



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

PATRICK ROGER FÁVERO

**Projetos Híbridos Solar-Eólicos: uma
proposta metodológica de seleção, utilizando
Método AHP e Logica *Fuzzy***

NITERÓI, RJ

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

PATRICK ROGER FÁVERO

**Projetos Híbridos Solar-Eólicos: uma
proposta metodológica de seleção, utilizando
Método AHP e Logica *Fuzzy***

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Corpo Docente do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica e de
Telecomunicações (PPGEET) da
Universidade Federal Fluminense, como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica e de
Telecomunicações.

Orientador: Prof. D.Sc. Daniel Henrique Nogueira Dias

Coorientador: Prof. D.Sc. Nilson Brandalise

Niterói, RJ

Dezembro de 2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F273p Fávero, Patrick Roger
Projetos Híbridos Solar-Eólicos: uma proposta metodológica de seleção, utilizando Método AHP e Logica Fuzzy / Patrick Roger Fávero ; Daniel Henrique Nogueira Dias, orientador ; Nilson Brandalise, coorientador. Niterói, 2020.
141 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2020.m.13447423781>

1. Usinas Híbridas. 2. Tomada de Decisão. 3. Método AHP. 4. Lógica Fuzzy. 5. Produção intelectual. I. Dias, Daniel Henrique Nogueira, orientador. II. Brandalise, Nilson, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

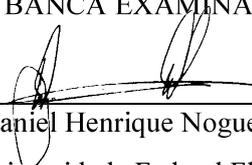
PATRICK ROGER FÁVERO

Projetos Híbridos Solar-Eólicos: uma proposta metodológica de seleção, utilizando Método AHP e Lógica *Fuzzy*

Dissertação de Mestrado apresentada ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET) da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Aprovada em 16 / 12 /2020

BANCA EXAMINADORA



Prof. D.Sc. Daniel Henrique Nogueira Dias (orientador)

UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. D.Sc. Nilson Brandalise (coorientador)

UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. D.Sc. Bruno Soares Moreira Cesar Borba

UFF – Universidade Federal Fluminense



Prof. D.Sc. Bruno Henriques Dias

UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora

Niterói, RJ

Dezembro de 2020

Dedico este trabalho aos meus pais e irmã, onde nos últimos anos, apesar da distância física, sempre estiveram próximos através dos laços do coração.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, base da educação, maiores ensinamentos e amor em minha vida. A distância física aumentou durante os últimos 10 anos, mas o amor sempre esteve aqui, dentro de mim.

Um agradecimento especial a Nina Hubner, amada companheira e alicerce emocional ao longo do trajeto de escrita desse trabalho. Obrigado pela paciência e leveza com que você se relaciona comigo. Quando há amor, há tudo.

Aos meus amigos, que apesar de minha ausência nos últimos meses, são compreensivos, torcem pelo meu sucesso e são peças fundamentais em minha vida. São vocês, através de risadas e carinho, que me recordam que a vida é mais do que a rotina a qual nos prendemos.

Aos meus colegas da EGP, agradeço pelas contribuições através de suas opiniões para pesquisa dos métodos desenvolvidos no trabalho e pela oportunidade de me apresentarem o tema dos projetos híbridos no Brasil. Em especial à Thiego Bello, a pessoa com quem mais tive oportunidade de aprender sobre energias renováveis nos últimos três anos de minha vida, e exemplo de profissional.

Ao meu orientador Daniel Nogueira, obrigado pelos ensinamentos difundidos desde a época da graduação até esse momento, e também por aceitar o desafio, me auxiliando ao longo dos últimos meses. A pandemia impactou em nosso trabalho presencial, mas acredito que alcançamos o objetivo.

Ao meu coorientador, Nilson Brandalise, que tive a oportunidade de conhecer e estreitar laços de forma virtual, e do qual a ajuda foi imprescindível para o desenvolvimento dos meus conhecimentos relacionados as metodologias AHP e Lógica *Fuzzy*, meu muito obrigado.

Agradeço também à Escola de Engenharia da UFF, e demais professores, meu local de estudo durante a Graduação e também no trajeto do Mestrado. Os bons momentos dentro dessa Universidade ultrapassam qualquer noite mal dormida devido aos estudos.

E não poderia de deixar de agradecer ao Tempo, mostrando a vida a ser vivida, através dos desafios, oportunidades e os bons ventos trazendo a felicidade.

RESUMO

FÁVERO, Patrick Roger. Título da dissertação: Projetos Híbridos Solar-Eólicos: uma proposta metodológica de seleção, utilizando Método AHP e Lógica *Fuzzy*. Niterói, 2020. Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET), Universidade Federal Fluminense.

