$$

onde, P_N^D é a potência nominal em [W], D_{Max} é a demanda diária de pico do sistema [Wh], H_p é a quantidade de horas máxima de operação por dia e F_c é o fator de carga do gerador.

2.8 Custo nivelado de energia

Uma métrica de análise de investimentos vista com frequência na literatura acadêmica para avaliar os custos de geração a partir de diferentes tecnologias e fontes de energia é o custo nivelado de energia. Além disso, o LCOE é muito utilizado por órgãos formuladores de políticas energéticas (IRENA, 2015; BORENSTEIN, 2012). Segundo Singh e McFarland (2015), essa métrica permite a comparação direta de diferentes sistemas de energia.

O LCOE se refere ao custo médio de um projeto de geração, ou mais especificamente aos custos totais relacionados à geração descontados para o presente, por cada unidade de energia produzida ao longo da vida útil (EDENHOGGER *et al.*, 2013). Como um custo descontado da energia durante um projeto, o LCOE é amplamente utilizado para obter uma base consistente para comparação em um período fixo, uma vez que cada tecnologia de energia possui seu próprio período operacional (LEE, 2016).

De acordo com Flowers *et al.* (2016), o LCOE leva em conta os custos totais e a quantidade de eletricidade produzida ao longo da vida útil de uma usina para determinar o custo de vida útil total por quilowatt-hora (kWh) de eletricidade produzida. No entanto, em sistemas isolados, o LCOE não é calculado como o custo por kWh gerado pelas diferentes fontes de energia, à medida que uma quantidade considerável de energia é perdida, em vez disso, esse indicador é obtido a partir da divisão do custo total (inclui os investimentos iniciais, custos de operação e manutenção, custo de combustível e custo de capital) pelo kWh consumido pela carga elétrica (DUFO-LÓPEZ *et al.*, 2011).

Rezzouk e Mellit (2015) apresentam a equação para cálculo do custo nivelado de energia, representada pela Equação 2.11 abaixo.

$$\text{LCOE} = \frac{\text{TOTEX}}{E_t} \quad (2.11)$$

Sendo TOTEX a soma dos valores presentes dos custos de cada componente do sistema, incluindo o investimento, custo de substituição, operação e manutenção, além dos custos de combustível. E_t é a energia total produzida pelo sistema. Entretanto, uma vez que, em sistemas isolados, considera-se como denominador o consumo total (C_t), a Equação 2.11 pode ser adaptada para a Equação 2.12, apresentada a seguir.

$$\text{LCOE} = \frac{\text{TOTEX}}{C_t} \quad (2.12)$$

Vale ressaltar que, tanto para cálculo do TOTEX quanto para estimativa do consumo total deve-se descontar os valores anuais pelo custo médio ponderado do capital (WACC, do inglês *Weighted Average Capital Cost*), assim como pode ser visto em Flowers *et al.* (2016).

O cálculo do WACC segue a formulação apresentada em Aquila *et al.* (2016), descrita pela Equação 2.13.

$$WACC = K_d D(1 - t) + K_e E \quad (2.13)$$

Sendo K_d representa o custo de capital de terceiros, D denota a parcela do capital de terceiros aplicado no investimento (%), t é o imposto de renda, K_e é o custo de capital próprio e E denota a fração do capital total representado pelo capital próprio (%). Para cálculo do custo de capital de terceiros (K_d) destaca-se a metodologia indicada pela ANEEL (2016b). Essa metodologia considera a soma entre a taxa livre de risco, prêmio de risco de crédito e prêmio de risco país, conforme apresentada a Equação 2.14.

$$K_d = r_f + r_c + r_b \quad (2.14)$$

Sendo r_f a taxa livre de risco, r_c o prêmio de risco de crédito, r_b o prêmio de risco país.

No cálculo do capital próprio (K_e), uma abordagem muito utilizada na literatura é o *Capital Asset Pricing Model* (CAPM), apresentado por Sharpe (1964). A Equação 2.15 apresenta a formulação proposta por Sharpe.

$$K_e = r_f + \beta x (r_m - r_f) + r_b \quad (2.15)$$

Sendo β (beta alavancado) o risco do projeto em relação ao mercado e r_m o retorno esperado do mercado.

2.9 Entropia

De acordo com Pineda (2006), o conceito de entropia teve sua origem na mecânica estatística se referindo tanto a um estado como uma tendência. O primeiro caso se refere ao grau de desorganização da matéria e o segundo a tendência de desorganização da matéria. Além disso, os autores mencionados acima destacam que, segundo a termodinâmica, num sistema fechado, a desorganização pode aumentar, mas jamais diminuir. Apesar do surgimento dos conceitos de entropia na física, somente a partir do estudo de Shannon (1948), no qual o autor transformou a entropia numa medida de quantidade de informação, é que tal conceito passou a ganhar maior abrangência.

De acordo com Rocha *et al.* (2015b), a entropia, proposta por Shannon (1948), pode ser definida como uma medida de incerteza probabilística e seu uso é indicado em situações onde as distribuições de probabilidade são desconhecidas, em busca de diversificação. Conforme o autor supracitado, a entropia $S(x)$ é calculada usando as respostas geradas pela fronteira de Pareto, conforme apresentado na Equação 2.16.

$$S(x) = - \sum_{i=1}^h x_i \ln(x_i) \quad (2.16)$$

Sendo h o número de variáveis de decisão e x_i os percentuais das variáveis que fazem parte do sistema a ser diversificado, pressupondo que a soma de todos os percentuais é igual a 1. A partir da medida de entropia é possível encontrar um ponto ótimo com a máxima diversificação em sistema com diferentes componentes.

De acordo com Fang, Rajasekera e Tsao (1997) dentre as propriedades desejáveis do Índice de Entropia, duas se destacam. Primeiro, a medida de entropia é não-negativa garantindo, portanto, soluções não nulas. Segundo, sua medida é côncava. Essa propriedade é desejável devido a maior facilidade em maximizar uma função côncava em relação a uma não-côncava.

3 Projeto de Experimentos e Otimização Matemática

Conforme abordado por Gomes (2013), para promover a otimização dos diversos processos, o analista deve seguir uma sequência de passos para formulação matemática e análise do problema, consistindo além da definição das variáveis de decisão, restrições estruturais e limites, funções objetivo, alocação de pesos para as funções objetivo, identificação do ponto de ótimo e a análise dos resultados. Nesse contexto, o objetivo desse capítulo é apresentar as ferramentas matemáticas utilizadas neste trabalho para cumprimento dos passos indicados.

3.1 Projeto e Análise de Experimentos (DOE)

Um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes em que alterações são feitas nas variáveis de entrada de um processo, com o intuito de se observar a forma como as respostas são afetadas pelas mudanças provocadas nas variáveis de entrada (MONTGOMERY, 2013)

O Projeto e Análise de Experimentos (DOE, do inglês *design of experiments*) é uma forma de delineamento experimental que utiliza métodos estatísticos para planejar e executar experimentos (MONTGOMERY, 2013 e BOX, HUNTER e HUNTER, 1978). Para Solvason *et al.* (2009), a partir de um modelo para representar a superfície de resposta, os pontos de projeto experimental são colocados em áreas onde as observações podem ser coletadas e o modelo pode ser montado.

De acordo com Montgomery (2013), o processo do DOE pode ser aplicado por meio das seguintes etapas:

1. Definição do Problema;
2. Escolha das variáveis de resposta;
3. Seleção dos fatores e definição de seus níveis superiores e inferiores;
4. Seleção do projeto experimental;
5. Execução dos experimentos;
6. Análise estatísticas dos dados;
7. Conclusões e recomendações

Na primeira etapa, é necessário desenvolver todas as ideias sobre os objetivos da experiência, uma vez que uma noção clara do problema, frequentemente, contribui para uma melhor compreensão do fenômeno que está sendo estudado. Em seguida, ao selecionar a

variável de resposta, é necessário que essa variável realmente forneça informações úteis sobre o processo em estudo. A terceira etapa consiste na escolha dos fatores que devem influenciar o desempenho do sistema e definição dos seus níveis. Para Montgomery (2013) e Myers e Montgomery (2002), com relação aos projetos experimentais, as técnicas mais utilizadas são o planejamento fatorial completo, o planejamento fatorial fracionado, os arranjos de Taguchi, a Metodologia de Superfície de Resposta e os experimentos de misturas. Na execução do experimento, salienta-se a importância de monitorar o processo para garantir a qualidade do mesmo. Após a execução do experimento, técnicas estatísticas devem ser utilizadas para medir a qualidade do modelo. Dessa forma, é possível, por exemplo, representar o percentual dos dados observados na resposta que o modelo matemático consegue explicar. Uma vez que os dados foram analisados, o experimentador deve tirar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar um curso de ação.

No presente trabalho, deseja-se encontrar a configuração ótima de um sistema híbrido a partir de uma formulação multiobjetivo. Isto é, busca-se encontrar a quantidade ideal de cada componente que irá compor esse sistema. Dessa forma, indica-se a utilização do projeto de experimentos de misturas (MDOE, do inglês *mixture design of experiments*), uma vez que esse tipo de projeto as variáveis de entrada são componentes de uma mistura e as respostas são funções das proporções de cada componente (CORONADO, SEGEDÃES e ANDRÉS, 2015). Portanto, a próxima seção é destinada à apresentação e formulação matemática do DOE de misturas.

3.1.1 Projeto de Experimentos de Misturas (MDOE)

De acordo com Montgomery (2013), o DOE de misturas (MDOE) é um tipo de DOE, no qual os fatores são proporções de componentes em uma mistura. Ou seja, nessa técnica o objetivo é encontrar a fração de cada componente que conduz a um resultado desejado em termos de uma variável de resposta que determina a qualidade da proporção. Vale destacar que, para um problema que envolve q componentes, a soma das frações de cada componente (x_i) é igual a um (vide Equação 3.1).

$$\sum_{i=1}^q x_i = 1, \quad x_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, q) \quad (3.1)$$

Dessa forma, a região factível da mistura de dois componentes, problema de pesquisa do presente estudo, é representado por um segmento de reta, apresentando na Figura 3.1.

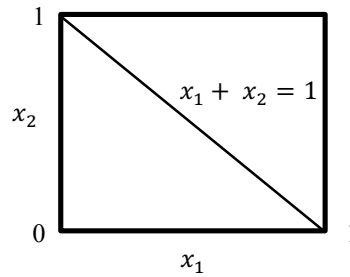


Figura 3.1 - Espaço factorial restrito para misturas com 2 componentes

Fonte: Montgomery (2013)

Os vértices desta região convexa representam a mistura pura, os pontos dentro da região são misturas em que nenhum dos componentes está ausente e o centróide (ponto no centro do *simplex*) é a mistura com proporções iguais de cada componente (OLIVEIRA *et al.*, 2009). A partir dessas características, torna então necessário que os experimentos de misturas sejam planejados e conduzidos através de arranjos específicos e, nesse contexto, os arranjos *simplex* têm sido os mais utilizados (CORNELL, 2002). Em adição, Cornell (2002) destaca que o arranjo dessas coordenadas de forma uniforme sobre o *simplex* é conhecido como *lattice*.

Quanto aos modelos matemáticos utilizados para a representação da respostas, segundo Oliveira *et al.* (2011), a partir dessa técnica, é possível estabelecer uma relação entre as variáveis de resposta e a proporção relativa de componentes em termos de uma equação matemática, geralmente um modelo polinomial, que fornece a identificação da influência da proporção de cada componente e sua combinação com outros componentes na variável de resposta. Geralmente, o polinômio pode ser linear, quadrático ou cúbico, contudo, na Equação 3.2 será apresentada a formulação para um modelo cúbico completo.

$$E(x) = \sum_{i=1}^q \beta_i^* x_i + \sum_{i<j}^q \beta_{ij}^* x_i x_j + \sum_{i<j}^q \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i<j<l}^q \beta_{ijl}^* x_i x_j x_l \quad (3.2)$$

O coeficiente β_i^* representa o quanto cada componente contribui para a variável resposta ($E(x)$). Os termos β_{ij}^* e δ_{ij} indicam o efeito da combinação dos componentes i e j . Segundo Cornell (2002), para encontrar os referidos coeficientes, utiliza-se o algoritmo de Mínimos Quadrados Ordinários (OLS, do inglês *Ordinary Least Square*).

Uma vez que neste trabalho a abordagem *simplex lattice* é adotada para determinar o número de experimentos e avaliar o efeito da fração de geração de energia por meio de sistemas fotovoltaicos (x_1) e fração de geração de energia fornecida por geradores a diesel (x_2) em duas variáveis respostas (emissão de CO_2 e LCOE), a próxima seção é destinada a apresentação dessa técnica.

3.1.2 Simplex Lattice

De acordo com Montgomery (2013), o *simplex lattice design* é usado para estudar os efeitos dos componentes da mistura na variável resposta. Um polinômio de grau m para uma mistura de q componentes, denotado por $\{q, m\}$, consiste em pontos definidos pelas seguintes proporções:

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (3.3)$$

Por exemplo, sendo o número de componentes da mistura (q) igual a 2 e o grau de polinômio (m) igual a 5. Então

$$x_i = 0, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{4}{5}, 1 \quad i = 1, 2 \quad (3.4)$$

Dessa forma, o $\{2, 5\}$ *simplex lattice* consiste de seis pontos na fronteira, conforme apresentando em 3.5.

$$(x_1, x_2) = (1, 0), (0, 1), \left(\frac{1}{5}, \frac{4}{5}\right), \left(\frac{2}{5}, \frac{3}{5}\right), \left(\frac{3}{5}, \frac{2}{5}\right), \left(\frac{4}{5}, \frac{1}{5}\right) \quad (3.5)$$

Na Equação 3.5 é possível observar que os dois primeiros componentes são misturas puras (vértice do triângulo) e os outros componentes são misturas binárias. Em geral, o número de pontos de um $\{q, m\}$ *simplex lattice* é dado por:

$$N = \frac{(q + m - 1)!}{m! (q - 1)!} \quad (3.6)$$

Uma alternativa para o *simplex lattice* é o *simplex centroid*. Nesse modelo, dado um problema com q componentes, existem $2^k - 1$ pontos, correspondentes a q permutações de $(1, 0, 0, \dots, 0)$, $\binom{q}{2}$ permutações de $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \dots, 0\right)$, $\binom{q}{3}$ permutações de $\left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0, \dots, 0\right)$ e assim por diante até atingir o centroide $\left(\frac{1}{q}, \frac{1}{q}, \dots, \frac{1}{q}\right)$.

No entanto, Montgomery (2013) observa que tanto o *simplex lattice design* quanto o *simplex centroid design* são projetos de ponto de fronteira. Dessa forma, caso o analista queira fazer previsões sobre as propriedades de misturas completas, seria altamente desejável ter mais experimentos no interior do *simplex*. Recomenda-se, portanto, acrescentar os pontos axiais e o ponto central (se o centroide não for já um ponto de projeto) ao *simplex lattice*. Para tanto, Montgomery (2013) recomenda que o ponto axial (Δ) seja entre o ponto central e o vértice, ou

seja, $\Delta = (q - 1)/2q$. Dessa forma, considerando o exemplo $\{2, 5\}$ *simplex lattice*, adicionando os pontos axiais e o centróide, resultaria na seguinte forma:

$$(x_1, x_2) = (1,0), (0,1), \left(\frac{1}{5}, \frac{4}{5}\right), \left(\frac{2}{5}, \frac{3}{5}\right), \left(\frac{3}{5}, \frac{2}{5}\right), \left(\frac{4}{5}, \frac{1}{5}\right), \left(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\right), \left(\frac{3}{4}, \frac{1}{4}\right), \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \quad (3.7)$$

sendo o sétimo e o oitavo ponto os pontos axiais e o último ponto o centroide.

Após a obtenção do polinômio que representa a superfície de resposta, a próxima fase consiste em utilizar indicadores que analisam a capacidade do modelo em representar a superfície. E nesse sentido, Oliveira (2009) destaca que, primeiramente, verifica-se o polinômio é capaz de explicar as variações nos conjuntos de respostas. Por meio do cálculo do coeficiente de determinação R^2 , apresentado pela Equação 3.8, é possível realizar essa verificação.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2} \quad (3.8)$$

Na Equação 3.8 o numerador representa a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SSR) e o denominador descreve a Soma dos Quadrados Total (SST). Sendo Y_i e \hat{y}_i o valor da variável resposta e o valor previsto para a variável resposta obtido por meio do polinômio considerando o i -ésimo experimento. \bar{y} é a média dos valores da variável resposta considerando todos os experimentos realizados. O valor de R^2 varia entre 0 e 1, sendo os valores mais próximos de 1 mais desejados.

No entanto, a adição de uma variável irá aumentar o R^2 , independente se a variável adicional ser estatisticamente significativa ou não. Dessa forma, é possível ter previsões ruins com altos valores de R^2 . Nesse sentido, Montgomery (2013) destaca a importância do R^2 ajustado (*adj.*) quando se trata de projeto mais completos com vários fatores de projeto. A Equação 3.9 apresenta a formulação matemática para o R^2 (*adj.*)

$$R^2(\text{adj.}) = 1 - \frac{SSE/df_e}{SST/df_t} \quad (3.9)$$

Sendo SST a Soma dos Quadrados Total, SSE a Soma de Quadrados dos Erros, df_e o grau de liberdade do erro e df_t o grau de liberdade total.

O coeficiente R^2 ajustado nem sempre aumentará à medida que as variáveis são adicionadas ao modelo. Na verdade, se os termos desnecessários forem adicionados, o valor de R^2 (*adj.*) geralmente diminuirá (MONTGOMERY, 2013). De acordo com Coronado, Segadães e Andrés (2014), os valores de R^2 ajustado (*adj.*) são medidas de adequação das equações

regredidas. Montgomery (2013) destaca que os valores dos coeficientes de R^2 (*adj.*) para as aproximações superiores a 70% implicam em boa qualidade dos ajustes obtidos.

3.2 Intersecção Normal à Fronteira (NBI)

3.2.1 Descrição do Método NBI

Para Ahmadi *et al.* (2015), os problemas de otimização multiobjetivo envolvem a otimização de vários objetivos para tomada de decisão que são conflitantes e muitas vezes concorrentes. Em geral, um problema de otimização pode ser descrito de acordo com a Equação 3.10.

$$\begin{aligned} \min F(x) &= (f_1(x), \dots, f_m(x))^T \\ \text{Sujeito a : } &\{x \in R \mid g(x) \leq 0, h(x) = 0\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Conforme mencionado no Capítulo 1, dentre os métodos capazes de construir fronteiras de Pareto, o método NBI é um dos mais promissores. O método NBI é um método eficaz para a computação numérica de pontos razoavelmente distribuídos na fronteira de Pareto para um problema de otimização multiobjetivo (IZADBAKSH et al., 2015). De acordo com Ahmadi *et al.* (2015) e Izadbakhsh *et al.* (2015), neste método, primeiramente gera-se a matriz *payoff*. Em geral, deve-se minimizar cada função objetivo para se desenvolver a matriz *payoff*, com m funções objetivas concorrentes. Dessa forma, a solução que minimiza a função objetivo $f_i(x)$, denotada x_i^* , indica o valor mínimo da função representado por $f_i^*(x_i^*)$. Os valores das demais funções objetivo calculadas são indicadas como $f_1(x_i^*), \dots, f_{i-1}(x_i^*), f_{i+1}(x_i^*), \dots, f_m(x_i^*)$. Assim, a i -ésima coluna da matriz *payoff* é escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} [f_1(x_i^*), \dots, f_{i-1}(x_i^*), f_{i+1}(x_i^*), \dots, f_m(x_i^*)]^T \\ \text{Sujeito a : } \{x \in R \mid g(x) \leq 0, h(x) = 0\} \end{aligned} \quad (3.11)$$

onde, x_i^* é o valor ótimo que minimiza f_i .

Dessa forma, todas as colunas da matriz *payoff* são calculadas e representadas da seguinte forma:

$$\emptyset = \begin{pmatrix} f_1^*(x_1^*) & \dots & f_1(x_i^*) & \dots & f_1(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_i(x_1^*) & \dots & f_i^*(x_i^*) & \dots & f_i(x_m^*) \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_m(x_1^*) & \dots & f_m(x_i^*) & \dots & f_m^*(x_m^*) \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

A partir dessa matriz, é possível destacar dois pontos específicos, são eles o ponto de utopia e o ponto nadir. De acordo com Naves *et al.* (2017), ponto de utopia corresponde a todos os melhores valores possíveis das funções objetivo. Em contrapartida, segundo os autores supracitados, o ponto de nadir corresponde a todos os piores valores possíveis das funções objetivo. Deste modo, pode-se representar os pontos de utopia e nadir conforme apresentado abaixo.

$$F^U = [f_1^*(x_1^*), \dots, f_i^*(x_i^*), \dots, f_m^*(x_m^*)]^T \quad (3.13)$$

$$F^N = [f_1^N, \dots, f_i^N, \dots, f_m^N]^T \quad (3.14)$$

Sendo, F^U definido com os pontos de utopia e F^N definido como os pontos de nadir;

$$f_i^N = \max f_i(x). \quad (3.15)$$

$$\text{sujeito a : } \{x \in R \mid g(x) \leq 0, h(x) = 0\}$$

Os pontos definidos pela Equação 3.14 referem-se aos pseudos pontos de nadir, uma vez que a Equação 3.15 foi utilizada para definir f^N . O pseudo ponto de nadir é definido como o vetor que contém os piores valores de cada função objetivo. No entanto, para obter um conjunto de soluções de Pareto bem representativo, em situações em que as funções objetivo têm diferentes magnitudes ou significados físicos, os objetivos devem ser primeiramente normalizados. Para cálculo do valor normalizado da função objetivo ($\bar{f}(x)$), utiliza-se os pontos de utopia e os pseudos pontos de nadir, definidos pelas Equações 3.13 e 3.14.

$$\bar{f}(x) = \frac{f_i(x) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U}, i = 1, \dots, m \quad (3.16)$$

A partir dos valores normalizados, desenvolve-se a matriz *payoff* escalonada ($\bar{\theta}$), apresentada pela Equação 3.17.

$$\bar{\theta} = \begin{pmatrix} \bar{f}_1^*(x_1^*) & \dots & \bar{f}_1(x_i^*) & \dots & \bar{f}_1(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{f}_i(x_1^*) & \dots & \bar{f}_i^*(x_i^*) & \dots & \bar{f}_i(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{f}_m(x_1^*) & \dots & \bar{f}_m(x_i^*) & \dots & \bar{f}_m^*(x_m^*) \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Dessa forma, em posse do vetor $\bar{f}(x)$ em associação com o vetor de pesos w (β), uma formulação NBI clássica de dois objetivos pode ser descrita da seguinte forma (COSTA *et al.*, 2016).

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \bar{f}_1(x) \\
 & \text{Sujeito a: } \bar{f}_1(x) - \bar{f}_2(x) + 2w - 1 = 0 \\
 & g_j(x) \geq 0 \\
 & 0 \leq w \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

onde, $\bar{f}_1(x)$ e $\bar{f}_2(x)$ são as funções objetivo normalizadas, $g_j(x)$ e $0 \leq w \leq 1$ são o conjunto de restrição para a região experimental e a região cuboidal, respectivamente. Dessa forma, o problema de otimização é resolvido para diferentes valores de peso (w) e a fronteira de Pareto é desenvolvida. Conforme apresentado por Naves *et al.* (2017), o método NBI pode ser entendido como uma linha perpendicular à linha de utopia (ou Envoltória Convexa de Mínimos Individuais - CHIM) em um ponto distante da CHIM. Para exemplificar o método descrito acima, a seguir é apresentado um exemplo de fronteira de Pareto utilizando o método NBI (PAIVA *et al.*, 2012).

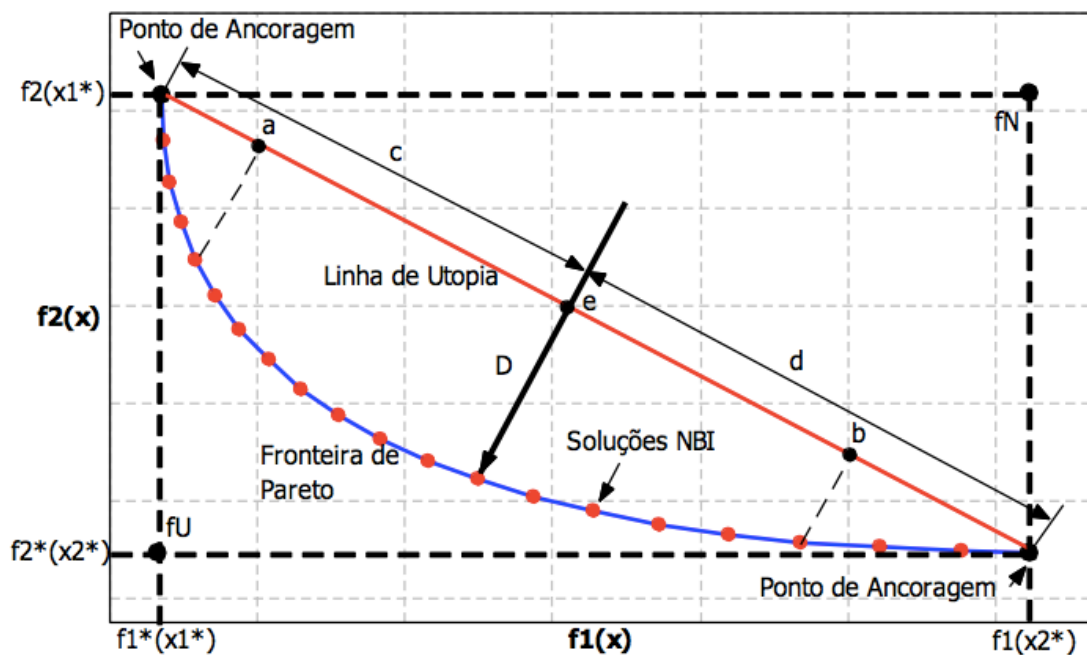


Figura 3.2 - Fronteira de Pareto (NBI)

Fonte: Paiva *et al.* (2012)

Por meio da Figura 3.2, é possível verificar a existência do ponto de ancoragem, este que representa o valor de cada função otimizada individualmente (UTYUZHNIKOV, FANTINI e GUENOV, 2009). Além disso, observa-se uma reta que liga esses pontos, chamada de linha de utopia.

Segundo Ahmadi *et al.* (2015), o próximo passo após encontrar as soluções ótimas de Pareto é encontrar a melhor solução da fronteira. Do ponto de vista do decisor, a escolha de uma solução entre as soluções ótimas da fronteira de Pareto é chamada de método *a posteriori* e a utilização de uma técnica matemática é necessária para esse propósito. Nesse sentido, uma série de ferramentas são utilizadas para esse propósito, na qual pode-se destacar a técnica TOPSIS em Ahmadi *et al.* (2015), Método *Fuzzy* em Izadbakhsh *et al.* (2015), Erro Percentual Global (EPG) e Entropia aplicado por Rocha *et al.* (2015a) e Rocha *et al.* (2015b). Nesse trabalho será proposta a utilização do método de Análise Envoltória de Dados para escolha da solução ótima e, desse modo, a Seção 3.3 é dedicada a apresentação do método.

3.2.1 Trabalhos relacionados ao NBI

Ahmadi *et al.* (2015) apresentam um modelo de programação multiobjetivo para integrar a geração de unidades térmicas as redes de alta tensão, para gerar tanto eletricidade quanto calor. As funções consideradas incluem a minimização simultânea do custo e a emissão de gases, bem como a maximização da produção de calor. Para resolver o problema proposto, os autores utilizam o método NBI para encontrar a fronteira de Pareto e a abordagem de tomada de decisão TOPSIS (*technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) para encontrar a solução ideal de Pareto como a melhor compensação entre custo, emissão de gases de efeito estufa e geração de calor.

Izadbakhsh *et al.* (2015) analisam a programação de fontes de energia em um micro-grid constituído por micro-turbinas, painéis fotovoltaicos, célula de combustível, bancos de bateria e turbinas eólicas. Os autores utilizam otimização multiobjetivo para lidar simultaneamente com a minimização do custo total de operação e a minimização da emissão, com o intuito de permitir ao operador do sistema adotar a estratégia de operação mais desejada considerando as considerações econômicas e ambientais. Nesse sentido, o método NBI é empregado para resolver o problema multiobjetivo proposto e gerar a fronteira de Pareto. Em adição, os autores utilizam um método de *fuzzy* para o processo de tomada de decisão *a posteriori*.

Por meio da técnica de Interseção Normal à Fronteira modificada (MNBI, do inglês *Modified Normal Boundary Intersection*), Gitizadeh, Kaji e Aghaei (2013) resolvem um problema de Planejamento de Expansão de Geração considerando três objetivos (maximização do retorno econômico, minimização da emissão de CO₂ e minimização do risco relacionado ao custo do combustível do devido à utilização de fontes de energia não renováveis). Em seguida,

com o intuito de avaliar a eficiência do esquema proposto, os autores aplicam o modelo em uma empresa de geração hipotética para um horizonte de planejamento de 14 anos. Dois cenários de análise são desenvolvidos, sendo que o primeiro desconsidera o uso de fontes de renováveis e o segundo inclui o uso de tais fontes. Gitizadeh, Kaji e Aghaei (2013) concluem que embora o número de unidades selecionadas seja diferente nos dois cenários, o comportamento dos objetivos é quase o mesmo. Além disso, os autores ressaltam que pode-se observar no segundo cenário que a seleção de FER leva a valores mais elevados do retorno econômico e valores mais baixos de risco e emissão de CO₂.

3.3 Análise Envoltória de Dados

3.3.1 Considerações iniciais DEA

O modelo de Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA) corresponde a uma técnica não paramétrica que permite avaliar a eficiência relativa entre unidades de decisões (*decision making units* – DMU's) que executam operações iguais e, portanto, utilizam múltiplos insumos (*inputs*) semelhantes para gerar múltiplos produtos (*outputs*) também semelhantes (BANKER *et al.*, 2011).

Tomando por base os conceitos de produtividade e eficiência presentes em Farrell (1957), o modelo inicial DEA foi originalmente desenvolvido por Charnes, Cooper e Rhodes. (1978), assim como:

$$\begin{aligned} \text{Máx } \theta_k &= \sum_{r=1}^s u_r Y_{rk} \\ \text{Sujeito a:} \\ \sum_{i=1}^m v_i X_{ik} &= 1 \\ \left(\sum_{r=1}^s u_r Y_{rj} \right) - \left(\sum_{i=1}^m v_i X_{ij} \right) &\leq 0, j = 1, \dots, n \\ u_r, v_i &\geq 0, r = 1, \dots, s; i = 1, \dots, m \end{aligned} \tag{3.19}$$

Neste caso, existem n DMU's, $j = 1, 2, \dots, n$, que utilizam m insumos, $i = 1, 2, \dots, m$, para produzir s produtos, $r = 1, 2, \dots, s$. Os multiplicadores de ponderação da quantidade X_i do insumo i e da quantidade Y_j do produto j são representados por v_i e u_j , respectivamente. E θ_k corresponde a eficiência da DMU k , em análise.

O modelo expresso em (3.19) é denominado de modelo DEA CCR de multiplicadores orientado a insumo (CCR em alusão aos autores Charnes, Cooper e Rhodes). É dito modelo de multiplicadores visto que ele é pautado em uma soma ponderada e, portanto, cada ponderação corresponde a um multiplicador, e é orientado a insumo devido ao fato de ser sistematizado em projeções horizontais. Além disso, este modelo é caracterizado por assumir retornos constantes de escala, ou seja, quaisquer variações nas quantidades utilizadas dos insumos determinarão variações lineares idênticas nas quantidades geradas de produto (COELLI *et al.*, 1996)

De maneira complementar, os autores Banker, Charnes e Cooper (1984) elaboraram o modelo DEA BCC de multiplicadores orientado a insumo (BCC em alusão aos autores Banker, Charnes e Cooper), em que a hipótese de que todas as DMU's da amostra operam em condições de retornos constantes de escala é relaxada (COELLI *et al.*, 1996)

Sobre este aspecto, destaca-se que o modelo DEA BCC de multiplicadores orientado a insumo supõe que as DMU's que utilizam baixas quantidades de insumos operam em retornos crescentes de escala e, por sua vez, as DMU's que utilizam altas quantidades de insumos operam em retornos decrescentes de escala. Devido a esta hipótese inicial, diz-se que o modelo DEA BCC de multiplicadores orientado a insumo um processo operando em retornos variáveis de escala (COELLI *et al.*, 1996)

Ao se levar em consideração (3.19), para se obter o modelo DEA BCC de multiplicadores orientado a insumo deve-se adicionar uma variável na função objetivo que representa o fator de escala da DMU em análise. Quando esta variável assume valor positivo, define-se que a DMU opera em retornos crescentes de escala, quando esta variável assume valor negativo, define-se que a DMU opera em retornos decrescentes de escala e, por fim, quando esta variável assume valor zero, define-se que a DMU opera em retornos constantes de escala. Desta forma, tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Máx } \theta_k &= \sum_{r=1}^s u_r Y_{rk} + u^* \text{ S. a. : } \sum_{i=1}^m v_i X_{ik} = 1 \\ \left(\sum_{r=1}^s u_r Y_{rj} + u^* \right) - \left(\sum_{i=1}^m v_i X_{ij} \right) &\leq 0, j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3.20)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m v_i X_{ik} &= 1 \\ u_r, v_i &\geq 0, \quad r = 1, \dots, s; \quad i = 1, \dots, m \end{aligned}$$

Do mesmo modo, existem n DMU's, $z = 1, 2, \dots, n$, que utilizam r insumos, $i = 1, 2, \dots, r$, para produzir s produtos, $j = 1, 2, \dots, s$. Os multiplicadores de ponderação da quantidade X de insumos e Y de produtos são representados por v_i e u_j , respectivamente. A eficiência da DMU k , em análise é denotada por θ_k e, por fim, u^* corresponde a variável adicionada para representar o fator de escala da DMU em análise.

No entanto, os modelos apresentados possuem uma limitação quando o objetivo da análise de eficiência é ranquear as DMU's da amostra, justamente, por critério de eficiência. Isto ocorre pois os níveis de eficiência são mensurados com base nas maiores nas DMU's mais produtivas e, desta forma, estas DMU's apresentam o mesmo nível de eficiência. Uma vez que o objetivo dessa pesquisa é realizar um ranqueamento entre os pontos ótimos da fronteira de pareto a partir de um critério de eficiência, faz-se necessário a discussão de extensões dos modelos DEA tradicionais. Particularmente, o modelo DEA no contexto da Superficiência. Assim, a seção a seguir é destinada a apresentação do referido modelo.

3.3.2 *Modelo DEA de supereficiência*

Para contornar esta limitação Andersen e Petersen (1993) desenvolveram uma versão modificada do DEA com base na comparação de DMU's eficientes. Basicamente, o procedimento fornece uma estrutura para classificar unidades eficientes e facilita a comparação com rankings. Para formulação do modelo DEA de supereficiência, os autores supracitados propuseram relaxar a hipótese de nível máximo de eficiência ao retirar a DMU em análise da construção da fronteira de eficiência na programação matemática, desta forma, o nível de eficiência pode assumir qualquer valor real não-negativo. Vale destacar que este procedimento pode ser aplicado a ambos os modelos DEA tradicionais.

A seguir, é apresentada a formulação do modelo de supereficiência desenvolvida no modelo DEA CCR orientado a insumo.

$$\text{Max } \theta_k = \sum_{j=1}^s u_j Y_{jk}$$

Sujeito a:

(3.21)

$$\sum_{i=1}^r v_i X_{ik} = 1$$

$$\left(\sum_{\substack{j=1 \\ z \neq k}}^s u_j Y_{jz} \right) - \left(\sum_{\substack{i=1 \\ z \neq k}}^r v_i X_{iz} \right) \leq 0, \forall z$$

$$u_j, v_i \geq 0, \forall i, j$$

Sendo θ_k a eficiência da DMU k , em análise. O caso exemplificado considera a existência de n DMU's, $z = 1, 2, \dots, n$, que utilizam r insumos, $i = 1, 2, \dots, r$, para produzir s produtos, $j = 1, 2, \dots, s$. Os multiplicadores de ponderação da quantidade X de insumos e Y de produtos, isto é, as variáveis de decisão do problema são representados por v_i e u_j , respectivamente.

Por fim, argumenta-se que o referido procedimento é mais apropriado ao modelo DEA CCR uma vez que a transformação no conjunto de restrições pode alterar as condições de retorno a escala, gerando imprecisão de estimação quando aplicados aos modelos DEA BCC (COELLI *et al.*, 1996)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise dos trabalhos relacionados, principalmente, a projetos híbridos no Capítulo 2 revela que contribuições significativas podem ser feitas em relação a esse tema. Em relação as análises de variáveis, tais como investimento, custo de operação, LCOE, emissão de CO₂, entre outras, pode-se notar que diversos autores buscam compreender seus comportamentos e, por meio de métodos de otimização, almejam determinar a melhor configuração de um sistema híbrido.

De acordo com Collette e Siarry (2004), os métodos multiobjetivos foram aplicados com sucesso em diversos campos da engenharia e existem várias técnicas matemáticas para este fim. Na área do presente estudo não é diferente, conforme exposto por Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006), nas últimas décadas, diversas técnicas heurísticas capazes de solucionar esses tipos de problemas foram aplicadas. Contudo, poucos estudos abordaram o método NBI em assuntos relacionados a sistemas híbridos. Poucos trabalhos, também, são notados quando se trata da utilização de métodos *a posteriori* para escolha da melhor solução das soluções ótimas (fronteira de Pareto) resultante da aplicação do método de otimização ao escopo do trabalho.

Além disso, a escassez de pesquisas relacionando o método NBI e o DEA supereficiência se mostrou como um fator motivante para desenvolvimento do método proposto. Outro fator que estimulou o desenvolvimento da pesquisa refere-se às dificuldades encontradas para instalação de sistemas de geração de energia em regiões isoladas, principalmente no Brasil, seja pelos altos custos envolvidos ou pela dificuldade de acesso a essas regiões.

Dada essas constatações, este Capítulo é dedicado a descrição do método proposto, que conforme apresentado na Figura 4.1 é uma fusão das técnicas de Projetos de Experimentos de Misturas, Intersecção Normal à Fronteira e modelo DEA de Supereficiência. Pretende-se com esta abordagem alcançar resultados de configuração ótima para projetos híbridos isolados. Dessa forma, a metodologia proposta tem por objetivo fornecer uma plataforma para definir a configuração ótima de um sistema híbrido, buscando auxiliar no processo de tomada de decisão de um investidor considerando investir em geração de energia em locais isolados.

4.1 Método proposto

A partir da revisão da literatura apresentada nos Capítulos 2 e 3 e das considerações feitas no Capítulo 4, todos os fundamentos teóricos necessários ao desenvolvimento do método proposto já foram devidamente apresentados. Nesse sentido, a presente pesquisa propõe um método estruturado em que experimentos são realizados em ambiente simulados e os dados coletados são utilizados para estimação das funções objetivo a serem otimizadas, de modo a selecionar a configuração ótima para o sistema híbrido isolado em análise. A Figura 4.1 é destinada a apresentação desse método. Logo em seguida é desenvolvido um detalhamento sobre cada fase e características do método.

Conforme exposto na Figura 4.1, a metodologia proposta é composta por três fases, no qual a primeira fase consiste no desenvolvimento do modelo conceitual a ser otimizado. As Fases II e III são destinadas ao desenvolvimento de um método estruturado para otimização do modelo conceitual. Dessa forma, é apresentada uma estruturação pautada em uma análise estocástica, uma vez que, dada as incertezas nos dados de entrada do projeto, propõe-se a Simulação de Monte Carlo para simulação dos resultados das funções objetivo.

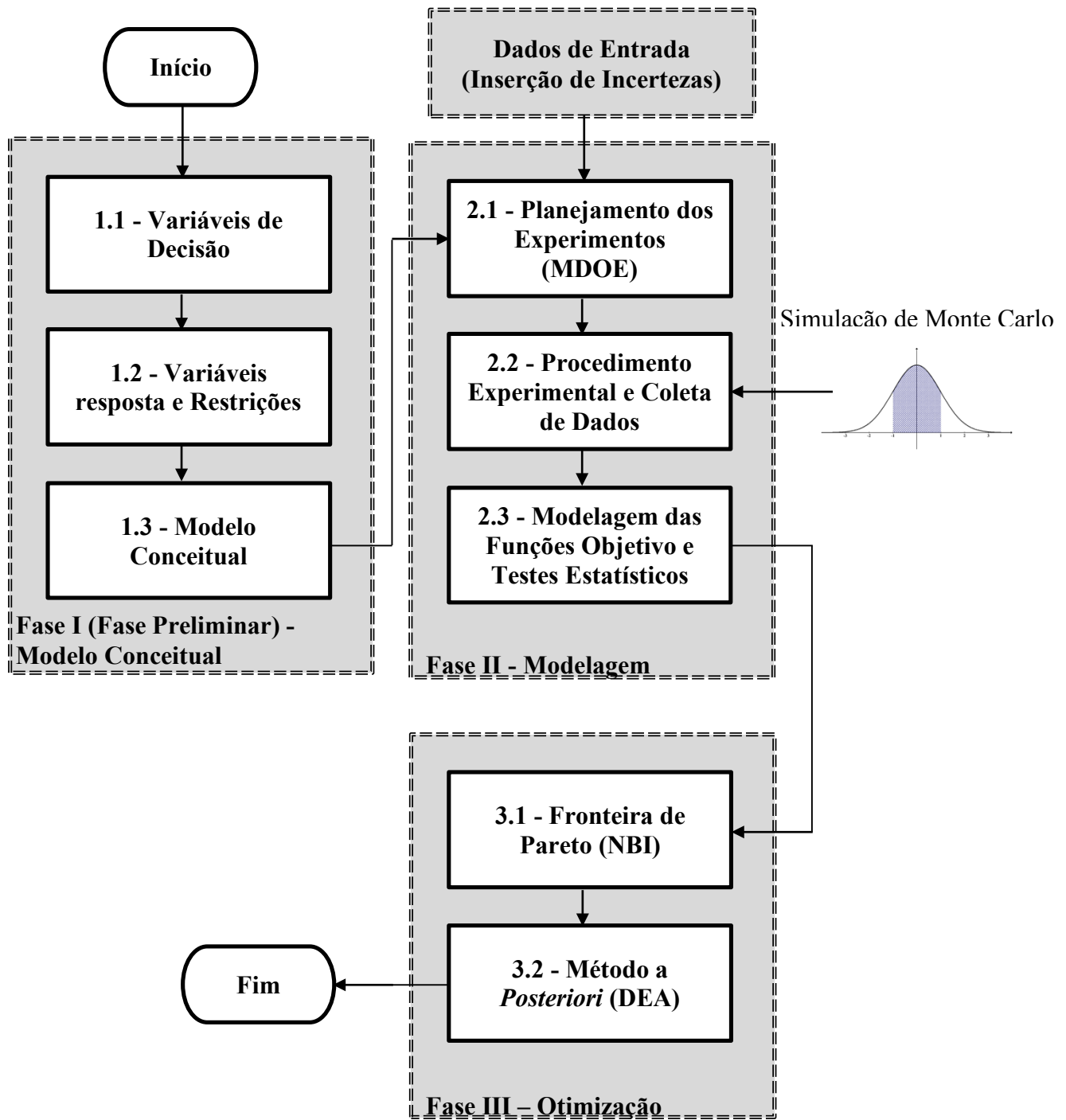


Figura 4.1 - Estrutura Proposta

4.1.1 Fase I (Fase Preliminar) – Modelo Conceitual

A primeira etapa para elaboração do modelo conceitual consiste em selecionar as variáveis de decisão, isto é, quanto instalar de cada tecnologia de um sistema híbrido que será utilizado para geração de energia em um sistema isolado. Desse modo, o decisor poderá optar por analisar um sistema híbrido eólico-fotovoltaico, diesel-eólico, diesel-fotovoltaico, diesel-eólico-fotovoltaico etc. Apesar de ser possível a utilização de mais de duas fontes de energia,

para facilitar a exemplificação do desenvolvimento do modelo conceitual, um modelo composto por duas variáveis será utilizado como base.

O dimensionamento ótimo de um sistema isolado está condicionado diretamente as variáveis resposta que se deseja otimizar. Nessa fase o decisor deve selecionar previamente qual ou quais características necessitam ser otimizadas. Cumpre destacar a importância desse procedimento, visto que a configuração ótima do sistema híbrido vai depender da escolha adequada das variáveis resposta e, portanto, uma escolha feita de maneira equivocada pode acarretar em consequências indesejáveis para o decisor. Neste trabalho são selecionadas como variáveis resposta o custo nivelado de energia e a emissão de CO₂.

A escolha dessas respostas se fez, a partir da importância dessas duas variáveis no projeto em questão, uma vez que, há uma preocupação evidente com o custo nivelado de energia do projeto, variável determinante na viabilidade do projeto. No que diz respeito a emissão de gases, discussões sobre os níveis de poluentes e suas consequências para o meio ambiente estão cada vez mais em evidência, mostrando, portanto, a importância de se buscar minimizá-la. Em relação a emissão de gases de efeito estufa, não foram consideradas as emissões provenientes da manufatura e transporte dos elementos dos sistemas. Assim como desenvolvido por Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006), considera-se apenas as emissões de gases originados pela queima dos combustíveis fósseis.

Corroborando para essas constatações, diversos estudos, com diferentes propósitos, analisam essas variáveis. Na Tabela 4.1 são apresentados os trabalhos que relacionam pesquisas com o tema custo, emissão e custo e emissão simultaneamente.

Tabela 4.1 – Trabalhos relacionados com as variáveis respostas

Trabalhos Relacionados		
Emissão	Custo	Emissão e Custo
Gómes, Dopazo e Fueyo (2016)	Park <i>et al.</i> (2000)	Seddighi e Ahmad-javid (2015)
Santos e Legey (2013)	Belfkira, Barakat e Nichita (2008)	Meza, Yildirim e Masud (2007)
Gitizadeh, Kaji e Aghaei (2013)	Silva, Severino e Oliveira (2013)	Tekiner, Coit e Felder (2010)
Anda, Golub e Strukova (2009)		<i>Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso</i> (2006)
Lin, Ko e Yeh		Dufo-López <i>et al.</i> (2011)
		Ahmadi <i>et al.</i> (2015)
		Izadbakhsh <i>et al.</i> (2015)

Em seguida, verifica-se a existência de restrições do problema ou de características que devem ser respeitadas. No presente projeto é possível identificar as seguintes restrições, estas

que serão consideradas na formulação do problema de otimização multiobjetivo:

$$\begin{aligned} 0 \leq (x_i) \leq 1 \\ \sum_{i=1}^n x_i = 1 \end{aligned} \tag{4.1}$$

x_i representa o percentual da fonte de energia i na capacidade de geração total.

Definidas as variáveis de decisão, os objetivos e as restrições, a próxima etapa corresponde a elaboração do modelo conceitual. Dessa forma, a Figura 4.2 apresenta uma esquematização em que a configuração de um sistema híbrido estruturado como um problema de otimização multiobjetivo.

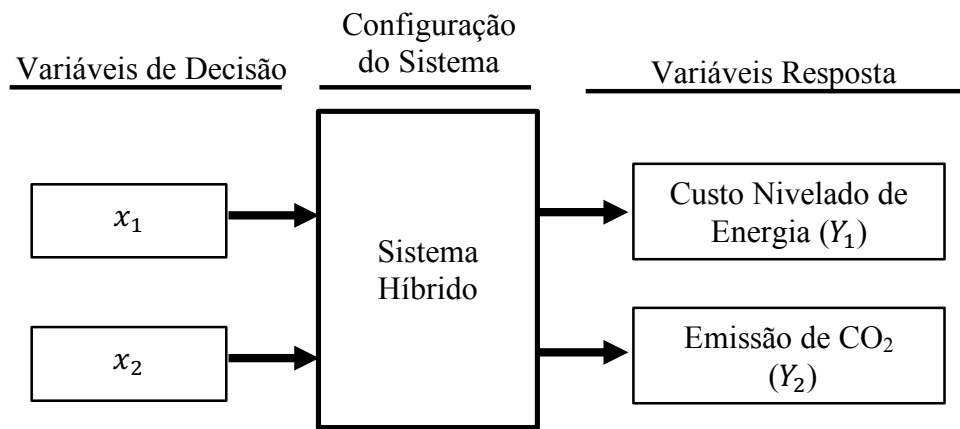


Figura 4.2 – Modelo Conceitual Sistema Híbrido

Conforme pode ser visto na Figura 4.2, a configuração ótima de um sistema híbrido isolado é representado por um processo composto por duas variáveis de decisão, estas que geram duas variáveis resposta, o custo nivelado de energia e a emissão de CO₂, denotados por Y_1 e Y_2 , respectivamente. Dessa maneira, deseja-se otimizar a configuração de um sistema híbrido, ajustando adequadamente as variáveis de decisão, de forma que este ajuste possibilite os melhores resultados de acordo com os objetivos selecionados.