No decorrer da última década, os estudos e implantações dos projetos renováveis de fontes solar e eólica cresceram vertiginosamente no mundo, e também no Brasil. Nesse cenário, onde estas tecnologias já não são mais novidade, mas sim realidade, os projetos híbridos de fontes solar fotovoltaica - eólica ganham espaço, se mostrando como oportunidade para projetos de maior eficiência e de maior competitividade nos Leilões de Energia ou no Mercado Livre, entre outros benefícios. Nos últimos dois anos, o tema dos projetos híbridos começou a ter maior atenção por parte das entidades do setor elétrico brasileiro, podendo citar a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) como uma das principais instituições que vem promovendo debates sobre esse tipo de tecnologia, com o objetivo de elaborar uma nova regulamentação que possa ser aplicada ao setor, possibilitando, então, que as usinas híbridas sejam implementadas no Brasil. Em termos de desenvolvimento tecnológico, as plantas híbridas já poderiam ser, no Brasil, uma possibilidade. Contudo, restam indefinições quanto às obrigações e regras a serem seguidas, e, ainda, por parte das empresas (*players*), processos a serem definidos, como a metodologia para escolha do local mais adequado para construção da usina híbrida. Em virtude disto, a empresa assume uma difícil e importante tarefa que pode ser enquadrada como um problema de tomada de decisão envolvendo múltiplos critérios. Através de consulta e coleta de opiniões de alguns especialistas que atuam no mercado de energias renováveis, foi possível desenvolver os modelos Método AHP, através do software *Super Decision*[®], e Lógica *Fuzzy*, com a utilização do MATLAB[®]. A partir dos resultados alcançados, *rankings* de atratividade para cinco projetos a serem hibridizados foram gerados, mostrando-se como possíveis metodologias no auxílio à tomada de decisão.

Palavras-chaves: Usinas Híbridas, Solar, Eólica, Tomada de Decisão, Método AHP, Lógica *Fuzzy*.

ABSTRACT

FÁVERO, Patrick Roger. Título da dissertação: Projetos Híbridos Solar-Eólicos: uma proposta metodológica de seleção, utilizando Método AHP e Lógica *Fuzzy*. Niterói, 2020. Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGEET), Universidade Federal Fluminense.

Over the last decade studies and implementations of renewable projects from solar and wind sources have increased expressively in the world and also in Brazil. In this scenario, where these technologies are no longer new, but a reality, hybrid projects of solar photovoltaic – wind sources are gaining space, presenting themselves as an opportunity for projects of greater efficiency and competitiveness in Energy Auctions or the Free Market, among other benefits. In the last two years the topic of hybrid projects has started to gain greater attention from Brazilian electric sector entities and mainly from EPE (Energy Research Company) as one of the institutions that has been promoting debates about this technology, with the aim of drawing up a new requirement that can be applied to the sector, therefore, enabling hybrid plants to be implemented in Brazil. However, it remains uncertain as to the obligations and rules to be followed, and still by the companies, processes to be defined, such as the methodology for choosing the most appropriate place for the construction of the hybrid plant. Due to this fact, the company takes over a common and important task that can be addressed as a decision-making problem involving multiple criteria. By means of consultation and collection of opinions of some specialists who work in the renewable energy market, it was possible to develop the AHP Method models, using the Super Decision[®] software, and Fuzzy Logic, using MATLAB[®]. From the results achieved, attractiveness rankings for five projects to be hybridized were generated, showing themselves as possible methodologies to aid decision-making