4.1.2 Fase II – Modelagem (Experimentos de Misturas)

A segunda fase do método consiste na modelagem matemática das funções objetivo definidas. Dentro do contexto deste trabalho, no qual deseja-se encontrar a configuração ótima do sistema híbrido, isto é, qual a parcela de cada fonte que deve ser instalada, indica-se a utilização do MDOE, uma vez que para esse tipo de projeto as variáveis de entrada são componentes de uma mistura e as respostas são funções das proporções de cada componente.

Assim, nessa etapa, o objetivo é estimar a função aproximada que relaciona a resposta de interesse com as variáveis do processo. Para tanto, uma estruturação composta por 3 etapas

é destacada, como pode ser vista na Fase II da Figura 4.1.

1. Planejamento dos experimentos

Os experimentos foram planejados seguindo um $\{2, 5\}$ *simplex lattice* com dois pontos axiais e um ponto central, definido na Equação 3.7, o que resultou em nove experimentos utilizando as variáveis x_1 e x_2 . As respostas analisadas incluem o LCOE e a emissão de CO₂.

2. Procedimento experimental e coleta de dados

Encerrada a etapa de planejamento experimental, a segunda etapa consiste na implantação dos experimentos, realizada através do dimensionamento do sistema híbrido para cada ponto definida pela Equação 3.7. Para execução dos experimentos é necessário dimensionar o sistema híbrido para cada ponto selecionado na aplicação dos experimentos de misturas. Dessa forma, o LCOE e a emissão de CO₂ são estimados para os pontos $(x_1, x_2) = (1,0), (0,1), (\frac{1}{5}, \frac{4}{5}), (\frac{2}{5}, \frac{3}{5}), (\frac{3}{5}, \frac{2}{5}), (\frac{1}{5}, \frac{4}{5}), (\frac{1}{4}, \frac{3}{4}), (\frac{3}{4}, \frac{1}{4}), (\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ definida no planejamento experimental.

Visto que nesse tipo de projeto, uma série de incertezas podem ser elencadas, é indicada a utilização da SMC combinada com o processo de otimização para se definir diferentes valores para as variáveis resposta sendo, assim, possível incorporar as incertezas na análise.

Nesse contexto, para execução da SMC, primeiramente, as incertezas inerentes às variáveis determinantes para cálculo das variáveis resposta (emissão de CO₂ e LCOE) são inseridas por meio de distribuições de probabilidades atribuídas às variáveis. O próximo passo consiste em simular cenários e coletar os valores médio das variáveis resposta. Dessa maneira, as médias das variáveis resposta, simuladas por meio da SMC, são utilizadas para compor a matriz experimental, fonte de dados para a modelagem e otimização do processo.

3. Modelagem das funções objetivo e teste estatístico

A modelagem das funções objetivo das respostas LCOE e emissão foram determinadas a partir do modelo definido na Equação 3.2. Assim, representando essa equação para duas variáveis de decisão, formula-se o seguinte polinômio:

$$Y = \beta_1^* x_1 + \beta_2^* x_2 + \beta_{12}^* x_1 x_2 + \delta_{12}^* x_1 x_2 (x_1 - x_2) \quad (4.2)$$

Para estimação dos coeficientes β_1^* , β_2^* , β_{12}^* e δ_{12}^* foi utilizado o *software* estatístico Minitab® (versão 17) que, para esta finalidade, aplica o método dos Mínimos Quadrados Ordinários. Após estes cálculos, obtém-se os coeficientes que representam os modelos cúbicos

completos desenvolvidos para as respostas. Por fim, analisa-se o grau de explicação do modelo por meio da técnica estatística R^2 (*adj.*), apresentado na Seção 3.1.2. Vale destacar que o modelo cúbico foi escolhido, uma vez que este apresentou melhores valores de R^2 (*adj.*).

4.1.3 *Fase III – Otimização Multiobjetivo*

Obtidas as funções aproximadas resultantes das experimentações executadas, o problema de otimização pode ser formulado. Com base na fundamentação teórica descrita na Seção 3.3 e nas considerações e características do modelo relatadas nas Seções anteriores do Capítulo 4, é possível desenvolver uma formulação multiobjetivo para o problema em questão, subdividido nas seguintes etapas:

- construção da fronteira de Pareto;
- determinação da melhor solução da fronteira (otimização *a posteriori*).

Tendo em vista as funções objetivo que se deseja otimizar, a primeira etapa da Fase III consiste no desenvolvimento da fronteira de Pareto para determinação das configurações ótimas. Para tanto, foram utilizadas as formulações descritas na Seção 3.3. Para a construção da fronteira de Pareto optou-se por alterações na ordem de 0,1 no peso (w) das funções objetivo.

Após a elaboração da fronteira de Pareto, o decisor terá a sua disposição as configurações ótimas do sistema híbrido. Contudo, qual a configuração deverá ser escolhida? Ou seja, qual é a solução mais eficiente da fronteira? Para encontrar essa resposta, é indicada a utilização de um método *a posteriori*. Nesse trabalho é proposta a utilização do método DEA para escolha da solução ótima, ou seja, da solução mais eficiente da fronteira de Pareto. Uma vez que se deseja ranquear as configurações ótimas, optou-se por utilizar o modelo DEA de supereficiência desenvolvido a partir do modelo DEA CCR orientado a insumo, conforme a discussão realizada no Seção 3.4.1.

Para formulação do problema a ser resolvido pelo modelo DEA, primeiramente, vale salientar que as DMU's selecionadas são as soluções da fronteira de Pareto geradas a partir da utilização do método NBI. Além disso, deve-se determinar os insumos e produtos do processo sob análise, conforme apresentado na Seção 3.3.1. Nesse sentido, uma série de variáveis podem ser selecionados, como por exemplo o TOTEX, CAPEX, OPEX, LCOE, emissão, área para instalação, entropia, entre outros.

No presente trabalho, além das variáveis utilizadas no método NBI selecionadas (LCOE e emissão), uma vez que se busca a diversidade do sistema híbrido, com o intuito de

evitar configurações extremas (sistema composto por apenas uma fonte de energia) para instalação dos sistemas isolados, utiliza-se como produto da análise DEA, a entropia. Dessa forma, as variáveis selecionadas para análise de eficiência são o LCOE, configurada como insumo e a emissão evitada e entropia, configuradas como produtos do processo.

Para cálculo da entropia definida pela Equação 2.16, h é o número de variáveis de decisão. Isto é, no caso apresentado $h = 2$ e, conforme apresentado na Seção 4.1.1, x_i representa o percentual de cada sistema na capacidade de geração total. Finalmente, o modelo proposto para otimização, desenvolvido conforme as etapas acima, é esquematizado conforme a Figura 4.3. Dessa forma, no próximo Capítulo, um objeto de estudo é selecionado e esse modelo proposto é aplicado.

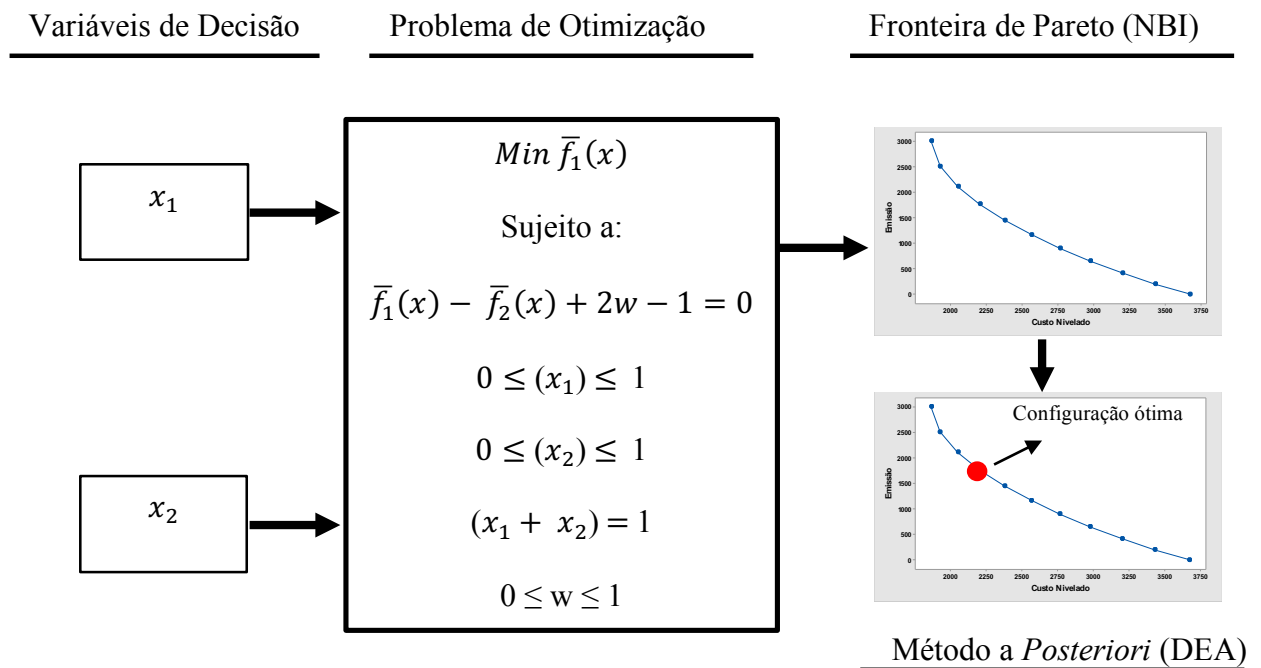


Figura 4.3 - Modelo para Otimização

4.2 Considerações Adicionais

Conforme descrito anteriormente, o método desenvolvido apresenta uma proposta para configuração ótima de um sistema híbrido isolado, por meio da utilização do método NBI e seleção da configuração ótima da fronteira de Pareto a partir do modelo DEA de supereficiência. Uma vez que há na literatura diversos trabalhos que analisam sistemas híbridos, nessa Seção serão comparados os métodos utilizados nestes estudos com a metodologia proposta no presente trabalho.

Em relação ao modelo apresentado por Silva, Severino e Oliveira (2013), que avalia um problema de otimização para definição de um sistema híbrido em comunidades isoladas da Amazônia, o presente trabalho, diferentemente do estudo exposto pelos autores, apresenta como diferencial considerar dois objetivos conflitante entre si. Isto é, as alterações nas variáveis de decisão alteram de forma conflitante as respostas do processo. No trabalho apresentado por Silva, Severino e Oliveira (2013), as funções objetivo selecionadas sempre determinam a mesma configuração como a solução ótima do problema. Além disso, a metodologia desenvolvida no presente trabalho apresenta uma estruturação sistemática completamente distinta de Silva, Severino e Oliveira (2013) que analisa todo o processo com o *software* proprietário Homer®.

Referente ao trabalho apresentado por Belfkira *et al.* (2011), os autores sugerem a configuração de um sistema isolado por meio de um modelo de otimização, buscando minimizar o custo total, o presente trabalho, conforme já detalhado, buscar solucionar um problema multiobjetivo. Dessa forma, além dos custos, implicações importantes acerca das emissões de gases poluentes são consideradas.

Ao contrário do trabalho publicado por Dufo-López *et al.* (2011), que consideram as emissões originadas dos processos de manufatura, transporte e reciclagem, o presente trabalho apresenta a variável emissão de CO₂ como sendo oriunda, exclusivamente, da queima do combustível, da mesma forma como foi proposta por Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006). Além disso, ambos os estudos fazem uso de uma abordagem evolutiva multiobjetivo (SPEA) para a solução do problema, diferentemente do presente estudo que considera a utilização do método NBI para otimização multiobjetivo do problema.

Partindo de um sistema híbrido fotovoltaico-diesel-bateria, Rezzouk e Mellit (2015) medem o desempenho de configurações previamente selecionadas de acordo com as variáveis, valor presente dos custos, LCOE, excesso de energia, satisfação da demanda, economia de consumo de combustível, custos de manutenção e operação de geradores a diesel e taxas de CO₂ e poluentes evitados de forma separada. Dessa forma, ao contrário do método para determinação da configuração ótima, a partir da formulação multiobjetivo proposto no presente estudo, os autores encontram soluções distintas dependendo das variáveis que se deseja otimizar, não considerando os objetivos sendo otimizados simultaneamente.

Este trabalho, assim como em Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006) busca a otimização multiobjetivo de um sistema híbrido, considerando uma variável referente ao custo dos projetos e outra relacionada a emissão de CO₂. Apesar dos referidos autores

considerarem a minimização do custo total, diferentemente do caso apresentado no presente trabalho que considerada o custo nivelado de energia, em ambos os casos é possível verificar o conflito entre as funções objetivo, uma vez que o aumento da emissão implica na redução dos custos. Como resultado, os autores obtém fronteiras de Pareto contendo cinco soluções, na qual encontra-se duas soluções extremo que contém as configuração que resultam no menor custo total e na menor emissão. Por fim, é possível verificar que os autores não consideram uma métrica a *posteriori* para seleção da configuração ótima, deixando a cargo do decisor selecionar uma das cinco soluções ótimas.

Na Figura 4.4 é possível observar as principais vantagens e desvantagens dos trabalhos aqui descritos em relação ao método desenvolvido no presente trabalho.

Trabalho	Vantagens	Desvantagens
Silva, Severino e Oliveira (2013)	Comparação da utilização de células de combustível;	Análise apenas das variáveis de custo (Investimentos, VPC, LCOE);
	Análise da capacidade do sistema em fornecer a energia demandada.	Não compara com sistemas utilizando fontes de energia não renovável; Análise monobjetivo (não analisam variáveis objetivo conflitantes entre si).
Rezzouk e Mellit (2015)	Análise do sistema com base nas variáveis VPC, LCOE, excesso de energia, satisfação da demanda, economia de consumo de combustível, custos de manutenção e operação de geradores a diesel e taxas de CO ₂ e poluentes evitados.	Análise monobjetivo (analisam o desempenho do sistema para cada variável separadamente);
		Análise feita apenas para uma região (Norte da Argélia).
Belfkira, Zhang e Barakat (2011)	Análise do sistema com e sem bateria.	Objetivo único (minimização do custo total);
		Apesar de considerarem a utilização de geradores a diesel, nenhuma implicação é feita em relação a emissão de gases desse tipo de fonte.
Dufo-López <i>et al.</i> (2011)	Consideram as emissões originadas dos processos de manufatura, transporte e reciclagem.	Não utilizam um método a <i>posteriori</i> para selecionar o melhor ponto da fronteira de Pareto.
Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006)	Análise dos resultados da aplicação do método para diferentes perfis de carga para uma mesma região.	Não utilizam um método a <i>posteriori</i> para selecionar o melhor ponto da fronteira de Pareto.

Figura 4.4 - Comparação dos Métodos

5 APLICAÇÃO E RESULTADOS DO MÉTODO

Seguindo o desenvolvimento do método proposta que tem o intuito de obter a configuração ótima do sistema híbrido (Capítulo 4), este Capítulo apresenta uma aplicação prática do método em um sistema isolado do estado do Amazonas, composto por 20 regiões. Sendo assim, primeiramente o objeto de estudo escolhido como aplicação prática é descrito. Em seguida, o método proposto é aplicado levando em consideração as fases descritas na Figura 4.1, visando destacar a utilização do método *a posteriori* para determinação da solução ótima da fronteira de Pareto.

5.1 Objeto de Estudo

Para aplicação do método proposto, foram utilizados dados de um projeto de referência, apresentado pela Eletrobras Distribuição Amazonas (2016), denominado “Grupo B”, para atendimento de 54 sistemas isolados do estado do Amazonas. Os mercados foram divididos em 5 lotes e 2 sublotes, de acordo com a localização, as suas previsões de interligação ao SIN e particularidades de cada mercado. O projeto de referência apresentado pela Eletrobras Distribuição Amazonas, e habilitado tecnicamente pela EPE, contempla o atendimento por geradores a diesel nos 54 sistemas isolados.

Para aquisição de energia elétrica nos sistemas isolados, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tornou público o Leilão N°002/2016 (ANEEL, 2016c). Segundo o projeto de referência, o Produtor Independente de Energia contratado será responsável pela implantação, operação e manutenção das usinas de todas as regiões contempladas pelo lote adquirido. No referido leilão é declarada vencedora a proponente que ofertar o menor lance para o preço de referência em (R\$/MWh) de cada lote. O preço de referência, por lote, deve contemplar o atendimento a todas as localidades. É evidente que, caso fosse objetivo deste estudo sugerir ao proponente a configuração ótima, baseando apenas na premissa de menor preço de referência, seria mais adequado considerar a redução do LCOE como o único objetivo do problema. Entretanto, vale destacar que o objeto de estudo foi escolhido pautado apenas na demonstração de aplicabilidade do método proposto para projetos isolados, não sendo escopo deste trabalho discutir o processo de seleção dos projetos no referido leilão.

Para o presente trabalho, considerou-se um lote composto por 20 regiões, denominado Lote B/II. Optou-se por esse lote por ele ser o único com mais de um sistema e com prazos contratuais de 15 anos para todos os projetos e por não haver previsão de interligação ao SIN,

sendo o início da geração programado para 2018. A localização dessas regiões, representada pela latitude e longitude de cada local, assim como o mercado de energia estimado para 2022, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Localização e mercado de energia (lote B/II)

Região	Latitude	Longitude	Mercado de Energia em 2022 (kWh/dia)
Pauini	07° 42' 52" S	67° 00' 09" W	33.830
Tuiué	03° 41' 35" S	61° 03' 52" W	6.014
Tapauá	05° 37' 17" S	63° 11' 16" W	51.016
Vila de Belo Monte	06° 15' 01,3" S	64° 14' 46,8" W	1.937
Vila de Urucurituba	03° 32' 50" S	58° 55' 47" W	3.014
Sacambu	03° 16' 37" S	60° 55' 59" W	3.581
Parauá	03° 11' 2,7" S	59° 28' 59,8" W	3.222
Novo Céu	03° 23' 11" S	59° 16' 26" W	32.636
Manaquiri	03° 25' 55" S	60° 27' 32" W	77.578
Labrea	07° 15' 57" S	64° 47' 37" W	146.178
Itupurú	04° 17' 18,9" S	61° 48' 02,5" W	1.570
Caviana	03° 45' 38" S	61° 09' 21" W	7.696
Castanho I	03° 22' 0,9" S	59° 52' 43,5" W	116.693
Castanho ii	03° 49' 22,3" S	60° 21' 30,1" W	116.693
Careiro da Várzea	03° 11' 52" S	59° 46' 27" W	35.959
Campinas	03° 18' 37" S	61° 06' 50" W	5.167
Canutama	06° 32' 04" S	64° 23' 01" W	27.575
Beruri	03° 53' 52" S	61° 22' 29" W	62.093
Araras	03° 24' 58" S	61° 21' 53" W	2.419
Boca do Acre	08° 46' 05" S	67° 19' 08" W	139.071

Vale destacar que, o vencedor do leilão deve garantir o suprimento da demanda estimada para o ano de 2022, a energia adicional demandada a partir dessa data será objeto de novo leilão. Como a presente aplicação prática realiza a análise dos 20 mercados contemplados pelo lote B/II, as três fases do método proposto foram realizadas para cada cidade selecionando, desta forma, a configuração ótima do sistema diesel-fotovoltaico em cada região do lote.

5.2 Modelo Conceitual

Para elaboração do modelo conceitual a ser otimizado é levada em consideração a nota técnica fornecida pela Empresa de Pesquisa Energética (2016), incentivando possíveis alternativas de suprimento por meio de sistemas híbridos PV-diesel. Dessa forma, as fontes de geração de energia que serão consideradas para aplicação do método proposto são o sistema fotovoltaico e o sistema de geração por meio de geradores a diesel. Dessa forma, o modelo conceitual apresentado na Figura 4.2 pode ser esquematizado conforme a Figura 5.1.

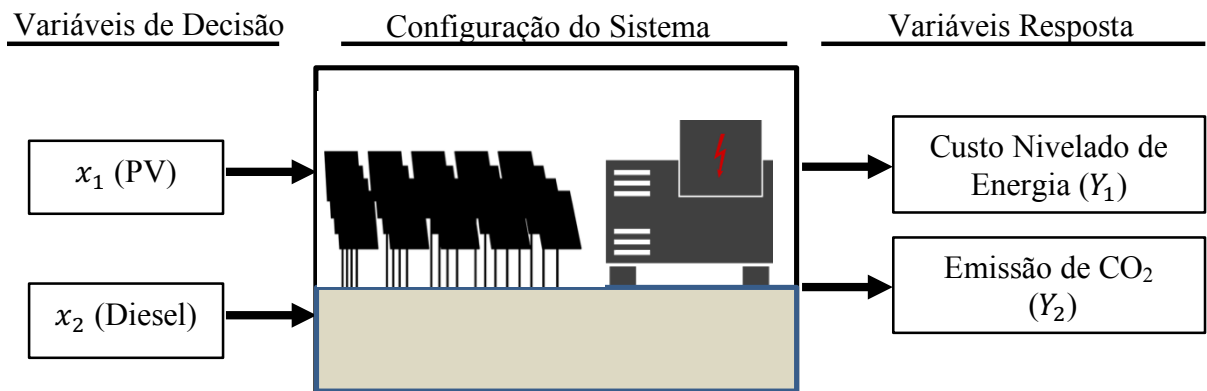


Figura 5.1 - Modelo conceitual PV-Diesel

A geração de energia a partir de geradores a diesel é considerada uma opção mais acessível, quando analisado o montante necessário para instalação no sistema. No entanto, em relação aos custos de operação e manutenção, esses sistemas são substancialmente mais onerosos do que os sistemas fotovoltaicos (BAJPAI e DASH, 2012). Em adição, outro fator crítico em relação aos geradores a diesel se deve ao alto custo do combustível. À vista disso, uma saída usual é a utilização de um indicador que considere tanto os investimentos quanto os custos operacionais e de combustível. Nesse contexto, Malheiro *et al.* (2015) destacam que o LCOE é o critério utilizado para classificar os diferentes projetos de sistemas híbridos isolados, de modo a fornecer uma metodologia para comparar os custos totais para diferentes períodos de tempo e entre diferentes sistemas e engloba os custos iniciais de capital, taxa de desconto, custo de operação, manutenção, combustível e substituição.

Por outro lado, a crescente preocupação com a conservação ambiental tem estimulado a busca de fontes renováveis de energia, uma vez que a utilização desse tipo de fonte minimiza a emissão de gases de efeito estufa. Então, dessa vez, há uma vantagem evidente dos sistemas fotovoltaicos em relação aos geradores a diesel.

De acordo com Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006), estes dois objetivos estão em conflito, uma vez que a redução dos custos implica em um aumento das emissões poluentes e vice-versa. Fato, este, devido às características das variáveis de decisão

do sistema híbrido (parcela de produção a partir de geradores a diesel e parcela de produção a partir da utilização de sistemas fotovoltaicos).

5.3 Coleta de dados

5.3.1 Características das tecnologias

Para cálculo da potência instalada de gerador a diesel, que influencia diretamente na mensuração das variáveis de resposta (LCOE e Emissão de CO₂), considerou-se um valor fixo de fator de carga média e a emissão de CO₂ média (medida em gCO₂/L) de um gerador a diesel fornecido pelo *software* HOMER®, ferramenta utilizada para otimização de sistemas híbridos (BRANDONI e BOSNJAKOVIC, 2017). Essas informações são apresentadas na Tabela 5.2.

Fator de Carga*	34,1%
Emissão de CO ₂ *	2.617,6 gCO ₂ /L

*Dados extraído do *Software* HOMER®

Para cálculo da potência instalada de sistemas fotovoltaicos, fator determinante no cálculo do LCOE, considera-se o painel solar fabricado com células de silício policristalino do fabricante Canadian Solar fornecido pelo PVSYST®, *software* relacionado a análise de sistemas fotovoltaicos desenvolvido pelo grupo de energia da Universidade de Genebra, na Suíça (SAUER, ROESSLER e HANSEN, 2015), no qual suas características elétricas e físicas são especificadas na Tabela 5.3.

Fabricante: Canadian Solar	
Modelo	CS6X-320P
Potência Pico	0,32 kW _p
V _{mpp}	36,8V
I _{mpp}	8,69A
V _{oc}	45,3V
I _{sc}	9,26A
Área do Módulo	1,919 m ²
Eficiência do Módulo	16,67%

Sendo o V_{mpp} e o I_{mpp} as características elétricas medidas em condições normais de operação V_{oc} e o I_{sc} as características elétricas mensuradas em condições de teste padrão, 1000W/m² e 25°C). Além disso, foram considerados na análise inversores com eficiência igual a 95% e baterias de 12 V com vida útil de 7,5 anos com capacidade máxima de descarga igual a 50%.