Keywords: Hybrid plants, Solar, Wind, Decision-Making, AHP Methodology, Fuzzy Logic.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- HISTÓRICO DOS CUSTOS E PROJEÇÕES PARA 2025 (ADAPTADO DE BLOOMBERGNEF, 2020).....	1
FIGURA 2- PROJEÇÃO DO CRESCIMENTO DAS RENOVÁVEIS ENTRE 2019-2024 (ADAPTADO DE IEA, 2020).....	8
FIGURA 3- CAPACIDADE INSTALADA EM GW ENTRE 2019 E 2029 (EPE, 2019).....	8
FIGURA 4- PROJEÇÃO GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEIS ENTRE 2018-2040 (ADAPTADO DE IEA,)	9
FIGURA 5- COMPARAÇÃO DO CUSTO DA GERAÇÃO ENTRE SOLAR E OUTRAS FONTES (LAZARD, 2019)	11
FIGURA 6- GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA MÉDIA HORÁRIA (ADAPTADO DE ONS, 2020)	12
FIGURA 7- GERAÇÃO EÓLICA MÉDIA HORÁRIA (ADAPTADO DE ONS, 2020)	12
FIGURA 8- PARTICIPAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA NA OPERAÇÃO DO SIN (ANEEL, 2020)	13
FIGURA 9- DISTRIBUIÇÃO DAS USINAS SOLARES E EÓLICAS NO BRASIL (SIGA, 2020)	13
FIGURA 10- STATUS REGULATÓRIO USINAS HÍBRIDAS NO BRASIL (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	19
FIGURA 11- TOPOLOGIAS (NT EPE, 2019).....	20
FIGURA 12- PERFIL PRODUÇÃO MENSAL ANO DE 2018 (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	24
FIGURA 13- FLUXO TOMADA DE DECISÃO (CHOO, 2003)	26
FIGURA 14- MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIOS (ADAPTADO DE ARAUJO, 2019).....	28
FIGURA 15- CLASSES HIERÁRQUICAS (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	30
FIGURA 16- PAIRWISE COMPARISON (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	31
FIGURA 17- PAIRWISE COMPARISON NORMALIZADA (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	31
FIGURA 18- CÁLCULO DO AUTOVETOR (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	32
FIGURA 19- CÁLCULO DO AUTOVETOR MÁXIMO (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	32
FIGURA 20- FLUXOGRAMA DO MÉTODO AHP (ADAPTADO DE EMROUZNEJAD, 2018)	34
FIGURA 21- CONCEITO BOOLEANO (A) CONJUNTO FUZZY (B) (BUENO, 2017)	36
FIGURA 22- REGIÃO DE FRONTEIRA DE UM CONJUNTO FUZZY (ADAPTADO DE SIVANANDAM, 2020)	45
FIGURA 23- TEMPERATURAS ENTRE O CONJUNTO $[T_1, T_2]$, ONDE (A) FUZZY; (B) CRISPS (ADAPTADO DE KLIR, 1995)	47
FIGURA 24- FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA TRIANGULARES (ADAPTADO DE ZHU ET AL., 1999).....	48
FIGURA 25- CONJUNTOS FUZZY E APLICAÇÃO DA ÁLGEBRA BOOLEANA (MILOSEVIC, 2012)	48
FIGURA 26- REPRESENTAÇÃO DE CONJUNTOS FUZZY: (A) CONJUNTO A E B; (B) UNIÃO; (C) INTERSEÇÃO; (D) COMPLEMENTO (SILVA, 2013).....	49
FIGURA 27- DIAGRAMA CONTROLADOR FUZZY (NIITYMÄKKIM, 1998).....	51
FIGURA 28- INFERÊNCIA FUZZY (GANGA, 2010)	53
FIGURA 29- ETAPAS DA METODOLOGIA (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	56
FIGURA 30- MENU INICIAL FUZZY LOGICAL TOOLBOX (MATLAB®, 2020)	58
FIGURA 31- VARIÁVEIS DO MODELO FUZZY (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	63
FIGURA 32- IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL MÉDIA (ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2017)	66
FIGURA 33- FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DO CRITÉRIO IRRADIAÇÃO SOLAR (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	67
FIGURA 34- ANÁLISE DAS MÉDIAS HORÁRIAS DE GERAÇÃO SOLAR, EÓLICA E COMPLEMENTARIDADE (ADAPTADO DE MRTS CONSULTORIA, 2020).....	68
FIGURA 35- CURVA DO RECURSO DO PROJETO A (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	70
FIGURA 36- CURVA DA COMPLEMENTARIDADE DO PROJETO A (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	70
FIGURA 37- CURVA DO RECURSO DO PROJETO B (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	71
FIGURA 38- CURVA DA COMPLEMENTARIDADE DO PROJETO B (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	71
FIGURA 39- CURVA DO RECURSO DO PROJETO C (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	72
FIGURA 40- CURVA DA COMPLEMENTARIDADE DO PROJETO C (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	72
FIGURA 41- CURVA DO RECURSO DO PROJETO D (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	73
FIGURA 42- CURVA DA COMPLEMENTARIDADE DO PROJETO D (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	73
FIGURA 43- CURVA DO RECURSO DO PROJETO E (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	74
FIGURA 44- CURVA DA COMPLEMENTARIDADE DO PROJETO E (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	74
FIGURA 45- FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DO CRITÉRIO COMPLEMENTARIDADE (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	76
FIGURA 46- FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DO CRITÉRIO ÁREA DO TERRENO (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	78
FIGURA 47- FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DO CRITÉRIO ÁREA DO TERRENO (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	80

FIGURA 48- INCLINAÇÃO DO TERRENO (GOOGLE EARTH, 2020).....	82
FIGURA 49- FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DO CRITÉRIO TOPOGRAFIA (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	83
FIGURA 50- FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DA VARIÁVEL DE SAÍDA (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	84
FIGURA 51- ESTRUTURA HIERÁRQUICA, SOFTWARE <i>SUPER DECISION</i> [®] (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	88
FIGURA 52- COMPARAÇÕES E JULGAMENTOS (SOFTWARE <i>SUPER DECISION</i> [®] , 2020).....	88
FIGURA 53- AJUSTE DO I.C., SOFTWARE <i>SUPER DECISION</i> [®] (AJUSTADO PELO AUTOR, 2020)	90
FIGURA 54- RESULTADO PROJETO A – LÓGICA <i>FUZZY</i> (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	124
FIGURA 55- RESULTADO PROJETO B – LÓGICA <i>FUZZY</i> (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	125
FIGURA 56- RESULTADO PROJETO C – LÓGICA <i>FUZZY</i> (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	126
FIGURA 57- RESULTADO PROJETO D – LÓGICA <i>FUZZY</i> (ELABORADO PELO AUTOR, 2020).....	127
FIGURA 58- RESULTADO PROJETO E – LÓGICA <i>FUZZY</i> (ELABORADO PELO AUTOR, 2020)	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ESCALA FUNDAMENTAL.....	31
TABELA 2: ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIA.....	33
TABELA 3: VARIÁVEL LINGUÍSTICA E RESPECTIVO NÚMERO <i>FUZZY</i>	38
TABELA 4: OPERAÇÕES ARITMÉTICAS.....	41
TABELA 5: OPERAÇÕES COM CONJUNTOS <i>CRISPS</i>	50
TABELA 6: OPERAÇÕES COM CONJUNTOS <i>CRISPS</i>	50
TABELA 7: CRITÉRIOS IMPORTANTES PARA PROJETOS HÍBRIDOS.....	59
TABELA 8: CRITÉRIOS PRIORITÁRIOS PARA ANÁLISE	63
TABELA 9: VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS E GRAUS DE PERTINÊNCIA CORRESPONDENTES	64
TABELA 10: VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS - CRITÉRIO IRRADIAÇÃO SOLAR	67
TABELA 11: VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS - CRITÉRIO COMPLEMENTARIDADE	76
TABELA 12: VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS - CRITÉRIO ÁREA DO TERRENO.....	78
TABELA 13: VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS - CRITÉRIO COMPRIMENTO DO CIRCUITO MT.....	80
TABELA 14: VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS - CRITÉRIO TOPOGRAFIA.....	83
TABELA 15: VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS – VARIÁVEL DE SAÍDA.....	84
TABELA 16: VARIÁVEIS DE ENTRADA	86
TABELA 17: RESULTADOS LÓGICA <i>FUZZY</i>	86
TABELA 18: CENÁRIOS AVALIADOS MÉTODO AHP	89
TABELA 19: CENÁRIOS AHP E PESOS.....	91
TABELA 20: PESOS PARA CADA ALTERNATIVA	91
TABELA 21: RESULTADOS NORMALIZADOS DE ATRATIVIDADE MÉTODO AHP	92
TABELA 22: RESULTADOS IDEALIZADOS DE ATRATIVIDADE MÉTODO AHP	92
TABELA 23: RESULTADOS DE ATRATIVIDADE	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL	Ambiente de Contratação Livre
ACR	Ambiente de Contratação Regulado
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
ARENA	Agência Australiana de Energias Renováveis
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
EGP	Enel Green Power
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAHP	<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i>
GHI	<i>Global Horizontal Irradiance</i>
IC	<i>Consistency Index</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MUST	Montante do Uso do Sistema de Transmissão
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
SIGA	Sistema de Informações de Geração
SIN	Sistema Interligado Nacional
TOPSIS	<i>Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution</i>
TUST	Tarifa do Uso do Sistema de Transmissão
VIKOR	<i>VikeKriterihumskaOptimizacija I KompromisnoResenje</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	FUNDAMENTAÇÃO	4
1.2.	OBJETIVOS	5
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2.	RENOVÁVEIS E HÍBRIDOS.....	7
2.1.	ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MUNDO E BRASIL	7
2.2.	SISTEMAS HÍBRIDOS	15
3.	CONCEITUAÇÃO TEÓRICA.....	26
3.1.	ANÁLISES MULTICRITÉRIO	26
3.1.1.	AHP – <i>Analytic Hierarchy Process</i>.....	29
3.1.2.	FAHP – <i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i>.....	36
4.	METODOLOGIA.....	56
4.1.	PROBLEMA PROPOSTO	56
4.2.	DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO	57
4.3.	LEVANTAMENTO DE DADOS.....	58
4.4.	DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM <i>FUZZY</i>	63
4.4.1.	Irradiação Solar	64
4.4.2.	Complementaridade.....	68
4.4.3.	Área do Terreno.....	77
4.4.4.	Comprimento Circuito MT.....	78
4.4.5.	Topografia	81
4.4.6.	Atratividade do Projeto	83
4.5.	REGRAS LÓGICAS	85
4.6.	RESULTADOS MÉTODO LÓGICA <i>FUZZY</i>	85
4.7.	DESENVOLVIMENTO MODELAGEM AHP	87
4.8.	RESULTADOS.....	92
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1.	TRABALHOS FUTUROS	96
	Apêndice 1 – Regras Lógicas.....	108
	Apêndice 2 – Resultados Lógica <i>Fuzzy</i> 432 regras.....	124
	Apêndice 3 – Tabela notas de julgamento método ahp	129

1. INTRODUÇÃO

Em todos os tipos de desenvolvimento, incluindo o econômico, percebe-se que a energia elétrica tem um papel muito importante (SUBRAHMANYAM et al., 2012). Nas últimas décadas as fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis tiveram uma penetração maior que as renováveis nas matrizes energéticas de, praticamente, todos os países. Entretanto, os efeitos combinados entre diminuição dos combustíveis fósseis e o aumento das exigências ambientais vêm incentivando a utilização de energias renováveis como recurso de energia no século XXI (CHEN; KANG; LEE, 2010). Como principais vantagens das energias renováveis, pode-se citar a ausência de emissão de poluentes nocivos na atmosfera nos momentos de produção de energia elétrica, e disponibilidade infinita, em tese, do recurso energético (SHARMA; MANTHIRAM, 2020)

Em 2018, foram cerca de 139,7 bilhões de dólares investidos em projetos solares no mundo, e 134,1 bilhões de dólares para projetos eólicos (REN21, 2019). A necessidade de redução de impactos ambientais serviu como guia para o aumento expressivo dos investimentos em fontes renováveis nos últimos anos, porém, a redução significativa dos custos dos projetos solares e eólicos constitui fator decisivo para este crescimento. Tais custos vêm diminuindo, como apresentado na Figura 1, de forma que essas tecnologias passaram a apresentar-se como competitivas, se comparadas às fontes de geração térmica em muitos mercados (HAEGAL et al., 2017).