5.3.2 Parâmetros Determinísticos de Entrada

A coleta de dados se deu a partir do projeto de referência, apresentado pela Eletrobras Distribuição Amazonas (2016) e, também, pela nota técnica incentivando possíveis alternativas de suprimento por meio de sistemas híbridos PV-diesel fornecido pela Empresa de Pesquisa Energética (2016). São apresentados a seguir os dados referentes a tecnologia de geração a Diesel utilizada para dimensionamento do sistema. Enquanto a Tabela 5.4 apresenta as premissas de custos normal a todas as regiões do lote, na Tabela 5.5 são indicadas as estimativas de CAPEX (investimentos em geradores e instalação do sistema) e o custo de combustível, que sofrerão variações de acordo com cada região, por questões de acesso a região e estocagem de combustível, principalmente. Cumpre destacar que os valores de investimentos em geradores correspondem a 35% do CAPEX e o restante refere-se aos valores de instalação do sistema.

Tabela 5.4 - Premissas de custos

Custos	Premissas
Custo Anual Fixo	5% do CAPEX
Custo Variável	R\$25/MWh
Custo de Manutenção Geral ¹	60% do valor do gerador

¹ Estima-se que a cada 15.000 horas de operação se faz necessária a realização de manutenção geral dos equipamentos.

Tabela 5.5 - Premissas de CAPEX e Custo de Combustível

Região	Capex (R\$/kW)	Custo de Combustível (R\$/MWh)
Pauini	3.711,00	1.489,00
Tuiué	3.944,00	994,00
Tapauá	3.597,00	903,00
Vila de Belo Monte	3.972,00	1.243,00
Vila de Urucurituba	3.974,00	1.334,00
Sacambu	3.968,00	1.441,00
Parauá	3.956,00	1.599,00
Novo Céu	3.711,00	1.435,00
Manaquiri	3.467,00	1.175,00
Labrea	2.928,00	1.330,00
Itupurú	3.968,00	1.403,00
Caviana	3.923,00	895,00
Castanho I	3.149,00	765,00
Castanho II	3.149,00	1.074,00
Careiro da Várzea	3.556,00	900,00
Campinas	3.944,00	1.159,00
Canutama	3.760,00	1.136,00
Beruri	3.467,00	1.426,00
Araras	3.972,00	1.248,00
Boca do Acre	2.977,00	1.015,00

Os dados de radiação foram coletados a partir do conjunto de dados de meteorologia de superfície e energia solar da NASA com o auxílio do *software* PVSYST®. Para determinação da incidência de radiação solar no plano inclinado, se torna necessário considerar o valor da inclinação dos módulos fotovoltaicos como dado de entrada no referido *software*. Conforme indicado por Villalva (2015), o valor da inclinação para locais com latitude inferior a 10°, que é o caso das regiões objetos de estudo, deve ser considerado com o valor de 10°. Uma vez que, para dimensionamento do sistema considera-se o menor valor de disponibilidade solar (G_w), conforme descrito na Seção 2.7.2, apenas o menor valor de incidência de radiação solar no plano inclinado é apresentado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Radiação solar no plano inclinado

Região	G_w (KWh/m²/dia)
Pauini	4,07
Tuiué	4,28
Tapauá	4,48
Vila de Belo Monte	4,77
Vila de Urucurituba	4,28
Sacambu	4,21
Parauá	4,09
Novo Céu	4,13
Manaquiri	4,13
Labrea	4,85
Itupurú	4,40
Caviana	4,33
Castanho I	4,08
Castanho II	4,13
Careiro da Várzea	4,07
Campinas	4,24
Canutama	4,69
Beruri	4,38
Araras	4,28
Boca do Acre	5,24

A nota técnica fornecida pela Empresa de Pesquisa Energética (2016) apresenta, também, as premissas de custos e investimentos para os sistemas fotovoltaicos, inversores e baterias, que são apresentadas nas Tabelas 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7 - Premissas de custos

Custos	Premissas
Custo Anual Fixo Módulos Fotovoltaicos	2% do CAPEX _m
Custo Fixo Inversores - Anual	1% do CAPEX _i
Custo Fixo Baterias - Anual	1% do CAPEX _i
Custo de Substituição de Baterias	150% do valor da bateria

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016)

Tabela 5.8 – Premissas de investimentos

Investimentos	Valores
Sistemas Fotovoltaicos em R\$/W _p - (CAPEX _m)	5,5
Inversores em R\$/W - (CAPEX _i)	2,0
Bateria em R\$/kWh - (CAPEX _b)	1.500,00

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016)

Conforme pode ser notado na Tabela 5.7, adotou-se como custo de substituição das baterias após a vida útil, um valor 50 % maior, devido à necessidade de retirar as baterias antigas do local e providenciar um descarte adequado, conforme a legislação vigente.

Conforme apresentado na Seção 4.1.2, para cálculo do LCOE se faz necessário estimar o WACC. Nesse contexto, o projeto de referência fornece os valores de custo de capital de terceiros, custo de capital próprio, parcela de capital de terceiros e parcela de capital próprio (Tabela 5.9) para cálculo do WACC utilizando a Equação 4.3.

Tabela 5.9 - Premissas WACC

Custo de capital próprio (K_e)	13% a.a
Custo de capital de terceiros (K_d)	13,50% a.a
% de capital próprio (E)	30%
% de capital de terceiros (D)	70%

Fonte: Eletrobras Distribuição Amazonas (2016)

Vale destacar que, assim como na análise desenvolvida pela EPE(2016), considera-se uma empresa enquadrada no lucro presumido e, portanto, não se utiliza o fator $(1 - t)$ no cálculo do WACC. Finalmente, o WACC é estimado em 13% ao ano, no entanto, assim como em Aquila *et al.* (2016), desconta-se o WACC pela inflação americana, considerada em 2,41% ao ano (ANEEL, 2016b). Portanto, o WACC descontado pela inflação foi calculado em 10,35% ao ano, valor superior aos 6% ao ano utilizado em Rezzouk e Mellit (2015) e muito próximo do valor estimado de 10% ao ano na análise de viabilidade de sistemas híbridos PV-diesel em uma comunidade isolada por Silva, Severino e Oliveira (2013).

5.3.3 Parâmetros Estocásticos de Entrada

Segundo Seddighi e Ahmad-javid (2015b), além dos níveis de emissão de gás, a incerteza sobre os custos dos combustíveis tem grande impacto sobre o planejamento da geração e transmissão de energia, resultando em um problema complexo e multi-dimensional.

Neste modelo, as informações consideradas parâmetros estocásticos são o consumo de combustível, parâmetro esse indispensável no cálculo da emissão, o custo de combustível e o custo dos sistemas fotovoltaicos, que são informações importantes no cálculo do LCOE.

A escolha dos custos de combustível e custos dos sistemas fotovoltaicos são pautadas nas considerações feitas pela análise de sensibilidade desenvolvida para o lote sob análise fornecida pela Empresa de Pesquisa Energética (2016). Segundo essa análise, essas informações podem sofrer significativas variações, consequência, principalmente da complexidade logística e dificuldade de acesso as regiões.

Em relação aos custos do combustível e custos dos sistemas fotovoltaicos, atribui-se uma distribuição triangular de probabilidade, visto que, de acordo com Aouni, Martel e Hassaine (2009), as funções de pertinência triangular podem ser utilizadas para inserir a incerteza nos parâmetros de entrada e saída de um modelo, uma vez que representam bem a expertise humana em julgar corretamente o comportamento de variáveis comuns em diversas situações práticas.

Desse modo, os parâmetros da distribuição triangular (valor otimista, valor provável e valor pessimista) são estabelecidos com base no aumento dos custos do diesel, indicados na Tabela 5.5, em 25% e redução de custo de 25%, visto que, de acordo com Empresa de Pesquisa Energética (2016), essas análises são justificadas devido à incerteza nos valores do combustível durante o período contratual e pelo fato de ser um gasto que perdura durante todo o período. Os valores utilizados como informações de entrada no modelo desenvolvido são indicados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Distribuição triangular (custos do diesel)

Região	Valor Otimista (R\$/kWh)	Valor Provável (R\$/kWh)	Valor Pessimista (R\$/kWh)
Pauini	1.116,75	1.489,00	1.861,25
Tuiúé	745,50	994,00	1.242,50
Tapauá	677,25	903,00	1.128,75
Vila de Belo Monte	932,25	1.243,00	1.553,75
Vila de Urucurituba	1.000,50	1.334,00	1.667,50
Sacambu	1.080,75	1.441,00	1.801,25
Parauá	1.199,25	1.599,00	1.998,75
Novo Céu	1.076,25	1.435,00	1.793,75
Manaquiri	881,25	1.175,00	1.468,75
Labrea	997,50	1.330,00	1.662,50
Itupuru	1.052,25	1.403,00	1.753,75
Caviana	671,25	895,00	1.118,75
Castanho I	573,75	765,00	956,25
Castanho II	805,50	1.074,00	1.342,50
Careiro da Várzea	675,00	900,00	1.125,00
Campinas	869,25	1.159,00	1.448,75
Canutama	852,00	1.136,00	1.420,00
Beruri	1.069,50	1.426,00	1.782,50
Araras	936,00	1.248,00	1.560,00
Boca do Acre	761,25	1.015,00	1.268,75

No que diz respeito aos custos dos sistemas fotovoltaicos, considerou-se o valor mais

provável de custo igual a 5,50 R\$/Wp, e os valores otimista e pessimista iguais a 4,40 R\$/Wp e 6,60 R\$/Wp (Tabela 5.11), respectivamente, assim como desenvolvido na análise de sensibilidade desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Energética (2016).

Tabela 5.11 – Distribuição triangular (custos dos sistemas fotovoltaicos)

	Valor Otimista	Valor Provável	Valor Pessimista
Sistemas Fotovoltaicos (R\$/Wp)	4,4	5,5	6,6

Dufo-López *et al.* (2011) destacam que um gerador a diesel típico consome em torno de 0,32 e 0,53 [l/kWh]. Dessa maneira, para calcular a emissão de CO₂, considera-se que o consumo de combustível varia de acordo com uma distribuição uniforme de probabilidade no intervalo [0,32, 0,53].

5.4 Dimensionamento dos sistemas

A estratégia de operação utilizada é aquela em que se mantém o grupo gerador a diesel funcionando 24 horas e com a parte renovável acoplada diretamente no barramento AC (em geral, via inversor). Dessa forma, o objetivo é minimizar ao máximo o consumo de combustível e reduzir o tamanho e a utilização do banco de baterias (Ministério de Minas e Energia, 2008).

Para dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, considerou-se uma taxa média de degradação de 0,8% ao ano, uma vez que, de acordo com Flowers *et al.* (2016), as taxas médias de degradação relatadas em vários estudos de caso em todo o mundo são altamente variáveis, mas verificou-se que, em geral, esse valor representa em média a taxa pelo qual as tecnologias cristalinas se degradam.

Para os dias de autonomia da bateria (C_s), considera-se que, para um sistema puramente fotovoltaico é necessário um dia e meio de autonomia (36 horas), sendo que a medida que se aumenta a parcela de diesel na configuração do sistema híbrido, o número de dias de autonomia decresce.

5.5 Fase I – Modelagem

Utilizando os dados descritos na Seção anterior e as formulações matemáticas descritas na Seção 2.7.2, é possível dimensionar o sistema híbrido para cada ponto definido no planejamento experimental. O dimensionamento para cada ponto experimental é exibido no Apêndice A.

Obtido o dimensionamento para cada ponto experimental do projeto, a próxima fase consiste em calcular os respectivos valores das variáveis resposta. Primeiramente, pautado no que foi apresentado na Seção 4.1.2, as incertezas das variáveis consumo de combustível, custo de combustível e custo dos sistemas fotovoltaicos são inseridas a partir das distribuições de probabilidade selecionadas na Seção 5.2.3. Em seguida, a partir da SMC, foram simulados 1.000 cenários utilizando o *software Crystal Ball®*, uma vez que de acordo com Kushary *et al.* (2000) esta quantidade é suficiente para eliminar o viés de estimação.

Finalizada a etapa anterior, a média dos valores das variáveis resposta é mensurada e esta é usada para compor a matriz experimental utilizada como entrada para a modelagem e otimização do processo. A matriz experimental para cada região é apresentada no Apêndice B. Finalmente, com base nas funções objetivo modeladas a partir de modelos cúbicos completos, conforme Equação 4.4, os coeficientes β_1^* , β_2^* , β_{12}^* e δ_{12}^* foram estimados pautados no método dos Mínimos Quadrados Ordinários e apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Coeficientes estimados para os modelos cúbicos completos

Região	Custo Nivelado de Energia				Emissão de CO ₂			
	β_1^*	β_2^*	β_{12}^*	δ_{12}^*	β_1^*	β_2^*	β_{12}^*	δ_{12}^*
Pauini	3.771,54	1.562,80	-2.000,41	-234,25	-23,69	15.836,37	-187,59	3.192,33
Tuiuê	3.739,04	1.570,00	-1.474,05	1.461,74	-4,18	2.815,32	-27,20	565,36
Tapauá	3.655,65	1.435,74	-1.521,42	1.087,76	-35,77	23.879,55	-284,74	4.820,48
Vila de Belo Monte	3.608,13	1.896,05	-1.919,44	1.538,04	-1,38	909,23	-8,28	174,82
Vila de Uruçurituba	3.702,45	1.968,69	-2.772,64	-1211,01	-2,10	1.426,16	-17,65	270,62
Sacambu	3.777,29	1.807,79	-1.576,81	2.559,75	-2,35	1.676,29	-16,33	334,29
Parauá	3.740,45	1.538,86	-1.502,36	747,13	-2,32	1.510,51	-16,73	291,89
Novo Céu	3.686,47	1.307,38	-1.387,17	-780,29	-22,94	15.275,29	-184,49	3.092,12
Manaquiri	3.718,72	2.111,42	-2.852,00	-770,04	-54,47	36.309,30	-434,43	7.354,67
Labrea	3.550,12	1.724,70	-3.111,36	-1.053,93	-102,73	68.417,81	-823,24	13.846,87
Itupurú	3.653,27	2.106,70	-2.457,28	-382,35	-1,04	736,64	-8,94	137,56
Caviana	3.673,52	1.995,36	-2.571,79	-563,27	-5,06	3.602,76	-38,21	725,69
Castanho I	3.772,64	1.719,15	-2.964,67	-80,43	-81,84	54.616,04	-652,63	1.1047,99
Castanho II	3.691,04	1.433,61	-2.361,11	-1.514,69	-81,84	54.616,04	-652,63	1.1047,99
Careiro da Várzea	3.761,60	1.698,83	-2.478,00	-263,95	-25,10	16.833,34	-196,30	3.399,77
Campinas	3.690,75	1.554,57	-1.483,65	1,96	-3,46	2.419,78	-25,31	484,79
Canutama	3.624,28	1.503,46	-1.575,13	2.029,39	-19,24	12.906,36	-148,45	2.622,92
Beruri	3.664,48	1.702,75	-2.140,93	-488,96	-43,65	29063,61	-351,02	5.883,25
Araras	3.636,94	1.931,06	-2.205,56	252,44	-1,61	1132,16	-10,34	234,80
Boca do Acre	3.434,64	1.256,66	-1.316,96	-192,73	-97,75	65088,97	-786,12	13.175,74

Em adição, para todas as regiões, os modelos apresentaram bons ajustes, visto que em todos os casos obteve-se valores de R^2 (*adj.*) superiores a 70%, conforme apresenta a Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Valores de R2 (*adj.*)

Região	R^2 (<i>adj.</i>)	
	LCOE	Emissão de CO ₂
Pauini	94,1%	87,1%
Tuiué	88,6%	85,1%
Tapauá	98,3%	89,1%
Vila de Belo Monte	88,2%	88,0%
Vila de Urucurituba	95,5%	87,0%
Sacambu	84,0%	88,3%
Parauá	95,9%	84,2%
Novo Céu	98,4%	85,7%
Manaquiri	95,2%	80,2%
Labrea	97,5%	87,9%
Itupurú	82,5%	85,2%
Caviana	91,0%	82,0%
Castanho I	96,7%	84,1%
Castanho II	98,2%	88,1%
Careiro da Várzea	97,2%	85,1%
Campinas	94,9%	83,0%
Canutama	93,4%	82,1%
Beruri	97,5%	81,1%
Araras	84,2%	89,0%
Boca do Acre	96,3%	82,1%

5.6 Otimização multiobjetivo

Coletados os coeficientes das funções objetivo, resultante das experimentações anteriores, realiza-se a otimização dos problemas multiobjetivo para todos os conjuntos de pesos. Essa fase consiste na construção das fronteiras de Pareto das configurações ótimas em todas as regiões do lote. Em seguida, usando o modelo DEA de supereficiência, analisa-se a melhor configuração do sistema híbrido, isto é, a configuração ótima para cada localização, tendo em vista os objetivos propostos para o problema.

5.6.1 Fronteiras de Pareto (NBI)

Conforme exposto acima, obtêm-se as fronteiras de configurações ótimas para as regiões correspondentes ao lote B/II e essas são representadas a seguir. Contudo, para fins de análises, são selecionadas quatro regiões do lote (Araras, Canutama, Tapauá e Boca do Acre), estas que foram objeto de análise da nota técnica desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Energética (2016), escolhidas em função do prazo contratual, da localização e da potência instalada, buscando representar diferentes portes e complexidade logística. No Apêndice C são apresentadas as fronteiras para as demais regiões.

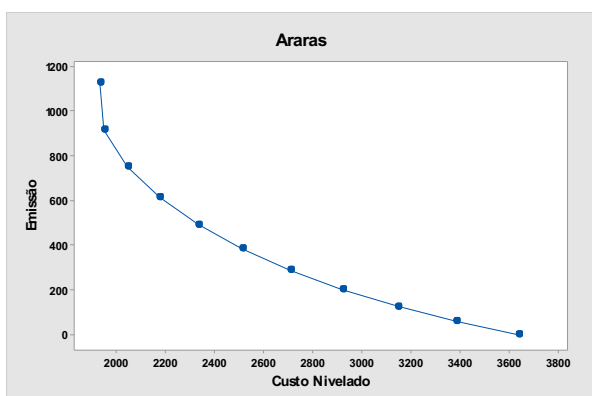


Figura 5.2 - Fronteira de Pareto - Araras

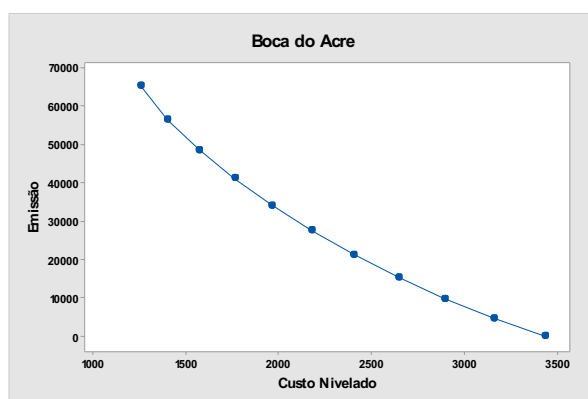


Figura 5.3 - Fronteira de Pareto - Boca do Acre

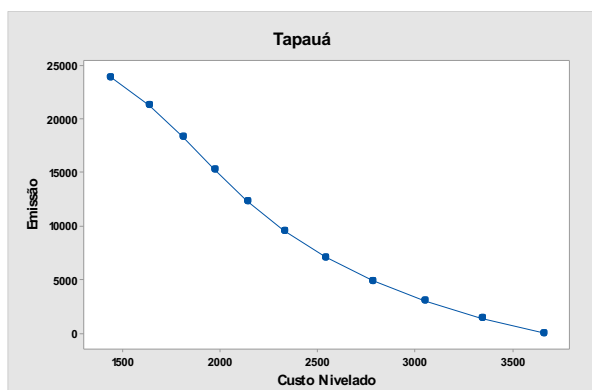


Figura 5.4 - Fronteira de Pareto - Tapauá

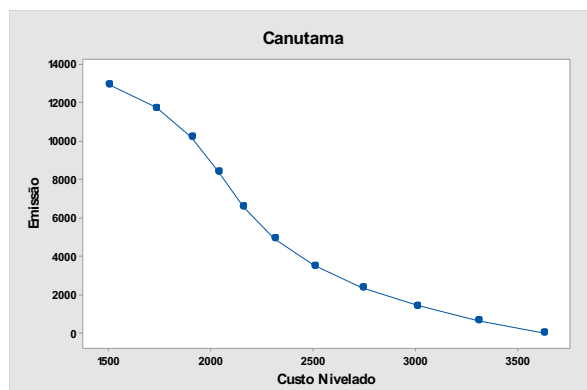


Figura 5.5 - Fronteira de Pareto - Canutama

Conforme pode ser visto nas Figuras 5.2, 5.4, 5.4 e 5.5, as fronteiras de Pareto apresentam as configurações ótimas selecionadas para cada região do lote, quando o problema é estruturado visando minimizar o LCOE e a emissão de CO₂, obtendo, dessa forma, 11 configurações ótimas para cada região. No entanto, com o intuito de encontrar a melhor solução dessa configuração, isto é, a solução mais eficiente das fronteiras de Pareto, utiliza-se o modelo DEA de supereficiência, sendo os critérios utilizados para análise, o LCOE, a emissão e a entropia, assim como descrita na Seção 4.2.1.1. Vale destacar que, para cálculo da emissão

evitada de uma determinada configuração, produto utilizado no modelo DEA, basta calcular a diferença no valor de emissão desta configuração para um sistema formado apenas por geradores a diesel (sistema 100% diesel).

5.6.2 Análises de eficiências

Nas Figuras 5.5 - 5.8 são destacadas as configurações ótimas selecionadas para Araras, Canutama, Tapauá e Boca do Acre, assim como o ranqueamento das configurações mais eficientes para essas regiões. Em adição, as Tabelas 5.14.5.17 apresentam os valores de análise de supereficiência juntamente com as ranqueamento das configurações obtidas para as quatro regiões destacadas. Em seguida, na Tabela 5.18, são apresentados as configurações ótimas, obtidas por meio da análise de supereficiência, para cada região do lote.