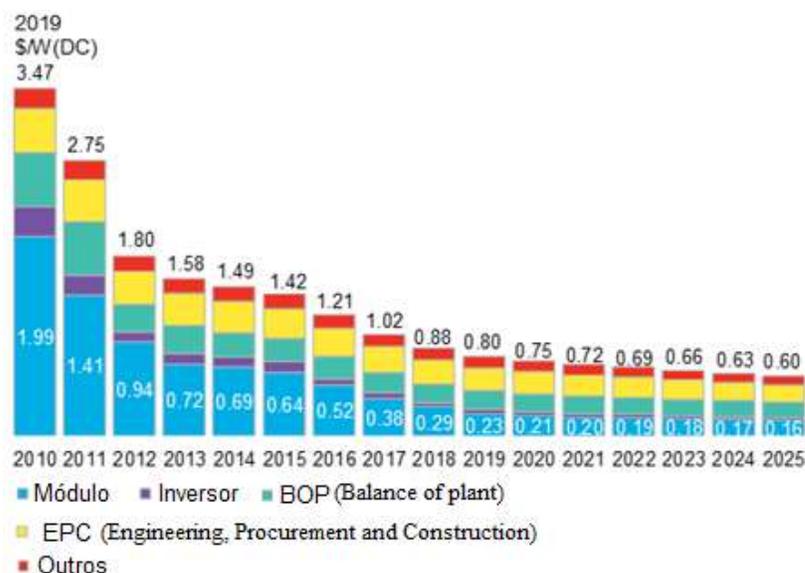


Figura 1- Histórico dos custos e projeções para 2025 (Adaptado de BloombergNEF, 2020)

No Brasil, segundo o SIGA (Sistema de Informações de Geração¹) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), até o final de 2019 as contribuições (parques em operação) das fontes solar e eólica eram de 1,48% e 9,06%, respectivamente, representando cerca de 2,9 GW em projetos solar fotovoltaicos e 15,8 GW em projetos eólicos. Estas foram as tecnologias que mais cresceram nos últimos anos, devido a alguns fatores, sobretudo:

- (i) Recurso energético relativo à estas fontes ser bem distribuído no território nacional;
- (ii) Forte evolução das tecnologias, proporcionando redução dos custos dos equipamentos;
- (iii) Leilões de energia para a modalidade, que, a partir de 2009, proporcionaram a expansão da fonte eólica, tendo ganhado representatividade no setor solar a partir de 2014, quando houve o primeiro leilão de energia específico para esse tipo de tecnologia; e
- (iv) Crescimento da Geração Distribuída regulamentada pela Resolução Normativa 482 de 2012 e impulsionada pela sua posterior alteração em 2015, através da RN 687.

Atualmente, além do Brasil possuir recursos naturais de qualidade para aplicação dos projetos eólicos e solares individualmente, frequentemente identificam-se regiões com potencial atrativo no que diz respeito à qualidade de vento e irradiação, simultaneamente, oferecendo assim oportunidades para a aplicação dos chamados projetos híbridos. Conforme exposto por Subrahmanyam et al. (2012), entende-se por projeto híbrido qualquer sistema de geração que incorpore duas ou mais fontes de energia, passando a ser referenciado como sistema híbrido de geração, e como apresentado por Barbosa et al. (2004), as fontes de energia mais utilizadas em um sistema híbrido é a solar e eólica, por seu caráter renovável.

Os sistemas híbridos não fazem parte de um conceito novo, embora tenham ganhado mais atenção nas últimas duas décadas (DIHRAB; SOPIAN, 2010). A existência, em alguns casos, de uma complementaridade de produção entre as fontes solar e eólica, a oportunidade de redução de alguns custos de investimento e operativos, como também a redução de impactos ambientais, impulsionaram estudos sobre esses sistemas com o objetivo de trazê-los à fase de construção e operação, aumentando sua inclusão na matriz energética. No entanto, há alguns

¹Portal eletrônico:

<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>

desafios a serem superados, cuja abordagem ainda carece de desenvolvimento, sendo um deles a respeito da seleção da melhor localização para instalação de um projeto híbrido.

Na China, conforme apresentado por WU et al. (2018), uma aproximação para determinar o local ótimo para instalação de projetos eólicos *offshore* é realizada com base no método de múltiplos critérios, em que critérios mais pertinentes, em relação aos projetos eólicos, são avaliados. Neste caso os critérios utilizados estiveram centrados na viabilidade econômica, impactos ambientais e performance do sistema. Ainda, AMY; HSING; KANG (2009) expõem uma análise similar, porém aplicada para sistemas eólicos *onshore*. Nessa esteira, este trabalho está dedicado a analisar, com base em critérios específicos e, através de métodos multicritérios, a melhor usina eólica a ser hibridizada a partir da instalação de uma usina solar.

Nos últimos anos, no Brasil, muito tem se discutido em relação à criação de uma regulamentação para usinas híbridas. Em paralelo, iniciam-se estudos com o objetivo de planejar o processo de implementação de usinas híbridas, que podem ser concebidas já como usinas híbridas ou hibridizadas, oriundas de um projeto existente. Um dos primeiros passos a ser analisado é a localização do empreendimento híbrido, uma vez que é o ponto de partida para a tomada de decisão de investimento nesse tipo de projeto.