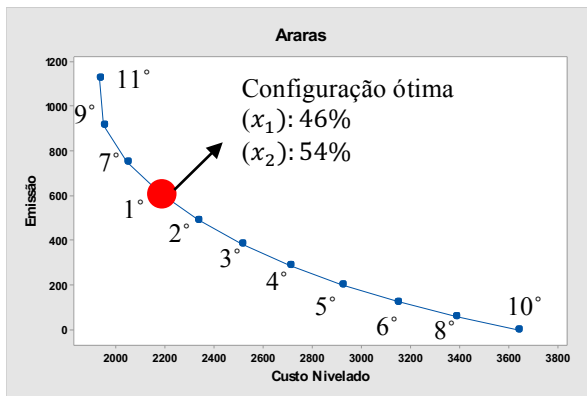


Figura 5.6 - Config. Ótima - Araras

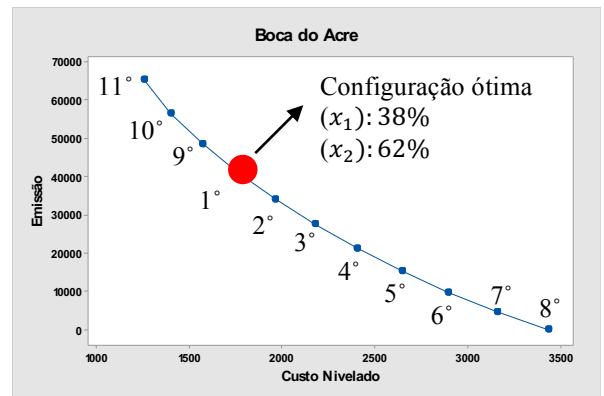


Figura 5.7 - Config. Ótima - Boca do Acre

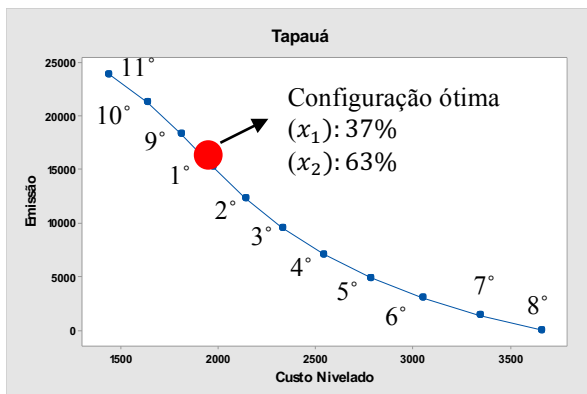


Figura 5.8 - Config. Ótima - Tapauá

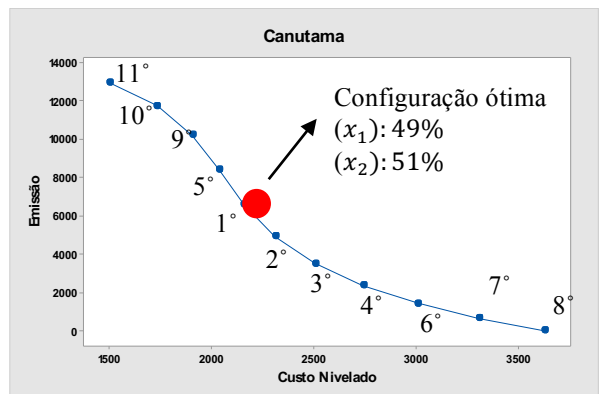


Figura 5.9 - Config. Ótima - Canutama

Tabela 5.14 - Ranqueamento - Araras

Araras			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	46%	54%	1,042
2	56%	44%	1,023
3	65%	35%	1,021
4	73%	27%	1,014
5	80%	20%	1,013
6	87%	13%	1,004
7	35%	65%	1,002
8	94%	6%	0,993
9	100%	0%	0,972
10	21%	79%	0,831
11	0%	100%	0,064

Tabela 5.15 - Ranqueamento - Boca do Acre

Boca do Acre			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	38%	62%	1,043
2	48%	52%	1,023
3	57%	43%	1,014
4	66%	34%	1,013
5	74%	26%	1,013
6	83%	17%	1,012
7	91%	9%	1,001
8	27%	73%	0,993
9	100%	0%	0,992
10	15%	85%	0,801
11	0%	100%	0,074

Tabela 5.16 - Ranqueamento - Canutama

Canutama			
Ranqueamento	x_1 (PV)	x_2 (Diesel)	Supereficiência
1	49%	51%	1,052
2	61%	39%	1,031
3	71%	29%	1,024
4	80%	20%	1,022
5	36%	64%	1,001
6	87%	13%	0,992
7	94%	6%	0,961
8	100%	0%	0,923
9	23%	77%	0,884
10	11%	89%	0,611
11	0%	100%	0,064

Tabela 5.17 - Ranqueamento - Tapauá

Tapauá			
Ranqueamento	x_1 (PV)	x_2 (Diesel)	Supereficiência
1	37%	63%	1,034
2	48%	52%	1,031
3	59%	41%	1,024
4	68%	32%	1,023
5	77%	23%	1,012
6	85%	15%	1,001
7	93%	7%	0,983
8	100%	0%	0,951
9	25%	75%	0,934
10	12%	88%	0,691
11	0%	100%	0,062

Tabela 5.18 - Configuração ótima (lote B)

Região	x (PV)	x_2 (Diesel)
Pauini	42%	58%
Tuiué	48%	52%
Tapauá	37%	63%
Vila de Belo Monte	55%	45%
Vila de Urucurituba	42%	58%
Sacambu	50%	50%
Parauá	37%	63%
Novo Céu	38%	62%
Manaquiri	44%	56%
Labrea	43%	57%
Itupurú	43%	57%
Caviana	42%	58%
Castanho I	37%	63%
Castanho II	41%	59%
Careiro da Várzea	37%	63%
Campinas	39%	61%
Canutama	49%	51%
Beruri	44%	56%
Araras	46%	54%
Boca do Acre	38%	62%

Pode-se notar, a partir das Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 e das Tabelas 5.14-5.17, que há uma tendência das configurações mais ineficientes se localizarem nos extremos, consequência evidente da utilização da entropia como produto da análise pela técnica DEA. Em associação, observa-se que em todos os casos, os pontos das fronteiras de Pareto que apresentam os valores mais altos de diesel na composição são os mais ineficientes da fronteira de Pareto, consequência do alto volume de emissão de CO₂ neste cenário. Ainda, apesar dos referidos pontos serem selecionados como pontos da fronteira de Pareto, possível a partir do método NBI empregado, com a utilização da técnica DEA, nota-se que esses são pontos ineficientes, uma vez que apresentam valores de eficiência inferiores a um. Como pode ser visto nas Tabelas no Apêndice D desenvolvidas para as demais regiões, essas tendências podem ser vistas em todas as localizações sob análise.

Por fim, como pode ser visto na Tabela 5.18, para cada região uma diferente configuração foi selecionada e a única que apresenta a configuração predominantemente fotovoltaica é a região Vila de Belo Monte, esta que apresenta altos custos de combustível e altos índices de radiação solar. Portanto, pode ser inferir que, mesmo para regiões com grande

proximidade, como é o caso das regiões selecionadas no presente estudo, configurações distintas foram sugeridas.

5.7 Comentários gerais e discussões dos Resultados

5.7.1 Considerações gerais

Dessa forma, como pode ser visto objetivou-se otimizar a configuração de um sistema híbrido, ajustando adequadamente as variáveis de decisão, de forma que este ajuste possibilite os melhores resultados de acordo com os objetivos selecionados (minimização do custo nivelado de energia e da emissão de CO₂).

Partindo de um modelo conceitual desenvolvido na primeira fase, a segunda fase do modelo consistiu na modelagem das funções objetivo do problema. Dessa forma, por meio do Projeto de Experimentos de Misturas, obteve-se os coeficientes das funções custo nivelado de energia e emissão de CO₂. Vale ressaltar que os parâmetros custo de combustível, custos dos sistemas fotovoltaicos e consumo de combustível foram consideradas estocásticas. Dessa maneira, os referidos parâmetros foram inseridas no modelo por meio da simulação de Monte Carlo, no qual os custos de combustível e dos sistemas fotovoltaicos foram modelados a partir de uma distribuição triangular de probabilidade e, por sua vez, utilizou-se uma distribuição uniforme para representar a variação do consumo de combustível.

Em posse das funções aproximadas na Fase II, a terceira fase compreendeu, primeiramente, a formulação do problema multiobjetivo, solucionada por meio do método NBI. Assim, a partir do referido método, foram geradas as fronteiras de Pareto das regiões sob análise. Em seguida, com o intuito de selecionar as configurações mais eficientes das fronteiras de Pareto, fez-se uso do modelo DEA de supereficiência. A partir desse modelo, gerou-se um ranqueamento das configurações mais eficientes de cada região.

5.7.2 Análise e discussão dos resultados

Com a finalidade de conhecer melhor o processo e, portanto, melhorar a capacidade de gerenciamento dos efeitos das variáveis de decisão nas respostas do processo, realizou-se a análise dos coeficientes. Os coeficientes gerados e apresentados na Tabela 5.12 mostram que para o custo nivelado de energia, o coeficiente referente a parcela de sistemas fotovoltaicos apresentam um impacto maior na resposta do processo. Já para a emissão, é evidente que a parcela de geradores a diesel apresente maiores impactos. Essas respostas indicam a necessidade de incentivos para o fomento de sistemas fotovoltaicos, visto que a sua utilização,

que apresenta maiores custos, reduz significativamente a emissão de gases poluentes. A Tabela 5.12 revela, também, que diversas interações entre as variáveis se comportaram como fatores significativos, o que implica que o efeito conjunto dessas variáveis influenciou de maneira significativa os resultados do processo. Por fim, após verificação de adequação do modelo, pode-se inferir que os modelos finais apresentaram um bom grau de explicação, uma vez que todas as funções apontaram ajustes superiores a 80%.

Após selecionada a configuração ótima para cada região, comparam-se os LCOEs e o volume de emissão de CO₂ referentes a essas configurações ótimas com o sistema composto apenas por geradores a diesel, conforme mostra a Tabela 5.15.

Tabela 5.19 - Configuração ótima vs. Configuração 100% diesel

Região	LCOE [R\$/MWh]			Emissão de CO ₂ [ton/ano]		
	Config. Ótima	Config. 100% Diesel	Diferença	Config. Ótima	Config. 100% Diesel	Diferença
Pauini	1.986,07	1.492,29	33,09%	9.323,41	16.268,58	-42,69%
Tuiué	2.259,8	1.502,12	50,44%	1.456,37	2.891,96	-49,64%
Tapauá	1.967,98	1.416,02	38,98%	15.264,25	24.531,32	-37,78%
Vila de Belo Monte	2.319,82	1.834,89	26,43%	406,13	933,9	-56,51%
Vila de Urucurituba	1.975,63	1.632,61	21,01%	831,37	1.465,07	-43,25%
Sacambu	2.397,26	1.564,04	53,27%	835,79	1.721,98	-51,46%
Parauá	2.055,06	1.501,32	36,88%	957,52	1.551,87	-38,30%
Novo Céu	1.845,62	1.322,05	39,60%	9.557,41	15.692,27	-39,09%
Manaquiri	2.091,08	1.688,21	23,86%	20.469,95	37.300,38	-45,12%
Labrea	1.712,88	1.358,33	26,10%	39.147,41	70.285,39	-44,30%
Itupurú	2.151,77	2.082,45	3,33%	424,63	756,84	-43,89%
Caviana	2.051,07	1.860,05	10,27%	2.108,2	3.700,88	-43,04%
Castanho I	1.840,06	1.680,23	9,51%	32.527,13	56.106,8	-42,03%
Castanho II	1.622,64	1.441,08	12,60%	35.002,31	56.106,8	-37,61%
Careiro da Várzea	1.873,9	1.679,9	11,55%	10.690,92	17.292,24	-38,18%
Campinas	2.028,45	1.518,55	33,58%	1.503,38	2.485,77	-39,52%
Canutama	2.158,49	1.454,38	48,41%	6.558,02	13.258,58	-50,54%
Beruri	1.886,03	1.696,25	11,19%	18.845,86	29.856,97	-36,88%
Araras	2.174,08	1.858,15	17,00%	611,69	1.163,03	-47,41%
Boca do Acre	1.759,24	1.248,71	40,88%	41.019,28	66.865,72	-38,65%
Total	2.007,85	1.591,58	26,15%	247.541,07	420.236,35	-41,09%

Depreende-se a partir da Tabela 5.15 que há uma significativa redução da emissão de CO₂ com as configurações ótimas selecionadas, visto que, a instalação desses sistemas híbridos

proporciona economia de, aproximadamente, 41% ao compará-las com os sistemas 100% diesel. Em contrapartida, uma vez que a utilização de sistemas fotovoltaicos é uma solução mais cara devido, principalmente, aos altos custos das baterias, a instalação dos referidos sistemas híbridos geram um aumento de 26,15% do custo nivelado de energia. Essas respostas evidenciam o efeito conflitante das alterações das variáveis de decisão nos objetivos do problema, uma vez que um aumento da parcela de sistemas fotovoltaicos reduz a emissão de CO₂, aumentando, porém, o TOTEX, variável que influencia diretamente no cômputo do custo nivelado de energia. Desse modo, é possível estabelecer um gráfico no qual é mostrado o *trade-off* entre as funções objetivo quando as configurações são alteradas. Os gráficos representando o *trade-off* para as quatro regiões destacadas anteriormente mais o gráfico para todas as regiões em conjunto (denotada por Lote B) são apresentados nas Figuras 5.9 - 5.13.

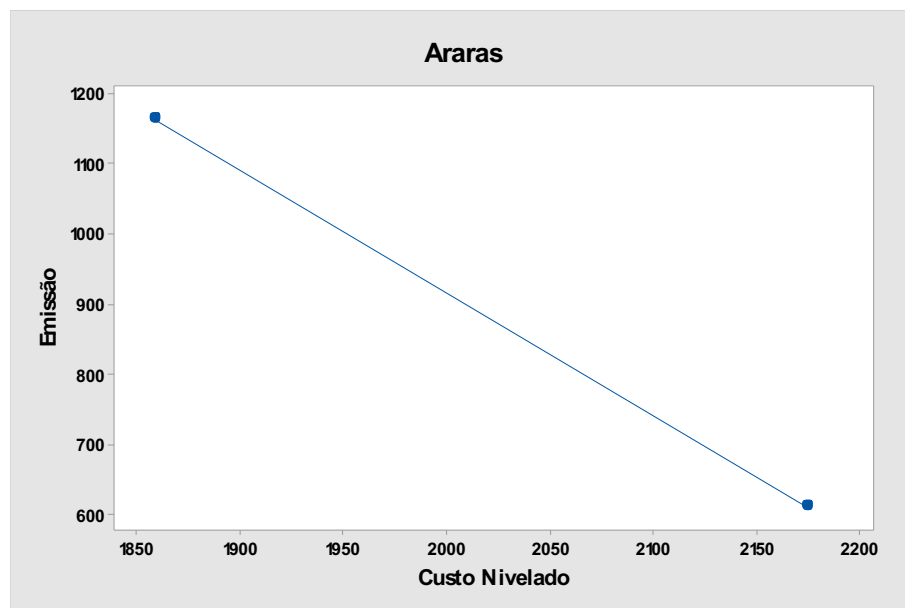


Figura 5.2 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Araras

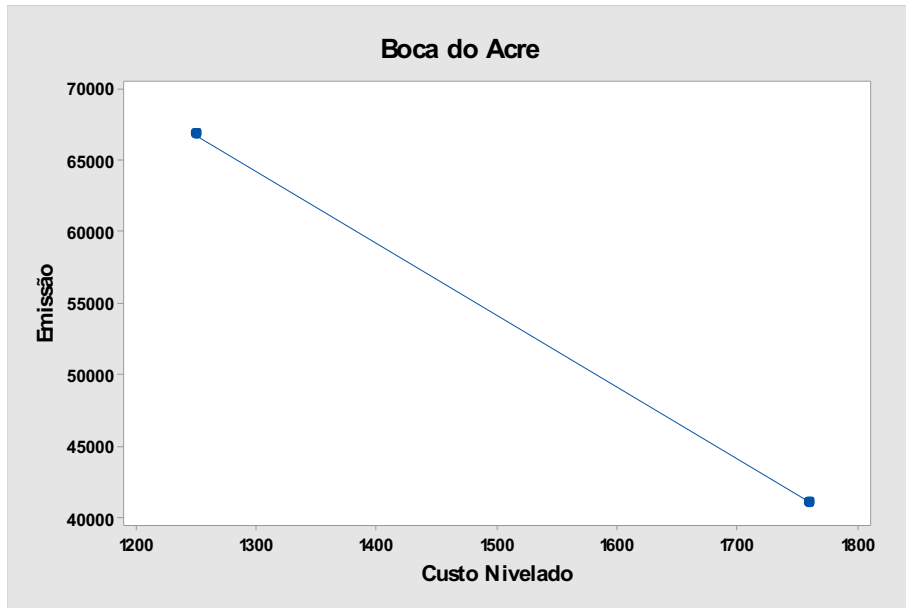


Figura 5.3 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Boca do Acre

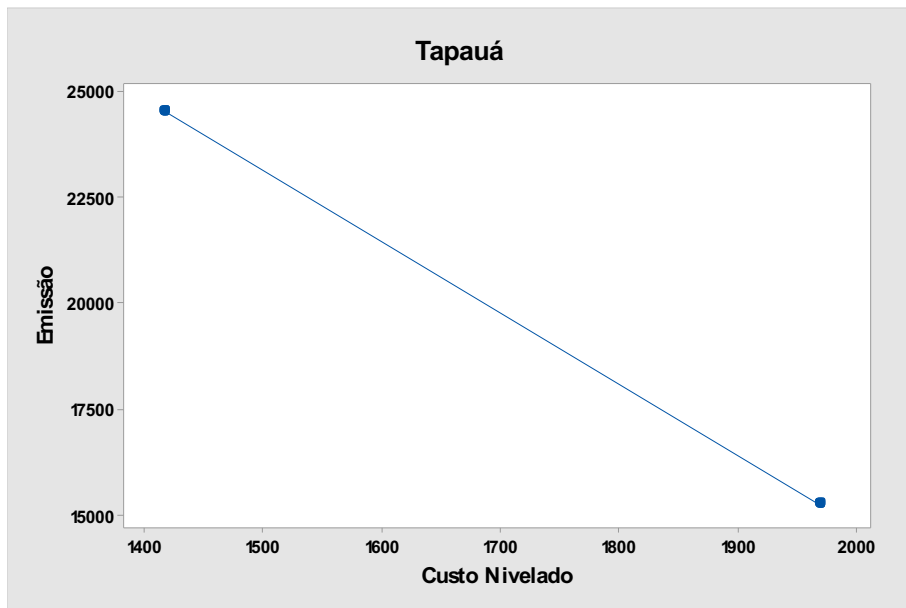


Figura 5.4 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Tapauá

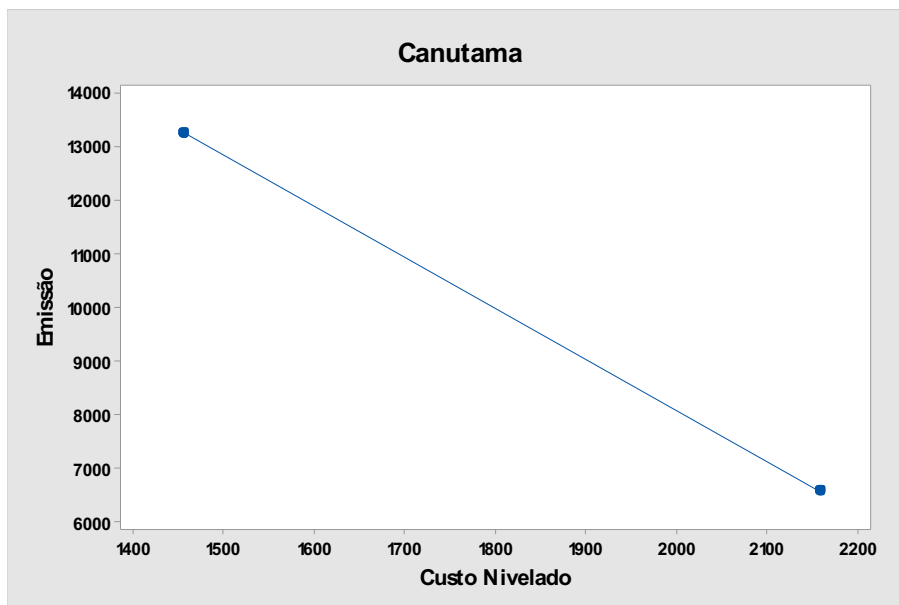


Figura 5.5 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Canutama

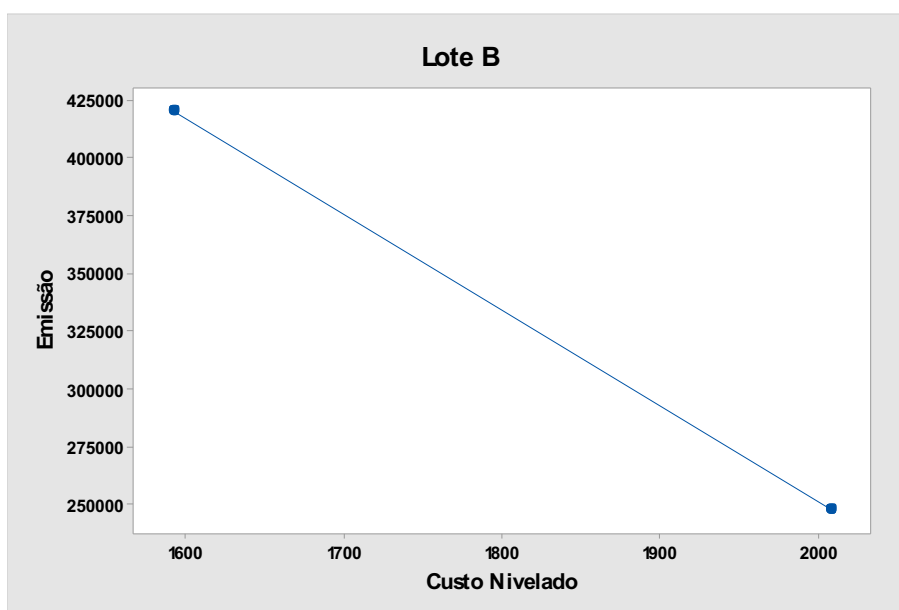


Figura 5.6 - Trade-off LCOE vs. Emissão - Lote B

A inclinação das retas apresentadas pelas figuras pode sinalizar que a redução da emissão é mais significativa do que o aumento no custo nivelado de energia quando se seleciona a configuração ótima, resultados que atestam a eficiência dos métodos empregados. Apesar da seleção do objeto de estudo ser pautada na aplicabilidade do método proposto, devido às características dos processos de leilão, o foco do produtor seria apenas na redução do LCOE, sendo plausível analisar a importância de incentivos fiscais por parte do governo com foco na redução da emissão de gases de efeito estufa. Neste contexto, de acordo com Aquila *et al.*

(2016), o Brasil busca promover linhas de crédito especiais para contratação de projetos de geração de energia renovável. Uma vez que tais incentivos podem sobrepor os custos adicionais, é possível motivar produtores a investir em projetos híbridos, com inserção de fontes de energia renovável, mesmo que esses venham a apresentar maior TOTEX.

Por meio do uso do DEA de supereficiência, conclui-se que foram selecionados como resposta mais eficiente configurações sempre próximas ao sistema híbrido composto igualmente de geradores a diesel e sistemas fotovoltaicos, indicando que as soluções menos eficientes são as localizadas nas extremidades. Este fato ocorreu devido ao objetivo traçado nessa aplicação, no qual insere-se a entropia como produto na análise DEA, buscando obter soluções híbridas com essas características. No entanto, cabe destacar que, caso outros objetivos fossem planejados, o ranqueamento de configurações ótimas poderia ser alterado. Além disso, cumpre destacar que, mesmo em regiões próximas, como é o caso dos mercados representados no presente estudo, configurações distintas foram selecionadas. Fato este devido, principalmente, as características de cada região, uma vez que os mercados apresentam índices de radiação solar, custos e investimentos característicos para cada região.

5.8 Validação do Modelo

Por fim, para validação do modelo, compara-se os resultados do método proposto com os resultados obtidos quando utilizado o *software* HOMER®, uma vez que essa é uma técnica muito utilizada na literatura (Ver REZZOUK e MELLIT, 2015 e SILVA, SEVERINO e OLIVEIRA, 2013).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016), o *software* HOMER® (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) é um modelo de otimização de sistemas híbridos, desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) nos Estados Unidos (EUA). De acordo com Rezzouk e Mellit (2015), o referido *software* é uma ferramenta poderosa para projetar e analisar sistemas híbridos isolados e conectados à rede, oferecendo um grande número de sistemas de produção e armazenamento de energia (turbinas eólicas, sistemas fotovoltaicos, hidrelétricas, células de combustível, etc.). Com base nos parâmetros de entrada, que são o perfil de carga, os potenciais de recursos, as características técnicas e econômicas dos componentes do sistema híbrido, o *software* simula todas as configurações possíveis e exibe os resultados como uma lista dos viáveis, que atendem às necessidades de carga no máximo custo - forma eficaz, classificada pelo VPC em ordem crescente (REZZOUK e MELLIT, 2015).

Dessa forma, as localizações e os parâmetros determinísticos de entrada das regiões Araras, Boca do Acre, Canutama e Tapauá são inseridos no *software* HOMER®, que por sua vez apresenta os resultados de melhor configuração. Para o sistema PV-Diesel com baterias, escopo do presente trabalho, são selecionadas as quatro melhores configurações em ordem decrescente para cada região, conforme a Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Melhores Configurações (HOMER®)

Ranqueamento	Araras		Boca do Acre		Tapauá		Canutama	
	X_1	X_2	X_1	X_2	X_1	X_2	X_1	X_2
	(PV)	(Diesel)	(PV)	(Diesel)	(PV)	(Diesel)	(PV)	(Diesel)
1	47%	53%	47%	53%	47%	53%	48%	52%
2	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%
3	17%	83%	14%	86%	15%	85%	16%	84%
4	100%	0%	100%	0%	100%	0%	100%	0%

Com o intuito de comparar os resultados obtidos com a utilização do *software* com os resultados obtidos por meio do modelo apresentados nesse trabalho, realizou-se a comparação da supereficiência dos pontos obtidos com o *software* com os pontos gerados pelo método NBI (fronteira de Pareto), utilizando os mesmo insumos e produtos selecionados no método proposto. Dessa forma, as Tabelas 5.21- 5.24 apresentam os ranquamentos obtidos por meio do método DEA de supereficiência para cada região.