De acordo com Lachtermacher (2007), a tomada de decisão é o processo de identificar um problema ou uma oportunidade e selecionar um procedimento de ações para resolvê-lo. Existem diversas ferramentas e técnicas que auxiliam no processo de tomada de decisão, tais como: (i) Matriz de decisão, (ii) Monte Carlo, (iii) Árvore de decisão, exemplos estes que consideram apenas fatores quantitativos. No entanto, existem também os fatores qualitativos, algumas vezes difíceis de serem tratados como números, porém de importância na tomada de decisão.

O método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e a Lógica Fuzzy são opções metodológicas para lidar com processos de tomada de decisão, principalmente nos casos onde existem regiões de incertezas e imprecisões. Este estudo utiliza as referidas metodologias como suporte ao processo decisório do melhor projeto eólico a ser hibridizado. Considerando-se que o investidor busca alocar seu capital no projeto que assinala prospectivamente um maior retorno econômico, nesse trabalho cria-se um *ranking* de atratividade de possíveis projetos eólicos a serem hibridizados com projeto solar fotovoltaico, auxiliando o investidor na decisão da seleção do melhor local a desenvolver o projeto híbrido.

1.1. FUNDAMENTAÇÃO

A crescente evolução das energias renováveis no contexto global trouxe maior penetração das mesmas nas matrizes energéticas de muitos países. Com a evolução tecnológica e redução dos custos dessas fontes, o mercado passou a buscar novas oportunidades, com o intuito de alcançar maior eficiência e, assim, maior rentabilidade. Nesse contexto, surgem novas oportunidades de negócios, nas quais os sistemas híbridos se mostram como uma solução ao requerido pelo mercado.

Contudo, além dos benefícios, o desenvolvimento de projetos híbridos traz, em paralelo, algumas dúvidas, principalmente no que diz respeito aos parâmetros relevantes que devem ser levados em consideração no momento de implementação de um projeto com essa característica. Em um ambiente de incerteza surgem perguntas relevantes, tais como:

- (i) Como lidar com as diferenças entre os dados medidos para o projeto eólico e solar?;
- (ii) Qual o melhor modelo estatístico para trabalhar com os dados de medição dos recursos de forma conjunta?;
- (iii) Qual a capacidade ótima do projeto solar e eólico híbrido?;
- (iv) Qual o local mais adequado para construção de um projeto solar a ser hibridizado ao projeto eólico, dentre algumas opções?

Considerando os questionamentos acima descritos, identifica-se espaço para investigações e aprofundamento nos estudos relativos aos projetos híbridos. Ainda, em virtude da importância do tema para o setor elétrico nacional, o desenvolvimento deste trabalho busca trazer esclarecimentos e propostas, sobretudo em relação ao item (iv) acima, detalhando então alguns dos principais critérios recomendados para que sejam levados em consideração no momento da tomada de decisão, para selecionar o local de construção da usina solar fotovoltaica a ser conectada junto à uma usina eólica. Uma vez que muitos dos critérios avaliados no processo de decisão da escolha do melhor local para desenvolver o projeto híbrido podem ser conflitantes, o método AHP e a lógica *fuzzy* se mostram como ferramentas potenciais para lidar com esse tipo de problema.

Desta forma, procura-se também contribuir com o avanço dessa tecnologia, e com isso o crescimento dos projetos com essas características, conectados às redes elétricas, principalmente no Brasil.

1.2. OBJETIVOS

A partir da apresentação do contexto dos sistemas híbridos no Brasil, tema que está sendo estudado pelos agentes do setor elétrico, e do qual se espera a publicação de uma nova regulamentação para o próximo ano, de acordo com a Consulta Pública, CP 061, aberta pela ANEEL no mês de Outubro/2020, o principal objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para ranquear projetos eólicos com potencial de hibridização, apoiada no Método AHP e na Lógica *fuzzy*, a ser aplicada por meio do software *Super Decision*[®] e *MATLAB*[®], respectivamente.

Esta aplicação tem o intuito de auxiliar empresas do setor elétrico no processo de planejamento e tomada de decisão a respeito dos melhores projetos eólicos à receberem a inserção de uma usina solar fotovoltaica, se tornando assim uma usina híbrida.

De acordo com Nunes (2006) o método AHP afiança o tomador de decisão por permitir uma maior compreensão de seu processo e sua participação na estruturação do problema, enquanto Zimmermann (1996) expõe que as modelagens por meio de números *fuzzy* tem se mostrado uma forma eficaz de formular problemas de decisão onde a informação disponível é subjetiva e imprecisa. Sendo assim, acredita-se que a aplicação de ambos os métodos possa contribuir para uma consistente abordagem do problema de tomada de decisão relacionado ao local de instalação da usina híbrida no estudo de caso apresentado neste trabalho.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de dissertação é dividido em 5 capítulos. Nesta introdução expomos a fundamentação e o objetivo geral do trabalho proposto. O Capítulo 2 traz informações atualizadas sobre a capacidade solar e eólica instalada no Brasil, redução dos custos dos principais equipamentos, valores da energia elétrica proveniente dessas fontes e os sistemas híbridos de energia de fonte solar e eólica. Ainda sobre os híbridos, o capítulo aborda o atual cenário regulatório a respeito dessa tecnologia, as principais oportunidades e, desafios que estão atualmente em debate pelos agentes do setor elétrico.