Tabela 5.21 - Ranqueamento - HOMER® X NBI + DEA (Araras)

Ranqueamento	Araras			Método
	X_1	X_2	Supereficiência	
	(PV)	(Diesel)		
1	56%	44%	1,020	NBI + DEA
2	65%	35%	1,015	NBI + DEA
3	73%	27%	1,011	NBI + DEA
4	80%	20%	1,008	NBI + DEA
5	46%	54%	1,005	NBI + DEA
6	87%	13%	1,001	NBI + DEA
7	47%	53%	1,001	HOMER®
8	35%	65%	0,998	NBI + DEA
9	94%	6%	0,989	NBI + DEA
10	100%	0%	0,969	HOMER® e NBI + DEA
11	21%	79%	0,833	NBI + DEA
12	17%	83%	0,735	HOMER®
13	0%	100%	0,059	HOMER® e NBI + DEA

Tabela 5.22 – Ranqueamento - HOMER® X NBI + DEA (Boca do Acre)

Boca do Acre				
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência	Método
1 ^o	38%	62%	1,037	NBI + DEA
2 ^o	57%	43%	1,013	NBI + DEA
3 ^o	66%	34%	1,010	NBI + DEA
4 ^o	74%	26%	1,008	NBI + DEA
5 ^o	83%	17%	1,007	NBI + DEA
6 ^o	47%	53%	1,001	HOMER®
7 ^o	48%	52%	1,001	NBI + DEA
8 ^o	91%	9%	0,999	NBI + DEA
9 ^o	27%	73%	0,988	NBI + DEA
10 ^o	100%	0%	0,986	HOMER® e NBI + DEA
11 ^o	15%	85%	0,805	NBI + DEA
12 ^o	14%	86%	0,797	HOMER®
13 ^o	0%	100%	0,072	HOMER® e NBI + DEA

Tabela 5.23 – Ranqueamento - HOMER® X NBI + DEA (Tapauá)

Tapauá				
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência	Método
1 ^o	37%	63%	1,024	NBI + DEA
2 ^o	59%	41%	1,023	NBI + DEA
3 ^o	68%	32%	1,017	NBI + DEA
4 ^o	77%	23%	1,013	NBI + DEA
5 ^o	47%	53%	1,004	HOMER®
6 ^o	48%	52%	1,004	NBI + DEA
7 ^o	85%	15%	1,000	NBI + DEA
8 ^o	93%	7%	0,982	NBI + DEA
9 ^o	100%	0%	0,949	HOMER® e NBI + DEA
10 ^o	25%	75%	0,929	NBI + DEA
11 ^o	15%	85%	0,745	HOMER®
12 ^o	12%	88%	0,688	NBI + DEA
13 ^o	0%	100%	0,064	HOMER® e NBI + DEA

Tabela 5.24 – Ranqueamento - HOMER® X NBI + DEA (Canutama)

Canutama				
Ranqueamento	X ₁ (PV)	X ₂ (Diesel)	Supereficiência	Método
1	61%	39%	1,033	NBI + DEA
2	71%	29%	1,023	NBI + DEA
3	80%	20%	1,016	NBI + DEA
4	48%	52%	1,003	HOMER®
5	49%	51%	1,003	NBI + DEA
6	36%	64%	0,997	NBI + DEA
7	87%	13%	0,989	NBI + DEA
8	94%	6%	0,960	NBI + DEA
9	100%	0%	0,918	HOMER® e NBI + DEA
10	23%	77%	0,876	NBI + DEA
11	16%	84%	0,742	HOMER®
12	11%	89%	0,608	NBI + DEA
13	0%	100%	0,059	HOMER® e NBI + DEA

Conforme é possível observar nas Tabelas 5.21- 5.24, em todas as regiões prevaleceu os resultados obtidos por meio do método apresentado no presente trabalho. No entanto, e nota-se, também, que a configuração apontada pelo *software* HOMER® como a configuração ideal é uma solução eficiente, apresentando valor de supereficiência acima de um. Em contrapartida, a segunda configuração ideal segundo o *software* apresenta o pior valor de eficiência, uma vez que a configuração puramente diesel é a configuração mais ineficiente. Além disso, o método desenvolvido neste trabalho apresenta como vantagem fornecer a possibilidade de se tratar mais de um objetivo a ser otimizado simultaneamente, ao contrário do *software* HOMER® que ranqueia as configurações de acordo com o valor presente dos custos dos sistemas simulados. Em adição, o método desenvolvido fornece, também, a possibilidade de inserção de variáveis estocásticas no modelo, a partir de distribuições de probabilidade. Em contrapartida, o *software* HOMER® fornece a possibilidade de simular diferentes resultados de configuração ideal de acordo com incertezas nas variáveis de entrada.

Dessa forma, pode-se notar a importância do método desenvolvido no presente trabalho, uma vez que a partir da estruturação proposta para configuração ótima de um sistema híbrido pode-se selecionar soluções mais eficientes que os resultados fornecidos a partir de um *software* amplamente utilizado na literatura, como é o caso do *software* HOMER®.

6 CONCLUSÕES

6.1 Principais Contribuições do Trabalho

No que se diz respeito as técnicas de otimização multiobjetivo, sobretudo em relação a aplicação em sistemas híbridos com a presença de fontes de energia renovável, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor um método para determinar as melhores composições para os sistemas em comunidades isoladas. Um dos objetivos principais foi combinar DOE, programação multiobjetivo e DEA (usado como método à *posteriori*) para buscar a seleção da configuração ótima. Pautado em uma análise criteriosa sobre o tema, constatou-se que, apesar do escopo do trabalho (sistemas híbridos) e as ferramentas de otimização utilizadas serem bastantes vistas na literatura, a associação entre esses assuntos ainda é um campo pouco explorado, sendo, portanto, os elementos motivacionais dessa pesquisa.

No decorrer do desenvolvimento deste estudo, foram abordados os temas pertinentes à sua construção, como o crescimento de geração a partir de fontes de energia renovável, trabalho relacionados a sistemas híbridos, ferramentas matemáticas para modelagem e otimização multiobjetivo, entre outros. Todavia, os assuntos que se mostraram como contribuição principal do estudo, foram o uso do método NBI para construção da fronteira de Pareto e a utilização de um método a *posteriori* para seleção da configuração ótima, visto que, conforme mencionados, essas abordagens são pouco exploradas na literatura, ainda mais quando associados com sistemas híbridos isolados.

Desse modo, foi proposto um método de configuração ótima para sistemas híbridos isolados, por meio da fusão das técnicas de DOE de Misturas, Intersecção Normal à Fronteira e DEA de Supereficiência. Com o intuito de comprovar a aplicabilidade do método proposto, um modelo conceitual de um sistema PV-diesel é desenvolvido e, em seguida, a metodologia proposta é aplicada para analisar um conjunto de 20 mercados isolados, no estado do Amazonas.

Em congruência com os objetivos específicos traçados no Capítulo 1, pode-se afirmar que:

- No que diz respeito a modelagem das funções objetivo, o método se diferencia pela utilização do DOE de misturas para determinação dos coeficientes da função objetivo, resultando em ajustes adequados de modelo (R^2 ajustado superior a 80%);
- Referente aos dados de entradas, o impacto das variáveis estocásticas foi inserido no modelo por meio da simulação de Monte Carlo;

- Em relação aos outros métodos de otimização aplicados a sistemas híbridos disponíveis na literatura, o presente trabalho utiliza o método NBI ao escopo do trabalho, buscando contribuir para uma lacuna existente, apresentando um método que se sobressai em relação aos outros por indicar como solução fronteiras equidistantes da configuração ótima. Além disso, o presente método se diferencia por apresentar um método a *posteriori* para seleção da configuração ótima do sistema. Dessa forma, comparações dos resultados de configuração ótima com um sistema 100% diesel foi factível por meio do desenvolvimento e aplicação do DEA de supereficiência na fronteira de Pareto;
- Em relação aos resultados de aplicação prática obtidos, é possível inferir que, por apresentarem volumes altos de emissão de CO₂, as configurações 100% diesel foram consideradas as menos eficientes da Fronteira de Pareto. Não obstante, é visto que, exceto em uma região, sempre prevalece como configuração ótima aquela composta predominantemente por geradores a diesel. Conclui-se, também, que, conforme esperado, a utilização da entropia como produto do DEA possibilitou a diversificação dos sistemas híbridos. Por fim, é possível notar também que mesmo em regiões próximas, configurações diferentes do sistema híbrido podem ser selecionadas.

Ainda em relação aos resultados alcançados, é notório que há um *trade-off* entre o LCOE e a emissão de CO₂, uma vez que o aumento do LCOE implica na redução da emissão e vice-versa. Partindo do pressuposto que um decisor tende a optar sempre pela opção menos onerosa, ainda mais em situações de leilão em que o menor lance é declarado vencedor, pode-se concluir que a opção mais vantajosa seria sempre evidenciada pela extremidade da fronteira de Pareto representada pelo menor LCOE. No entanto, conforme mencionado, é importante considerar os incentivos fornecidos para instalação de fontes renováveis de energia, visto que sua utilização implica em substanciais reduções da emissão de gases de efeito estufa, contribuindo de forma significativa com o meio ambiente.

A partir das considerações acima, pode-se concluir que o método proposto no presente trabalho para seleção de configuração ótima de sistemas híbridos isolados foi desenvolvido e aplicado com êxito, contribuindo com a lacuna existente na literatura. Portanto, conforme proposto no Capítulo 4, apesar da aplicação do método em sistemas híbridos PV-diesel, espera-se que a proposta apresentada neste trabalho possa ser aplicável a diferentes sistemas híbridos, contribuindo, através de seus resultados, para a análise de configuração ótima em diferentes

situações. Além disso, a metodologia proposta poderia ser empregada por órgãos governamentais que cuidam do processo de leilões de energia na definição de possíveis incentivos que venham a mitigar a emissão de gases com a escolha dos pontos mais eficientes da fronteira de Pareto. Esse intuito seria de tornar os sistemas híbridos mais competitivos em relação aos sistemas puramente diesel.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Conforme discutido anteriormente, como os possíveis incentivos fiscais fornecidos pelo governo podem sobrepor os custos adicionais de geração de energia por fontes renováveis, torna-se interessante, futuramente, desenvolver uma análise para proposta de configuração ótima, por meio de outros indicadores, tal como a métrica de Valor Presente Líquido (VPL) considerando linhas de créditos especiais e políticas de incentivos.

Ainda, é possível verificar que, a questão da emissão de CO₂ é relevante nas regiões selecionadas, uma vez que se tratam de reservas ambientais. No entanto, quando não houver essa característica no objeto de estudo escolhido, é de suma importância analisar o porte da região em análise e o nível de emissão emitido. O intuito nesse caso seria de determinar a relevância de se introduzir a variável emissão do gases de efeito estufa em regiões de pequeno porte onde o nível de emissão é mínimo.

Além disso, as sugestões para estes estudos podem ser direcionados para os seguintes tópicos:

- Possibilidade de utilização de outros insumos e outros produtos no modelo DEA de supereficiência para determinação da configuração ótima. Como sugestão pode-se considerar a otimização da área necessária para instalação dos sistemas híbridos;
- Análise das incertezas das variáveis do projeto, além das variáveis estocásticas utilizadas no presente trabalho;
- Possibilidade de utilização de outros arranjos experimentais para o planejamento e realização dos experimentos;
- Utilização de outros métodos para geração da fronteira de Pareto e seleção da configuração ótima e, dessa forma, comparação com os resultados obtidos com o modelo apresentado neste trabalho.
- Utilização de outras tecnologias para análise de sistemas híbridos e, possível, comparação com os resultados obtidos com o sistema híbrido PV-diesel apresentado no presente trabalho.

- Aplicação do método proposto em estudos de casos desenvolvidos por outros autores, como os trabalhos de Rezzouk e Mellit (2015), Dufo-López *et al.* (2011), Belfkira, Zhang e Barakat (2011), Bernal-Agustin, Dufo-López e Rivas-Ascaso (2006).

REFERÊNCIAS

- AHMADI, A.; MOGHIMI, H.; NEZHAD, A.E.; AGELIDIS, B. G.; SHARAF, A. M. Multi-objective economic emission dispatch considering combined heat and power by normal boundary intersection method. **Electric Power Systems Research**, v.129, 32-43, 2015.
- ALLEN, M. F. Environmental impacts of utility-scale solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.29, 766-799, 2014.
- AMEEN, A. M.; PASUPULETI, J.; KHATIB, T. Simplified performance models of photovoltaic/diesel generator/battery system considering typical control strategies. **Energy Conversion and Management**, v.99, 313–326, 2015.
- ANDA, J.; GOLUB, A.; STRUKOVA, E. Economics of climate change under uncertainty: Benefits of flexibility. **Energy Policy**, v.37, 1345–1355, 2009.
- ANDERSEN, P.; PETERSEN, N. C. A procedure for ranking efficient units in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, v. 39, 1261-1264, 1993.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração. Capacidade de Geração do Brasil**. 2016a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 14 de Setembro de 2016.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica n°33/2016 – SGT/ANEEL**, 2016b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2016/005/documento/ntecnica_33_sgt_ap_caiua.pdf> Acesso em: 14 de Setembro de 2016.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **N° 02/2016 (2ª ETAPA): Aquisição de energia elétrica e potência associada de agente vendedor nos sistemas isolados, para a tendimento a mercados de concessionária de distribuição da região norte**, 2016c. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/Edital_Leilao_02-2016_2a.etapa.pdf> Acesso em: 14 de Dezembro de 2016.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa n° 427, 2011.
- AOUNI, B.; MARTEL, J.; HASSAINE, A. Fuzzy Goal Programming Model: An overview of the current state of the art. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 16, n. 5, 2009.
- AQUILA, G.; ROCHA, L. C. S.; JUNIOR, P. R.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; PAIVA, A. P. Wind power generation: An impact analysis of incentive strategies for cleaner energy provision in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, 1100-1108, 2016.
- BAJPAI, P.; DASH, V. Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, 2926-2939, 2012.
- BANKER, R.D.; CHARNES, A.; COOPER, W.W. Some models for estimating technical scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 30, 1078-1092, 1984.
- BANKER, R. D.; COOPER, W. W.; SEIFORD, L. M.; ZHU, J. **Handbook on Data Envelopment Analysis**. 2o ed. Boston: Springer, 2011.

- BELFKIRA, R.; BARAKAT, G.; NICHITA, C. Sizing optimization of a stand-alone hybrid power supply unit: wind/PV system with battery storage. **International Review of Electrical Engineering (IREE)**, v.3, n.5, 2008.
- BELFKIRA, R.; ZHANG, L.; BARAKAT, G.. Optimal Sizing Study of hybrid wind/PV/Diesel power generation unit. **Solar Energy**, v.85, 100-110, 2011.
- BERNAL-AGUSTÍN, J. L.; DUFO-LÓPEZ, R.; RIVAS-ASCASO, D. M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions. **Renewable Energy**, v.31, 2227-2244, 2006.
- BIGERNA, S.; BOLLINO, C. A.; MICHELI, S. Renewable energy scenarios for costs reductions in the European Union. **Renewable Energy**, v.96, 80-90, 2016.
- BORENSTEIN, S. The Private and Public Economics of Renewable Electricity Generation. **Journal of Economic Perspectives**, v.26, p.67-92, 2012.
- BOROWY, B. S.; SALAMEH, Z. M. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system. **IEE Transactions on Energy Conversion**, v.11, n.2, 1996.
- BOX, G.; HUNTER, W. HUNTER, J. **Statistics for Experimenters**. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- BRANDONI, C.; BOSNJAKOVIC, B. HOMER analysis of the water and renewable energy nexus for water-stressed urban areas in Sub-Saharan Africa. **Journal of Cleaner Production**, v.155, 105-118, 2017.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ENERGÉTICOS – CGEE. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídio para tomada de decisão. Série documentos técnicos 2**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.
- CHARNES, A.; COOPER, W.W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision-making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, 429-444, 1978.
- COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONNELL, C. J.; BATTESE, G. E. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. 2a ed. New York: Springer, 1996.
- COLLETTE Y, SIARRY P. **Multiobjective optimization: principles and case studies**, 1st ed. Berlin: Springer; 2004.
- CORNELL, J. **Experiments with mixtures**. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- CORONADO, M.; SEGEDÃES, A. M.; ANDRÉS, A. Using mixture design of experiments to assess the environmental impact of clay-based structural ceramics containing foundry wastes. **Journal of Hazardous Materials**, v.299, 529-539, 2015.
- COSTA, D. M.; BRITO, T. G.; DE PAIVA, A. P.; LEME, R. C.; BALESTRASSI, P. P. A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel. **Journal of Cleaner Production**, v.135, 1658-1672, 2016.
- CROOK, J. A.; JONES, L. A.; FORSTER, P. M.; CROOK, R. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. **Energy & Environmental Science**, v.4, 3101–3109, 2011.

DEL RÍO, P. The dynamic efficiency of feed-in tariffs: The impact of different design elements. **Energy Policy**, v.41, p.139-151, 2012.

DAS, I., e DENNIS, J.E. Normal boundary intersection: A new method for generating the Pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. **SIAM Journal of Optimization**, 8, 631-657, 1998.

DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTIN, J. L.; YUSTA-LOYO, J. M.; DOMINGUEZ-NAVARRO, J. A.; RAMIREZ-ROSADO, I. J.; LUJANO, J.; ASO, I. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. **Applied Energy**, v.88, 4003-4041, 2011.

DUTRA, R.M; SZKLO, A.S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**,v.33, p.65-76, 2008.

ECHEGARAY, F. Understanding stakeholders' views and support for solar energy in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.63, 125-133, 2014.

EDENHOFER, O.; HIRTH, L.; KNOPF, B.; PAHLE, M.; SCHLÖMER, S.; SCHMID, E.; UECKERDT, F. On the economics of renewable energy sources. **Energy Economics**, v.40,p.512-523, 2013.

ELETRÓBRAS DISTRIBUIÇÃO AMAZONAS. **Projeto de Referência para atendimento aos Mercados Isolados da Eletrobras Amazonas Energia – GRUPO B: Lote 1/1-A – Médio Amazonas/Negro Lote 2 – Médio Solimões/Purus Lote 3/3-A – Madeira Lote 4 – São Gabriel da Cachoeira Lote 5 - Autazes - 54 PLANTAS**, 2016. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos_editais.cfm?IdProgramaEdital=160>. Acesso em: 10 de novembro de 2016.

EL KHADIMI, A.; BACHIR, L.; ZEROUAL, A. Sizing optimization and techno-economic energy system hybrid fotovoltaic-wind with storage system. **Renewable Energy Journal**, v.7, 73-83, 2004.

ELLISTON, B.; RIESZ, J.; MACGILL, I. What cost for more renewables? The incremental cost of renewable generation - An Australian National Electricity Market case study. **Renewable Energy**, v.95, 127–139, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional - 2010**. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Nota Técnica DEA: Estudos da eficiência energética - Consumo de energia no Brasil: Análises setoriais**, 116pp, Rio de Janeiro, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Sistemas Isolados: Energia solar para suprimento de sistemas isolados do Amazonas**. 2016

EUROPEAN COMMISSION. **An energy policy for Europe, COM (2007) 1 final**. Brussels, 2007.

EUROPEAN COMMISSION. **Energy 2020: A Strategy for Competitive, Sustainable and Secure Energy**. European Commission, Brussels, 2010.

EUROPEAN COMMISSION. **Energy Roadmap 2050**. European Commission, Brussels, 2011.

FANG, S.-C.; RAJASEKERA, J. R.; TSAO, H.-S. J. **Entropy optimization and mathematical programming**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1997.

FERREIRA, J. H. I.; CAMACHO, J. R. C.; MALAGOLI, J. A.; JÚNIOR, S. C. G. Assessment of the potential of small hydropower development in Brazil. **Renewable and sustainable energy review**, v.56, 380-387, 2016.

FARRELL, M.J. The Measurement of Productive Efficiency. **Journal of Royal Statistical Society**, v.120, 253-290, 1957

FLOWERS, M. E.; SMITH, M. K.; PARSEKIAN, A. W.; BOYUK, D. S.; MCGRATH, J. K.; YATES, L. Climate Impacts on the cost of solar energy. **Energy policy**, v.94, 264–273, 2016.

FUSS, S.; SZOLGAYOVA, J.; OBERSTEINER, M.; GUSTI, M. Investment under market and climate policy uncertainty. **Applied Energy**, v.85,n.8, 708–721, 2008.

GAUDARD, L.; ROMERIO, F. The future of hydropower in Europe: Interconnecting climate, markets and policies. **Environmental Science & Policy**, v.37, 172-181, 2014.

GITIZADEH, M.; KAJI, M.; AGHAEI, J. Risk based multiobjective generation expansion planning considering renewable energy sources. **Energy**, v.50, 74–82, 2013.

GÓMES, A.; DOPAZO, C.; FUEYO, N. The “cost of not doing” energy planning: The Spanish energy bubble. **Energy**, v.101, 434–446, 2016.

GOMES, J. H. F. **Método dos polinômios canônicos de misturas para otimização multi-objetivo**. Tese (doutorado em Ciências em Engenharia de Produção) – Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal de Itajubá, 2013, 148p.

GÓMEZ, M. F.; SILVEIRA, S. A potential pathway for universal electricity access. **Energy Policy**, v.82, 23–37, 2015.

GONZÁLEZ, M. O. A.; GONÇALVES, J. S.; VASCONCELOS, R. M. Sustainable development: Case study in the implementation of renewable energy in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.142, 461–475, 2017.

GRABL, H., J. KOKOTT, M. KULESSA, J. LUTHER, F. NUSCHELER, R. SAUERBORN, H.-J. SCHELLNHUBER, R. SCHUBERT, SCHULZE, E.-D. Climate protection strategies for the 21st century: Kyoto and beyond. Report prepared by the German Advisory Council on Global Change, Berlin, 2003.

HERNANDEZ, R. R.; EASTER, S.B.; MURPHY-MARISCAL, M. M.; MAESTRE, F. T.; TAVASSOLI, M.; ALLEN, E.B.; BARROWS, C. W.; BELNAP, J.; OCHOA-HUESO, R.; RAVI, S.; HU, Y.; MONROY, C. R. Chinese energy and climate policies after Durban: Save the Kyoto Protocol. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** V.16, 3243-3250, 2012.

IEA. Mapping the energy future: energy modeling and climate change policy. Paris: International Energy Agency, 1998

IHS. **Top Solar Power Industry Trends for 2015**. 2015.

- IRENA – International Renewable Energy Agency. **Renewable Power Generation Costs in 2014**, 2015.
- IZADBAKHSH, M.; GANDOMKAR, M.; REZVANI, A.; AHMADI, A. Short-term resource scheduling of a renewable energy based micro grid. **Renewable Energy**, v.75, 598-606, 2015.
- JUÁREZ, A.A.; ARAÚJO, A.M.; ROHATGI, J.S.; FILHO, O.D.Q.O. Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v.39, p.828-834, 2014.
- KAGIANNAS, A. G.; ASKOUNIS, D. T; PSARRAS, j. Power generation planning: A survey from monopoly to competition. International. **Journal of Electrical Power & Energy Systems.**, v. 26(6), 413-421, 2004.
- KANN, A.; WEYANT, J. P. Approach for performing uncertainty analysis in large-scale energy/economic policy models. **Environmental Modeling and Assessment**, v.5, 29–46, 2000.
- KAPOOR, K.; PANDEY, K. K.; JAIN, A.; NANDAN, A. Evolution of solar energy in India: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.40, 475–487, 2014.
- KHATIB, T.; MOHAMED, A.; SOPIAN, K.; MAHMOUD, M. Optimal sizing of building integrated hybrid PV/diesel generator system for zero load rejection for Malaysia. **Energy and Buildings**, v.43, 3430-3435, 2011.
- KOLHE, M.; KOLHE, S.; JOSHI, J. C. Economic viability of stand-alone solar photovoltaic system in comparison with diesel-powered system for India. **Energy Economics**, v.24, 155-165, 2002.
- KRUKANONT, P.; TEZUKA, T. mplications of capacity expansion under uncertainty and value of information: The near-term energy planning of Japan. **Energy**, v.32, 1809–1824, 2007.
- KUSHARY, D.; DAVISON, A. C.; HINKLEY, D. V. **Bootstrap Methods and Their Application**. Edinburgh Building: Cambridge University Press, 2000.
- LAU, L. C.; LEE, K. T.; MOHAMED, A.R. Global warming mitigation and renewable energy policy development from the Kyoto Protocol to the Copenhagen Accord—A comment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V.16, 5280-5284, 2012.
- LEE, D-H. Levelized cost of energy and financial evaluation for biobutanol, algal biodiesel and biohydrogen during commercial development. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.41, 21583-21599, 2016.
- LIMA, F.; FERREIRA, F.; VIEIRA, F. Strategic Impact management of wind power projects. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v.25, 277-290, 2013.
- LIN, T. T.; KO, C.; YEH, H. Applying real option in investment decisions relating to environmental pollution. **Energy Policy**, v.35, 2426-2432, 2007.
- LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; DUTRA, R. M. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v.35, 904-912, 2010.
- LUTHRA, S.; KUMAR, S.; GARG, D.; HALEEM, A. Barriers to renewable/sustainable energy technologies adoption: Indian perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**.v.41,762–776, 2015.

- LUTHRA, S.; GOVINDAN, K.; KHARB, R. K.; MANGLA, S. K. Evaluating the enablers in solar power developments in the current scenario using fuzzy DEMATEL: An Indian perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.63, 379–397, 2016.
- MALAGUETA, D.; SZKLO, A.; BORBA, B. S. M. C.; SORIA, R.; ARAGÃO, R.; SCHAEFFER, R.; DUTRA, R. Assessing incentive policies for integrating centralized solar power generation in the Brazilian electric power system. **Energy policy**, v.59, 198–212, 2013.
- MALHEIRO, A.; CASTRO, M. P.; LIMA, R. M.; ESTANQUEIRO, A. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery/ isolated systems. **Renewable Energy**, v.84, 664-657, 2015.
- MALLIKARJUN, S.; LEWIS, H. F. Energy technology allocation for distributed energy resources: A strategic technology-policy framework. **Energy**, v.72, 783-799, 2014.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; SILVA, S. A. B.; ABREU, S. L.; COLLE, S. Solar energy scenarios in Brazil, parte one: resource assessment. **Energy policy**, v.36, 2853–2864, 2008.
- MCEVOY, A.; MARKVART, T.; CASTANER, L. **Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications**. 2ed. Academic Press, 2012, 1268p.
- MENDONÇA, M. **Feed-in-Tariffs: Accelerating the deployment of renewable energy**. London: Future Council, 2007, 176p.
- MEZA, J. L. C.; YILDIRIM, M. B.; MASUD, A. S. . A model for the Multiperiod Multiobjective Power Generation Expansion Problem. **IEEE Transaction On Power Systems**, v.22 (2), 2007.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília, 1.ed. 2008.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Projeto Estratégias de Atendimento por Energia Elétrica a Comunidades Rurais no Âmbito do Programa Luz Para Todos**. Brasília. 2009.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Plano Decenal de Expansão da Energia 2022**. Rio de Janeiro. 2013.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Plano Decenal de Expansão da Energia 2024**. Rio de Janeiro. 2015.
- MOHAMMED, A.; PASUPULETI, J.; KHATIB, T.; ELMENREICH, W. A review of process and operational system control of hybrid photovoltaic/diesel generator systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.44, 436–446, 2015.
- MONTGOMERY, D. C.; **Design and Analysis of Experiments**. 8ed. New York: John Wiley & Sons, 2013, 665p.
- MORENO, R.; BARROSO, L. A.; RUDNICK, H.; MOCARQUER, S.; BEZERRA, B. Auction approaches of long-term contract to ensure generation investment in electricity markets: Lessons from the Brazilian and Chilean experiences. **Energy Policy**, v. 38, 5758-5769, 2010.
- MUSSELLI, M.; NOTTON, G.; LOUCHE, A. Design of hybrid-photovoltaic power generator, with optimization of energy management. **Solar Energy**, v.65, 143-157, 1999.

MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D. C.; **Response Surface Methodology**. New York: Willey, 2002.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Ocean Acidification: a national strategy to meet the challenges of a changing ocean**. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.

NAUTIYAL, H.; SINGAL, S.K.; VARUN, SHARMA, A. Small hydropower for sustainable energy development in India. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v.15, 2021-2027, 2011.

NAVES, F. L.; DE PAULA, T. I.; BALESTRASSI, P. P.; MOREIRA BRAGA, W. L. SAWHNEY, R. S.; DE PAIVA, A. P. Multivariate Normal Boundary Intersection based on rotated factor scores: A multiobjective optimization method for monthly orange treatment. **Journal of Cleaner Production**, v.143, 413-439, 2017.

OLIVEIRA, F.A.; DE PAIVA, A. P.; LIMA, J. W. M.; BALESTRASSI, P. P.; MENDES, R. R. A. M. Portfolio optimization using mixture design of experiments: scheduling trades within electricity markets. **Energy Economics**, v. 33, 24-32, 2011.

OLIVEIRA, F.A. **Estratégia de comercialização de energia elétrica através da otimização de portfólios de contratos utilizando projetos de experimentos de mistura**. Tese (doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal de Itajubá, 2009, 124p.

PAIVA, A. P., CAMPOS, P. H., FERREIRA, J. R., LOPES, L. G. D., PAIVA, E. J., & BALESTRASSI, P. P. A multivariate robust parameter design approach for optimization of AISI 52100 hardened steel turning with wiper mixed ceramic tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v.30, 152-163, 2012.

PARK, J-B.; PARK, Y-M.; WON, J-R.; LEE, K.Y. An improved genetic algorithm for generation expansion planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.15 (3), 916-922, 2000.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; PES, M. P.; DA CRUZ SEGUNDO, E. I.; LYRA, A. A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v.49, 107-110, 2013.

PEREIRA JUNIOR, A. O.; PEREIRA, A. S.; LA ROVERE, E. L.; BARATA, M. M. L. VILLAR, S. C.; PIRES, S. H. Perspectives for the expansion of new renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v.23, 49-59, 2013.

PEREIRA JUNIOR, A. O.; DA COSTA, R. C.; COSTA, C.V.; MARRECO, J.M.; LA ROVERE, E. L. Strategies to promote renewable energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v.15, 681-688, 2011.

PINDYCK, R.S. Optimal timing problems in environmental economics. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v.26, 1677–1697, 2002.

PINEDA, J. O. C. **A entropia segundo Claude Shannon: o desenvolvimento do conceito fundamental da teoria da informação**. 2006. 124 p. Dissertação (Mestrado em História da Ciência) – Programa de Estudos Pós Graduados em História da Ciência, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2006.

- PURVINS, A.; ZUBARYEVA, A.; LLORENTE, M.; TZIMAS, E.; MERCIER, A.; Challenges and options for a large wind power uptake by the European electricity system. **Applied Energy**, v.88, 1461-1469, 2011.
- QUEIROZ, A. R.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M., SILVA, B. C.; SCIANNI, L. A. Climate Change Impacts in the Energy Supply of the Brazilian Hydro-dominant Power System. **Renewable Energy**, 99: 379-389, 2016.
- REKIOUA, D.; BENSMAIL, S.; BETTAR, N. Development of hybrid photovoltaic-fuel cell system for stand-alone application. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.39, 1604-1611, 2014.
- REZZOUK, H.; MELLIT, A. Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic–diesel–battery hybrid energy system in the north of Algeria. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v.43, 1134-1150, 2015.
- RINGEL, M. Fostering the use of renewable energies in the European Union: the race between feed-in tariffs and green certificates. **Renewable Energy**, v.31, 1-17, 2006.
- ROCHA, L. C. S.; DE PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P.; SEVERINO, G.; JUNIOR, P.R. Entropy-based weighting for multiobjective optimization: an application on vertical Turning. **Mathematical Problems in Engineering**, v.2015, 11p, 2015a.
- ROCHA, L. C. S.; DE PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P.; SEVERINO, G.; JUNIOR, P.R. Entropy-based weighting applied to normal boundary intersection approach: the vertical turning of martensitic gray cast iron piston rings case. **Acta Scientiarum. Technology**, v.37, p361+, 2015b.
- SANTOS, H. L.; LEGEY, L. F. L. A model for long-term electricity expansion planning with endogenous environmental costs. **Electrical Power and Energy Systems**, v.51, 98-105, 2013.
- SAUER, K. J.; ROESSLER, T. HANSEN, C. W. Modeling the Irradiance and Temperature Dependence of Photovoltaic Modules in PVsyst. **IEE Journal of Photovoltaics**, v.5, 152-158, 2015.
- SCHMIDT, J.; CANCELLA, R.; PEREIRA JUNIOR, A.O. The effect of windpower on long-term variability of combined hydro-wind resources: The case of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.55, 131-141, 2016
- SEDDIGHI, A. H.; AHMADI-JAVID, A. Integrated multiperiod power generation and transmission expansion planning with sustainability aspects in a stochastic environment. **Energy**, v.86, 9–18, 2015a.
- SEDDIGHI, A. H.; AHMADI-JAVID, A. A sustainable risk-averse approach to power generation planning with disruption risk and social responsibility considerations. **Journal of Cleaner Production**, v.105, 116–133, 2015b.
- SHANNON, C. E. A. Mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, v.27, 379–423, 1948.
- SHARMA, A. A. Comprehensive study of solar power in India and world. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** V.15, 1767-1776, 2011.

- SHARPE, W. Capital asset prices: a theory of market equilibrium under conditions of risk. **The Journal of Finance**, v.19, n.3, p.425-442, 1964.
- SILVA, N.F; ROSA, L.P; FREITAS, M.A.V; PEREIRA, M.G. Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the Favorable environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.22, p. 686-697, 2013.
- SILVA, S. B.; SEVERINO, M. M.; OLIVEIRA, M.A.G. A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil. **Renewable Energy**, v.57, 384-389, 2013.
- SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q. The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** V.20, 133-141, 2013.
- SINGH, N.; MCFARLAND, E. W. Levelized cost of energy and sensitivity analysis for the hydrogen–bromine flow battery. **Journal of Power Sources**, v. 288, 187-198, 2015.
- SOLVASON, C.C.; CHEMMANGATTUVALAPPIL, N. G.; EIJACK, F. T.; EDEN, M. R. Efficient visual mixture design of experiments using property clustering techniques. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.48, 2245-2256, 2009.
- STIGKA, E. K.; PARAVANTIS, J. A.; MIHALAKAKOU, G. K. Social acceptance of renewable energy sources: a review of contingent valuation applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.32, 100-106, 2014.
- SUMATHI, V.; JAYAPRAGASH, R.; BAKSHI, A.; AKELLA, P. K. Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.74, 130-138, 2017.
- TAZVINGA, H. XIA, X.; ZHANG, J. Minimum cost solution of photovoltaic–diesel–battery hybrid power systems for remote consumers. **Solar Energy**, v.96, 292-299, 2013.
- TEKINER, H.; COIT, D. W.; FELDER, F. A. Multi-period multi-objective electricity generation expansion planning problem with Monte-Carlo simulation. **Electric Power Systems Research**, v.80, 1394-1405, 2010.
- TORRINI, F. C.; SOUZA, C. R.; OLIVEIRA, F. L. C.; PESSANHA, J. F. M. Long term electricity consumption forecast in Brazil: A fuzzy logic approach. **Socio-Economic Planning Sciences**. V.54, 18-27, 2016.
- TREPANI, K.; MILLAR, D. L. Floating photovoltaic arrays to power the mining industry: A case study for the McFaulds Lake (Ring on Fire). **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v.35, 898-905, 2016.
- UTYUZHNIKOV, S.V., FANTINI, P., e GUENOV, M.D. A method for generating a well-distributed Pareto set in nonlinear multiobjective optimization. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v.223, 820-841, 2009.
- VILLALVA, M.G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2ed. São Paulo: Érica, 2015. 224p.
- WACHSMANN, U., TOMALSQUIM, M.T.. Wind power in Brazil e transition using German experience. **Renewable Energy**, v.28, 1029 – 1038, 2003.

YANG, M.; BLYTH, W.; BRADLEY, R.; BUNN, D.; CLARKE, C.; WILSON, T. Evaluating the power investment options with uncertainty in climate policy. *Energy Economics*, v.30, n.4, 1933–1950, 2008.

ZHANG, M. M.; ZHOU, P.; ZHOU, D. Q. A real options model for renewable energy investment with application to solar photovoltaic power generation in China. *Energy Economics*, v.59, 213–226, 2016.

Apêndice A – Dimensionamento do sistema híbrido

Tabela A.1– Sistema 100% diesel

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	0	0	0	4630
Tuiué	0	0	0	823
Tapauá	0	0	0	6982
Vila de Belo Monte	0	0	0	265
Vila de Urucurituba	0	0	0	416
Sacambu	0	0	0	490
Parauá	0	0	0	441
Novo Céu	0	0	0	4466
Manaquiri	0	0	0	10617
Labrea	0	0	0	20005
Itupurú	0	0	0	215
Caviana	0	0	0	1053
Castanho I	0	0	0	15970
Castanho II	0	0	0	15970
Careiro da Várzea	0	0	0	4921
Campinas	0	0	0	707
Canutama	0	0	0	3774
Beruri	0	0	0	8498
Araras	0	0	0	331
Boca do Acre	0	0	0	19032

Tabela A.2 - Sistema Híbrido 80% diesel e 20% fotovoltaico

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	3018	3168	3201	3704
Tuiué	511	537	569	658
Tapauá	4141	4348	4827	5585
Vila de Belo Monte	148	155	183	212
Vila de Urucurituba	258	271	288	333
Sacambu	309	325	339	392
Parauá	286	300	305	353
Novo Céu	2874	3017	3088	3573
Manaquiri	6825	7167	7340	8493
Labrea	10943	11491	13831	16004
Itupurú	130	136	148	172
Caviana	646	678	728	842
Castanho I	10401	10921	11041	12776
Castanho II	10266	10780	11041	12776
Careiro da Várzea	3210	3371	3402	3937
Campinas	443	465	489	566
Canutama	2138	2245	2609	3019
Beruri	5151	5409	5875	6798
Araras	205	216	229	265
Boca do Acre	9637	10119	13159	15226

Tabela A.3 - Sistema Híbrido 60% diesel e 40% fotovoltaico

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	6035	6337	12804	2778
Tuiué	1022	1073	2276	494
Tapauá	8282	8696	19308	4189
Vila de Belo Monte	295	310	733	159
Vila de Urucurituba	516	542	1151	250
Sacambu	618	649	1355	294
Parauá	572	601	1219	265
Novo Céu	5747	6035	12352	2680
Manaquiri	13650	14333	29361	6370
Labrea	21887	22981	55325	12003
Itupurú	259	272	594	129
Caviana	1292	1356	2912	632
Castanho I	20801	21841	44165	9582
Castanho II	20532	21559	44165	9582
Careiro da Várzea	6420	6742	13610	2953
Campinas	885	929	1956	424
Canutama	4276	4489	10436	2264
Beruri	10302	10817	23501	5099
Araras	411	431	915	199
Boca do Acre	19273	20237	52635	11419

Tabela A.4 - Sistema Híbrido 40% diesel e 60% fotovoltaico

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	9052	9505	28808	1852
Tuiué	1533	1609	5121	329
Tapauá	12422	13044	43444	2793
Vila de Belo Monte	442	464	1649	106
Vila de Urucurituba	775	813	2590	166
Sacambu	927	973	3048	196
Parauá	858	901	2744	176
Novo Céu	8620	9052	27791	1787
Manaquiri	20475	21499	66063	4247
Labrea	32830	34471	124480	8002
Itupurú	389	408	1336	86
Caviana	1937	2034	6553	421
Castanho I	31202	32762	99372	6388
Castanho II	30799	32339	99372	6388
Careiro da Várzea	9631	10112	30622	1968
Campinas	1327	1394	4400	283
Canutama	6413	6734	23482	1509
Beruri	15453	16226	52877	3399
Araras	616	647	2059	132
Boca do Acre	28910	30355	118428	7613

Tabela A.5 - Sistema Híbrido 20% diesel e 80% fotovoltaico

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	12070	12673	51214	926
Tuiué	2044	2146	9104	165
Tapauá	16563	17391	77234	1396
Vila de Belo Monte	590	619	2931	53
Vila de Urucurituba	1033	1085	4604	83
Sacambu	1236	1298	5419	98
Parauá	1144	1201	4878	88
Novo Céu	11494	12069	49407	893
Manaquiri	27300	28665	117446	2123
Labrea	43773	45962	221299	4001
Itupurú	518	544	2375	43
Caviana	2583	2712	11650	211
Castanho I	41602	43682	176661	3194
Castanho II	41065	43118	176661	3194
Careiro da Várzea	12841	13483	54439	984
Campinas	1770	1858	7822	141
Canutama	8551	8979	41746	755
Beruri	20604	21634	94004	1700
Araras	822	863	3661	66
Boca do Acre	38546	40474	210539	3806

Tabela A.6 - Sistema 100% fotovoltaico

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	3772	3960	5001	3472
Tuiué	639	671	889	617
Tapauá	5176	5435	7542	5236
Vila de Belo Monte	184	194	286	199
Vila de Urucurituba	323	339	450	312
Sacambu	386	406	529	367
Parauá	358	376	476	331
Novo Céu	3592	3772	4825	3350
Manaquiri	8532	8958	11469	7963
Labrea	13679	14363	21611	15004
Itupurú	162	170	232	161
Caviana	807	848	1138	790
Castanho I	13001	13651	17252	11977
Castanho II	12833	13475	17252	11977
Careiro da Várzea	4013	4213	5316	3691
Campinas	553	581	764	530
Canutama	2672	2806	4077	2830
Beruri	6439	6761	9180	6373
Araras	257	270	357	248
Boca do Acre	12046	12648	20560	14274

Tabela A.7 - Sistema Híbrido 75% diesel e 25% fotovoltaico

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	15087	15842	80022	0
Tuiué	2555	2683	14225	0
Tapauá	20704	21739	120678	0
Vila de Belo Monte	737	774	4580	0
Vila de Urucurituba	1291	1355	7194	0
Sacambu	1545	1622	8468	0
Parauá	1430	1502	7621	0
Novo Céu	14368	15086	77198	0
Manaquiri	34125	35832	183509	0
Labrea	54716	57452	345779	0
Itupurú	648	680	3712	0
Caviana	3229	3390	18203	0
Castanho I	52003	54603	276033	0
Castanho II	51331	53898	276033	0
Careiro da Várzea	16051	16854	85061	0
Campinas	2212	2323	12223	0
Canutama	10689	11223	65227	0
Beruri	25755	27043	146880	0
Araras	1027	1079	5720	0
Boca do Acre	48183	50592	328968	0

Tabela A.8 - Sistema Híbrido 25% diesel e 75% fotovoltaico

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	11316	11881	45012	1157
Tuiué	1916	2012	8002	206
Tapauá	15528	16304	67881	1745
Vila de Belo Monte	553	581	2576	66
Vila de Urucurituba	968	1017	4046	104
Sacambu	1159	1217	4763	122
Parauá	1073	1126	4287	110
Novo Céu	10776	11314	43424	1117
Manaquiri	25594	26874	103224	2654
Labrea	41037	43089	194501	5001
Itupurú	486	510	2088	54
Caviana	2422	2543	10239	263
Castanho I	39002	40952	155269	3992
Castanho II	38499	40423	155269	3992
Careiro da Várzea	12038	12640	47847	1230
Campinas	1659	1742	6875	177
Canutama	8017	8417	36690	943
Beruri	19316	20282	82620	2124
Araras	771	809	3217	83
Boca do Acre	36137	37944	185044	4758

Tabela A.9 - Sistema Híbrido 50% diesel e 50% fotovoltaico

Região	Sistema Fotovoltaico (kW)	Inversores (kW)	Baterias (kWh)	Geradores a Diesel (kW)
Pauini	7544	7921	20006	2315
Tuiué	1277	1341	3556	411
Tapauá	10352	10870	30169	3491
Vila de Belo Monte	369	387	1145	132
Vila de Urucurituba	645	678	1798	208
Sacambu	772	811	2117	245
Parauá	715	751	1905	220
Novo Céu	7184	7543	19300	2233
Manaquiri	17063	17916	45877	5308
Labrea	27358	28726	86445	10002
Itupurú	324	340	928	107
Caviana	1614	1695	4551	527
Castanho I	26002	27302	69008	7985
Castanho II	25666	26949	69008	7985
Careiro da Várzea	8026	8427	21265	2461
Campinas	1106	1162	3056	354
Canutama	5345	5612	16307	1887
Beruri	12878	13522	36720	4249
Araras	514	539	1430	165
Boca do Acre	24092	25296	82242	9516

Apêndice B – Matriz Experimental por Região

Tabela B.1 - Matriz experimental - Pauini

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.492,29	16.268,58
2	0,8	0,2	1.910,32	9.790,98
3	0,6	0,4	1.863,09	11.213,72
4	0,4	0,6	2.553,39	5.835,1
5	0,2	0,8	3.020,41	3.095,13
6	0,0	1,0	3.736,57	0
7	0,5	0,5	1.919,16	6.851,86
8	0,75	0,25	1.679,89	14.452,79
9	0,25	0,75	2.978,8	3.381,57

Tabela B.2 - Matriz experimental - Tuiué

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.502,12	2.891,96
2	0,8	0,2	2.137,48	1.741,95
3	0,6	0,4	2.296,67	1.993,9
4	0,4	0,6	2.430,42	1.039,43
5	0,2	0,8	2.975,14	551,05
6	0,0	1,0	3.678,33	0
7	0,5	0,5	1.915,83	1.219,47
8	0,75	0,25	1.887,23	2.570,57
9	0,25	0,75	2.966,96	603,03

Tabela B.3 - Matriz experimental - Tapauá

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.416,02	24.531,32
2	0,8	0,2	1.727,47	14.763,51
3	0,6	0,4	2.014,14	16.908,31
4	0,4	0,6	2.230,94	8.797,78
5	0,2	0,8	2.884,72	4.665,8
6	0,0	1,0	3.626,05	0
7	0,5	0,5	2.118,22	10.331,88
8	0,75	0,25	1.895,91	21.794,35
9	0,25	0,75	2.829,78	5.098,32

Tabela B.4 - Matriz experimental - Vila de Belo Monte

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.834,89	933,9
2	0,8	0,2	2.261,33	561,5
3	0,6	0,4	2.231,56	642,04
4	0,4	0,6	2.262,79	336,1
5	0,2	0,8	2.778,62	178,18
6	0,0	1,0	3.556,7	0
7	0,5	0,5	2.074,8	394,79
8	0,75	0,25	2.080,87	830,81
9	0,25	0,75	2.952,05	196,2

Tabela B.5 – Matriz experimental – Vila de Urucurituba

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.632,61	1.465,07
2	0,8	0,2	1.688,61	880,12
3	0,6	0,4	1.962,17	1.008,92
4	0,4	0,6	2.321,79	525,94
5	0,2	0,8	2.966,77	280,48
6	0,0	1,0	3.677,48	0
7	0,5	0,5	2.002,12	617,05
8	0,75	0,25	1.929,41	1.299,68
9	0,25	0,75	3.070,78	305,84

Tabela B.6 - Matriz experimental – Sacambú

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.564,04	1.721,98
2	0,8	0,2	2.368,84	1.036,81
3	0,6	0,4	2.437,17	1.188,37
4	0,4	0,6	2.442,27	619,3
5	0,2	0,8	2.970,19	329,97
6	0,0	1,0	3.696,87	0
7	0,5	0,5	1.987,15	725,25
8	0,75	0,25	2.293,39	1.530,01
9	0,25	0,75	2.962,44	357,78

Tabela B.7 – Matriz experimental – Parauá

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.501,32	1.551,87
2	0,8	0,2	1.874,31	932,35
3	0,6	0,4	1.832,75	1.068,73
4	0,4	0,6	2.545,01	557,06
5	0,2	0,8	2.953,58	296,97
6	0,0	1,0	3.730,8	0
7	0,5	0,5	2.286,95	655,06
8	0,75	0,25	2.002,99	1.377,83
9	0,25	0,75	2.888,33	323,15

Tabela B.8 - Matriz experimental – Novo Céu

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.322,05	15.692,27
2	0,8	0,2	1.519,16	9.443,63
3	0,6	0,4	1.930,88	10.814,94
4	0,4	0,6	2.524,63	5.626,6
5	0,2	0,8	2.900,72	2.982,94
6	0,0	1,0	3.720,78	0
7	0,5	0,5	2.132,74	6.609,13
8	0,75	0,25	1.465,21	13.942,79
9	0,25	0,75	2.979,44	3.260,39

Tabela B.9 – Matriz experimental – Manaquiri

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.688,12	37.300,38
2	0,8	0,2	1.813,8	22.449,52
3	0,6	0,4	2.246,19	25.709,41
4	0,4	0,6	2.387,64	13.375,62
5	0,2	0,8	2.953,42	7.091,09
6	0,0	1,0	3.719,79	0
7	0,5	0,5	2.047,23	15.709,84
8	0,75	0,25	1.912,16	33.141,89
9	0,25	0,75	2.962,16	7.749,91

Tabela B.10 - Matriz experimental – Lábrea

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.358,33	70.285,39
2	0,8	0,2	1.408,61	42.297,87
3	0,6	0,4	1.667,51	48.439,93
4	0,4	0,6	2.079,15	25.201,43
5	0,2	0,8	2.721,31	13.360,56
6	0,0	1,0	3.539,28	0
7	0,5	0,5	1.771,18	29.603,64
8	0,75	0,25	1.637,43	62.450,54
9	0,25	0,75	2.760,26	14.605,38

Tabela B.11 – Matriz experimental – Itapurú

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	2.082,45	756,84
2	0,8	0,2	2.306,94	454,42
3	0,6	0,4	2.311,23	522,4
4	0,4	0,6	2.465,22	270,75
5	0,2	0,8	2.998,67	145,19
6	0,0	1,0	3.645,52	0
7	0,5	0,5	2.151,1	318,76
8	0,75	0,25	1.598,37	670,41
9	0,25	0,75	2.858,73	158,69