O Capítulo 3 apresenta uma análise de multicritérios para o processo de tomada de decisão, assim como alguns tipos de metodologias associadas a essa análise. Também nesse capítulo são expostos os conceitos referentes ao método AHP, metodologia *fuzzy*, e sua evolução até chegar nos sistemas de lógica *fuzzy*.

O Capítulo 4 descreve a metodologia do trabalho, apresentando o problema proposto, a pesquisa para coleta de dados, os principais critérios avaliados na análise e então a aplicação dos dois métodos como possível ferramenta para abordar o problema da tomada de decisão. No fim desse capítulo são apresentados os resultados.

Para finalizar, apresentamos as principais conclusões do trabalho, recomendações e propostas de trabalhos futuros.

2. RENOVÁVEIS E HÍBRIDOS

2.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MUNDO E BRASIL

Globalmente, o setor de geração de energia enfrenta dois grandes desafios atrelados a utilização dos combustíveis fósseis: altas emissões de gases que contribuem para o efeito estufa e natureza finita de tais combustíveis, levando a aumentos de pressões na perspectiva de longo prazo (BLECHINGER et al., 2016). As energias renováveis se mostram como solução alternativa para tais desafios. A energia solar é uma das mais prósperas para as próximas décadas, haja vista sua consistência, através da baixa vulnerabilidade a mudanças sazonais de acordo com os padrões climáticos (SOLANGI et al., 2011).

As fontes renováveis observaram rápido crescimento nos últimos anos, em função, principalmente, das políticas de incentivos, da redução dos custos de equipamentos, sobretudo do módulo fotovoltaico e da turbina eólica. Com isso, projetos renováveis vêm sendo implementados em grande escala ao redor do mundo, levando à estimativa de que a geração a carvão reduza 51%, em 2050, fornecendo apenas 12% da eletricidade mundial, dos atuais 27% (BLOOMBERG, 2019). Algumas empresas, como por exemplo a multinacional ENEL, deram início, nos últimos anos, à uma fase de transição entre a matriz a carvão e gás para as renováveis, descomissionando usinas convencionais não renováveis, em prol de um futuro mais descarbonizado.

A nível global, no ano de 2018, foram cerca de 443.554 GWh produzidos a partir de plantas solares e 1.127.319 GWh a partir de plantas eólicas (IEA, 2020). Segundo a Figura 2, é estimado que as renováveis tenham um aumento de 50% da capacidade instalada entre 2019-2024, aumento oriundo do crescimento da energia solar, que corresponde a aproximadamente 1.200 GW, praticamente, a capacidade total instalada nos Estados Unidos atualmente para essa tecnologia.

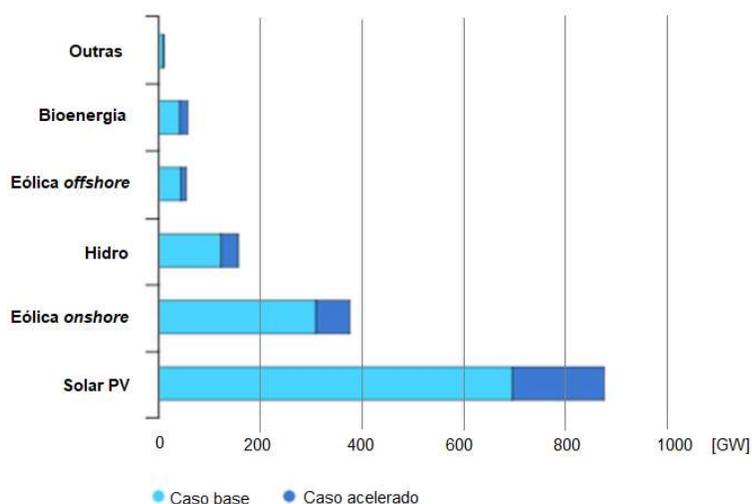


Figura 2- Projeção do crescimento das renováveis entre 2019-2024 (Adaptado de IEA, 2020)

A nível Brasil, conforme Figura 3, de acordo com as projeções da EPE divulgadas no Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (MME; EPE, 2019) a capacidade instalada da fonte eólica deve mais que dobrar no país, enquanto que para solar a projeção é de quintuplicar.