Tabela B.12 - Matriz experimental – Caviana

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.860,05	3.700,88
2	0,8	0,2	1.907,2	2.227,72
3	0,6	0,4	2.274,47	2.552,2
4	0,4	0,6	2.512,96	1.328,85
5	0,2	0,8	2.997,03	706,14
6	0,0	1,0	3.663,93	0
7	0,5	0,5	1.881,87	1.558,7
8	0,75	0,25	1.783,87	3.290,33
9	0,25	0,75	2.831,8	770,37

Tabela B.13 – Matriz experimental – Castanho I

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.680,23	56.106,8
2	0,8	0,2	1.730,28	33.765,69
3	0,6	0,4	1.884,94	38.669,79
4	0,4	0,6	2.195,18	20.119,44
5	0,2	0,8	2.887,35	10.667,99
6	0,0	1,0	3.735,62	0
7	0,5	0,5	1.800,13	23.632,03
8	0,75	0,25	1.692,42	49.852,68
9	0,25	0,75	2.882,27	11.659,49

Tabela B.14 - Matriz experimental – Castanho II

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.441,08	56.106,8
2	0,8	0,2	1.418,3	33.765,69
3	0,6	0,4	1.685,02	38.669,79
4	0,4	0,6	2.304,19	20.119,44
5	0,2	0,8	2.836,01	10.667,99
6	0,0	1,0	3.719,78	0
7	0,5	0,5	2.031,94	23.632,03
8	0,75	0,25	1.312,84	49.852,68
9	0,25	0,75	2.947,19	11.659,49

Tabela B.15 – Matriz experimental – Careiro da Várzea

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.676,90	17.292,74
2	0,8	0,2	1.710,91	10.407,32
3	0,6	0,4	1.951,82	11.919,56
4	0,4	0,6	2.228,27	6.202,33
5	0,2	0,8	2.919,63	3.289,82
6	0,0	1,0	3.737,64	0
7	0,5	0,5	2.033,16	7.284,67
8	0,75	0,25	1.768,7	15.365,86
9	0,25	0,75	3.013,77	3.595,08

Tabela B.16 - Matriz experimental – Campinas

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.518,55	2.485,77
2	0,8	0,2	1.790,86	1.496,46
3	0,6	0,4	1.881,15	1.714,76
4	0,4	0,6	2.586,56	893,16
5	0,2	0,8	2.876,28	475,16
6	0,0	1,0	3.687,56	0
7	0,5	0,5	2.143,58	1.046,93
8	0,75	0,25	1.939,70	2.208,64
9	0,25	0,75	3.065,53	516,47

Tabela B.17 – Matriz experimental – Canutama

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.454,38	13.258,58
2	0,8	0,2	1.999,88	7.981,12
3	0,6	0,4	2.170,38	9.140,06
4	0,4	0,6	2.289,76	4.755,22
5	0,2	0,8	2.804,3	2.520,98
6	0,0	1,0	3.575,95	0
7	0,5	0,5	1.882,93	5.585,59
8	0,75	0,25	1.918,1	11.783,51
9	0,25	0,75	2.734,62	2.755,46

Tabela B.18 - Matriz experimental – Beruri

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.696,25	29.856,97
2	0,8	0,2	1.700,68	17.967,98
3	0,6	0,4	2.079,42	20.577,1
4	0,4	0,6	2.331,35	10.705,47
5	0,2	0,8	2.935,43	5.675,51
6	0,0	1,0	3.650,68	0
7	0,5	0,5	2.007,42	12.574,89
8	0,75	0,25	1.747,5	26.528,32
9	0,25	0,75	2.953,01	6.203,39

Tabela B.19 – Matriz experimental – Araras

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.858,15	1.163,03
2	0,8	0,2	2.308,9	699,92
3	0,6	0,4	1.956,48	801,55
4	0,4	0,6	2.248,57	417,02
5	0,2	0,8	2.866,65	221,08
6	0,0	1,0	3.599,36	0
7	0,5	0,5	2.294,64	491,3
8	0,75	0,25	1.767,32	1.036,46
9	0,25	0,75	3.012,98	242,37

Tabela B.20 - Matriz experimental – Boca do Acre

	Variáveis decisão		Variáveis Resposta	
	Diesel (x_1)	PV (x_2)	LCOE (R\$/MWh)	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
1	1,0	0,0	1.248,71	66.865,72
2	0,8	0,2	1.633,57	40.239,91
3	0,6	0,4	1.719,41	46.083,13
4	0,4	0,6	2.355,41	23.975,28
5	0,2	0,8	2.684,83	12.710,51
6	0,0	1,0	3.462,61	0
7	0,5	0,5	2.084,68	28.161,91
8	0,75	0,25	1.356,69	59.411,1
9	0,25	0,75	2.688,24	13.892,71

Apêndice C – Fronteira de Pareto por Região

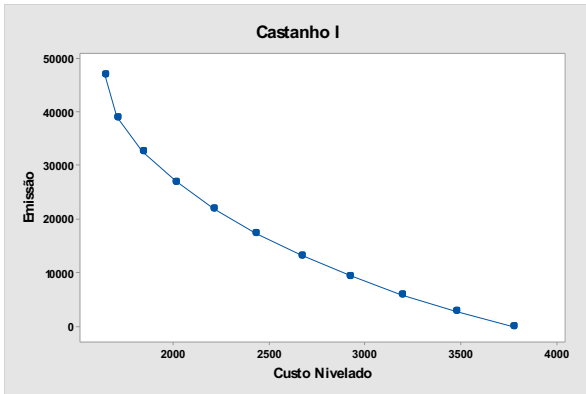


Figura C.1 - Fronteira de Pareto - Castanho I

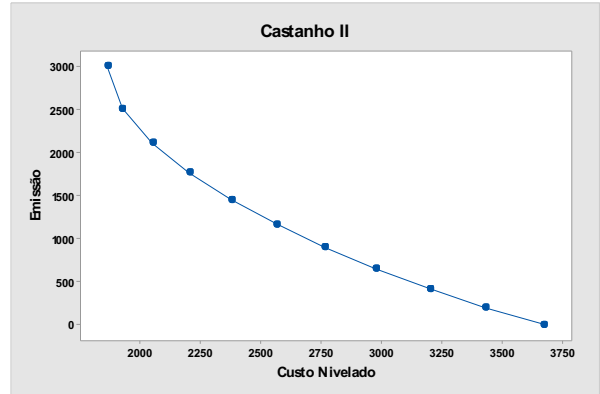


Figura C.2 - - Fronteira de Pareto - Castanho II

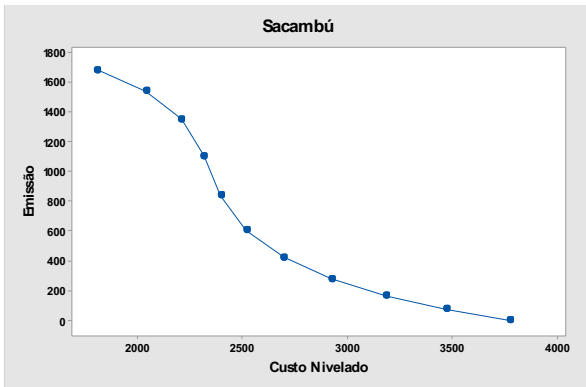


Figura C.3 - Fronteira de Pareto - Sacambú

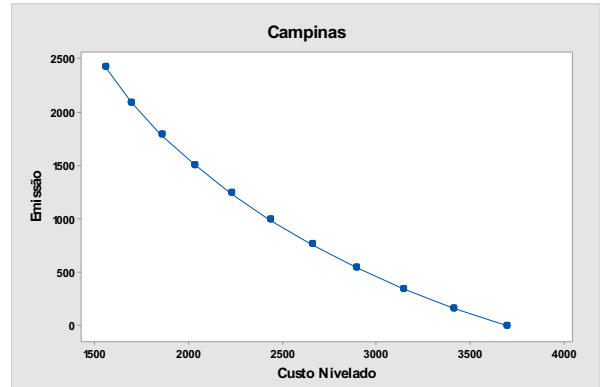


Figura C.4 - Fronteira de Pareto - Campinas

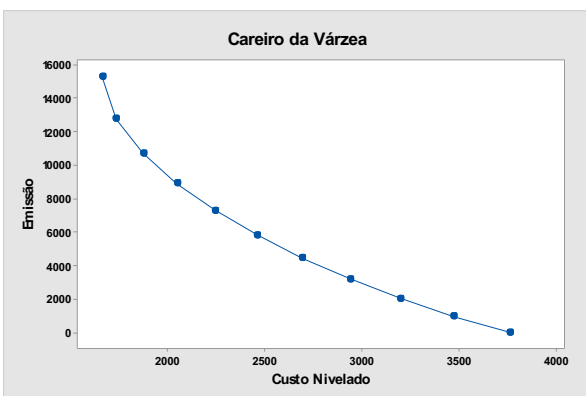


Figura C.5 - Fronteira de Pareto - Careiro da Várzea

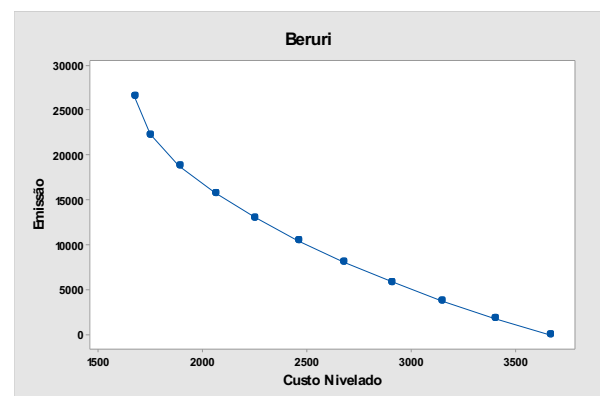


Figura C.6 - Fronteira de Pareto - Beruri

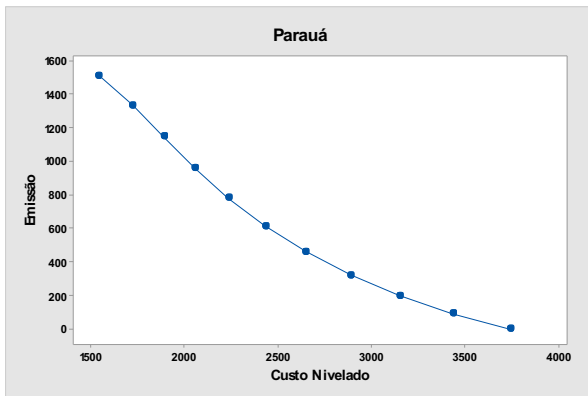


Figura C.7 - Fronteira de Pareto - Parauá

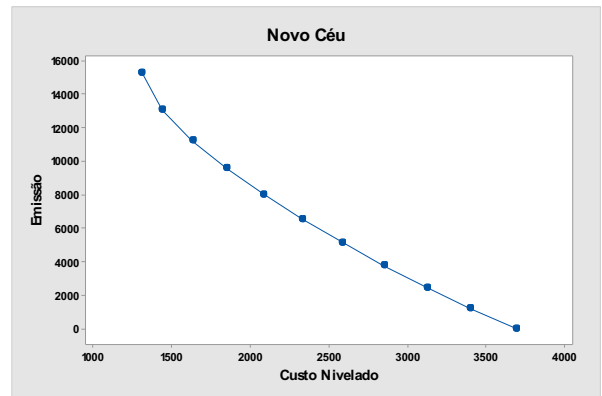


Figura C.8 - Fronteira de Pareto - Novo Céu

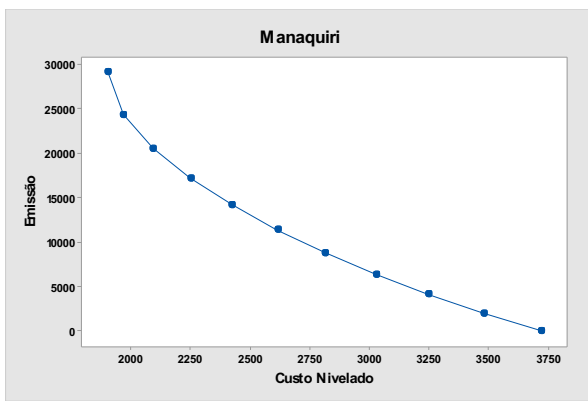


Figura C.9 - Fronteira de Pareto - Manaquiri

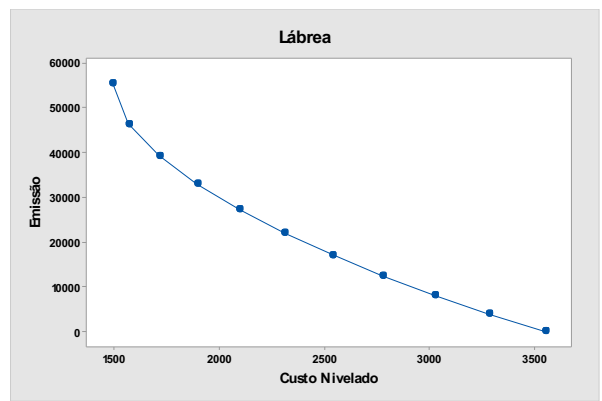


Figura C.10 - Fronteira de Pareto - Lábrea

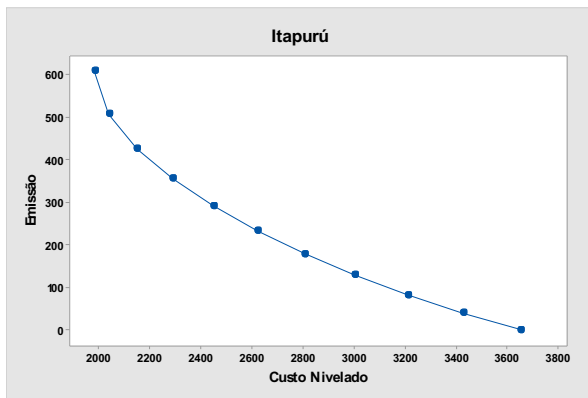


Figura C.11 - Fronteira de Pareto - Itapurú

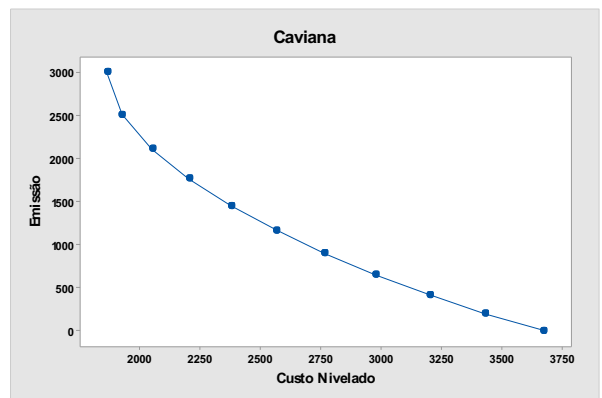


Figura C.12 - Fronteira de Pareto - Caviana

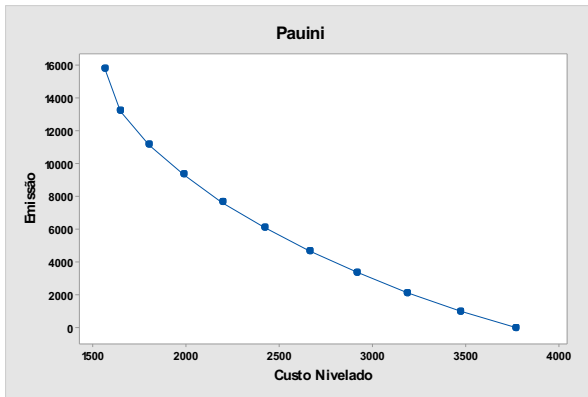


Figura C.13 - Fronteira de Pareto - Pauini

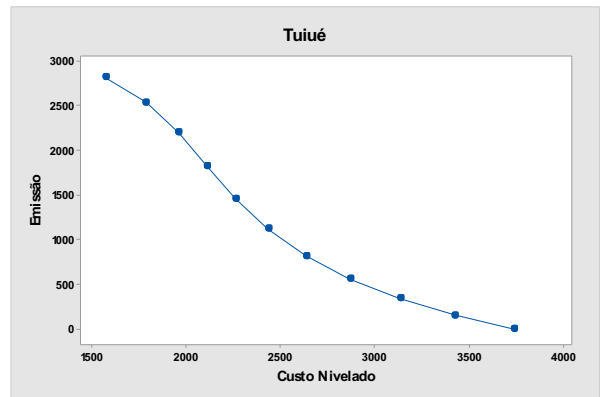


Figura C.14 - Fronteira de Pareto - Tuiú

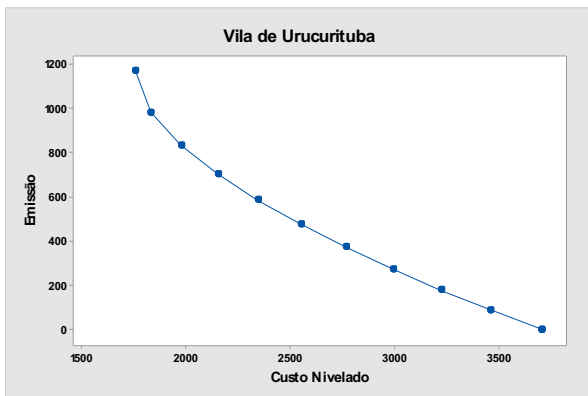


Figura C.15 - Fronteira de Pareto - Vila de Urucurituba

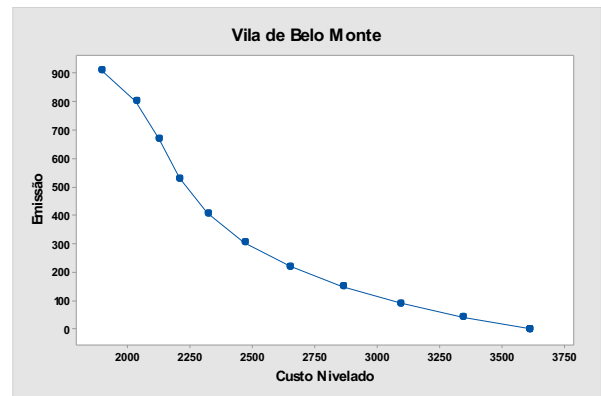


Figura C.16 - Fronteira de Pareto - Vila de Belo Monte

Apêndice D – Ranqueamento da Fronteira de Pareto

Figura D.1 - Ranqueamento - Beruri

Beruri			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	36%	64%	1,03
2	46%	54%	1,03
3	54%	46%	1,02
4	62%	38%	1,01
5	70%	30%	1,01
6	78%	22%	1,01
7	85%	15%	1,00
8	93%	7%	0,99
9	100%	0%	0,98
10	25%	75%	0,93
11	10%	90%	0,55

Figura D.2 - Ranqueamento - Campinas

Campinas			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	39%	61%	1,04
2	49%	51%	1,02
3	58%	42%	1,02
4	67%	33%	1,01
5	75%	25%	1,01
6	84%	16%	1,01
7	92%	8%	1,00
8	100%	0%	0,99
9	28%	72%	0,97
10	15%	85%	0,77
11	0%	100%	0,06

Figura D.3 - Ranqueamento – Carreiro da Várzea

Carreiro da Várzea			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	37%	63%	1,04
2	47%	53%	1,03
3	56%	44%	1,02
4	64%	36%	1,01
5	72%	28%	1,01
6	79%	21%	1,01
7	86%	14%	0,99
8	93%	7%	0,98
9	100%	0%	0,96
10	26%	74%	0,94
11	11%	89%	0,58

Figura D.4 - Ranqueamento – Castanho I

Castanho I			
Ranqueamento	X₁	X₂	Supereficiência
1	41%	59%	1,05
2	50%	50%	1,02
3	59%	41%	1,01
4	66%	34%	1,01
5	74%	26%	1,01
6	81%	19%	0,99
7	87%	13%	0,98
8	30%	70%	0,97
9	94%	6%	0,95
10	100%	0%	0,92
11	16%	84%	0,72

Figura D.5 - Ranqueamento – Castanho II

Castanho II			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	37%	63%	1,04
2	46%	54%	1,02
3	53%	47%	1,01
4	61%	39%	1,01
5	69%	31%	1,00
6	76%	24%	1,00
7	83%	17%	1,00
8	27%	73%	1,00
9	91%	9%	0,99
10	100%	0%	0,98
11	13%	87%	0,71

Figura D.6 - Ranqueamento – Caviana

Caviana			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	42%	58%	1,04
2	51%	49%	1,02
3	59%	41%	1,01
4	66%	34%	1,01
5	73%	27%	1,01
6	80%	20%	1,01
7	87%	13%	1,00
8	93%	7%	0,99
9	100%	0%	0,98
10	32%	68%	0,98
11	18%	82%	0,77

Figura D.7 - Ranqueamento – Itupuru

Itupurú			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	43%	57%	1,04
2	51%	49%	1,02
3	59%	41%	1,01
4	67%	33%	1,01
5	74%	26%	1,01
6	81%	19%	1,01
7	87%	13%	1,00
8	94%	6%	1,00
9	100%	0%	0,98
10	32%	68%	0,97
11	19%	81%	0,77

Figura D.8 - Ranqueamento – Lábrea

Lábrea			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	43%	57%	1,03
2	34%	66%	1,02
3	51%	49%	1,02
4	59%	41%	1,01
5	66%	34%	1,01
6	73%	27%	1,00
7	80%	20%	0,99
8	86%	14%	0,98
9	93%	7%	0,96
10	100%	0%	0,94
11	21%	79%	0,84

Figura D.9 - Ranqueamento – Manaquiri

Manaquiri			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	44%	56%	1,03
2	52%	48%	1,02
3	60%	40%	1,01
4	67%	33%	1,01
5	74%	26%	1,01
6	80%	20%	1,00
7	87%	13%	1,00
8	34%	66%	1,00
9	93%	7%	0,99
10	100%	0%	0,98
11	22%	78%	0,84

Figura D.10 - Ranqueamento – Novo Céu

Novo Céu			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	38%	62%	1,03
2	47%	53%	1,02
3	28%	72%	1,01
4	56%	44%	1,01
5	65%	35%	1,01
6	73%	27%	1,01
7	82%	18%	1,00
8	91%	9%	1,00
9	100%	0%	1,00
10	16%	84%	0,85
11	0%	100%	0,07

Figura D.11 - Ranqueamento – Parauá

Parauá			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	37%	63%	1,04
2	48%	52%	1,03
3	58%	42%	1,02
4	68%	32%	1,02
5	77%	23%	1,01
6	85%	15%	1,01
7	93%	7%	0,99
8	100%	0%	0,96
9	26%	74%	0,94
10	13%	87%	0,71
11	0%	100%	0,06

Figura D.12 - Ranqueamento – Pauini

Pauini			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	42%	58%	1,04
2	51%	49%	1,02
3	60%	40%	1,01
4	68%	32%	1,01
5	77%	23%	1,01
6	31%	69%	1,01
7	84%	16%	1,00
8	92%	8%	0,99
9	100%	0%	0,97
10	18%	82%	0,84
11	0%	100%	0,07

Figura D.13 - Ranqueamento – Sacambú

Sacambú			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	50%	50%	1,06
2	62%	38%	1,04
3	73%	27%	1,03
4	81%	19%	1,02
5	88%	12%	0,99
6	35%	65%	0,97
7	95%	5%	0,96
8	100%	0%	0,92
9	21%	79%	0,81
10	10%	90%	0,54
11	0%	100%	0,05

Figura D.14 - Ranqueamento – Tuiué

Tuiué			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	48%	52%	1,04
2	59%	41%	1,03
3	69%	31%	1,02
4	78%	22%	1,01
5	36%	64%	1,01
6	86%	14%	1,00
7	93%	7%	0,98
8	100%	0%	0,95
9	24%	76%	0,90
10	12%	88%	0,65
11	0%	100%	0,06

Figura D.15 - Ranqueamento – Vila de Belo Monte

Vila de Belo Monte			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	55%	45%	1,04
2	42%	58%	1,04
3	65%	35%	1,03
4	74%	26%	1,02
5	82%	18%	1,01
6	88%	12%	0,99
7	95%	5%	0,97
8	100%	0%	0,94
9	28%	72%	0,91
10	13%	87%	0,63
11	0%	100%	0,05

Figura D.16 - Ranqueamento – Vila de Urucurituba

Vila de Urucurituba			
Ranqueamento	X₁ (PV)	X₂ (Diesel)	Supereficiência
1	42%	58%	1,03
2	50%	50%	1,02
3	58%	42%	1,01
4	65%	35%	1,01
5	72%	28%	1,00
6	79%	21%	1,00
7	86%	14%	1,00
8	33%	67%	1,00
9	93%	7%	1,00
10	100%	0%	0,99
11	20%	80%	0,82