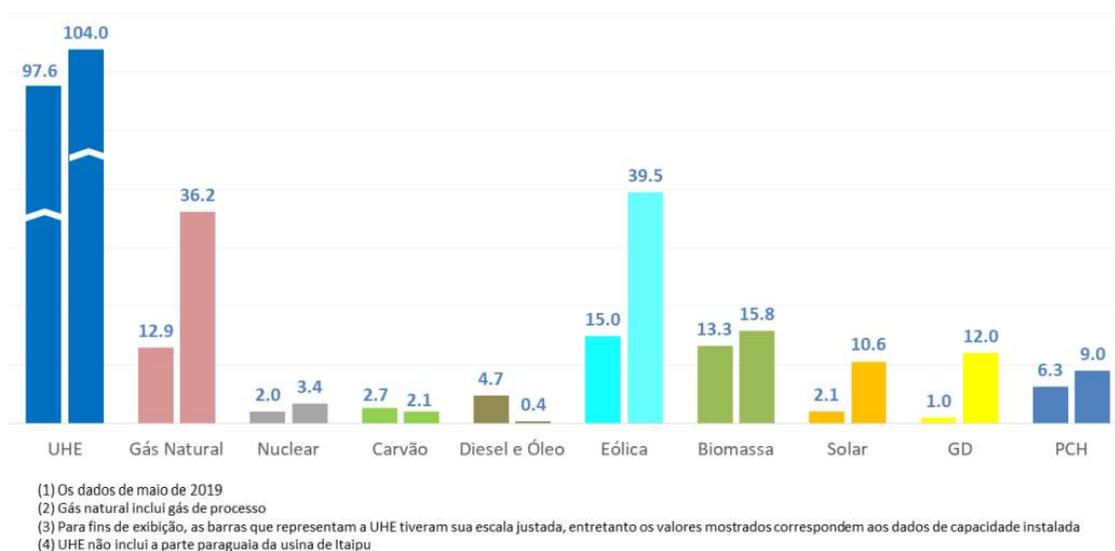


Figura 3- Capacidade Instalada em GW entre 2019 e 2029 (EPE, 2019)

Em termos de regiões no Globo e produção de energia, conforme apresentando na Figura 4, a Ásia é o continente que deve contribuir com maior participação de usinas renováveis para a geração de energia ao longo dos próximos 20 anos.

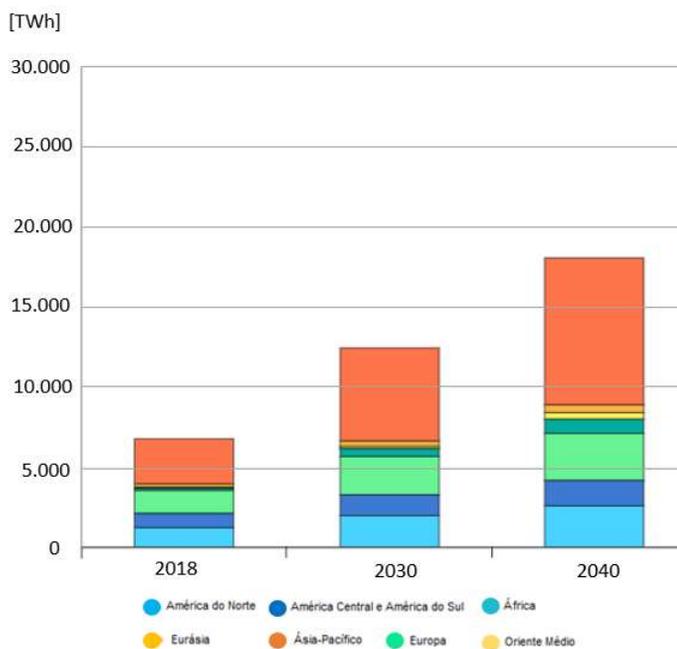


Figura 4- Projeção geração de energia renováveis entre 2018-2040 (Adaptado de IEA, 2020)

A rápida expansão dos projetos de energia renovável ao longo dos últimos anos é evidente, em 2009 a capacidade instalada global de renováveis era de aproximadamente 1.140 GW, 10 anos depois, em 2018, esse número aumentou para 2.360 GW (IRENA, 2020). Se em 2019 as renováveis representavam cerca de 26% da fonte de produção de energia elétrica no mundo, estudos estimam que em 2030 esse tipo de fonte energética pode corresponder a 57%.

Se no início o desenvolvimento dos projetos de energia renovável tinha como finalidade principal o combate ao aquecimento global e atingimento de metas de descarbonização, agora, a redução dos custos dessas fontes passaram a ser considerados como atrativos para a sua implementação, tornando os projetos cada vez mais competitivos. Nos Estados Unidos entre 2010 e 2019 o custo da energia elétrica oriundo de sistemas solares caiu 87%, enquanto para eólico a redução foi de 46% (IRENA, 2020).

No Brasil, no leilão de energia nova A-4 de Julho/2019 foram observados valores muito baixos na venda da energia elétrica dos sistemas solares e eólicos, atingindo cerca de R\$ 73,60 MWh para solar e R\$ 80,00 MWh do eólico. Ainda que os preços nos leilões de energia nova não reflitam o real custo das fontes energéticas, a estratégia de vender uma parcela da usina via leilão e a outra sendo viabilizada a partir de contratos bilaterais no mercado livre, acabam por

respaldar o empreendedor tornando possível a venda de energia elétrica a preços inferiores nos leilões.

Um mecanismo simples para se calcular o custo, a valor presente, da geração de uma determinada fonte é através do *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Segundo Silva (2017), o cálculo do LCOE serve como mecanismo de comparação entre diferentes tipos de fontes energéticas, podendo ser calculado conforme Eq.1 a seguir:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \left(\frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t} \right)}{\sum_{t=1}^n \left(\frac{E_t}{(1+r)^t} \right)} \quad (1)$$

Onde:

I_t : Investimento no ano t;

M_t : Custos com Operação e Manutenção no ano t;

F_t : Custos com combustível no ano t;

E_t : Energia Elétrica gerada no ano t;

r : taxa de desconto;

n : tempo de operação da usina

Os custos de energia estão vinculados a alguns parâmetros, dentre eles, o custo de implantação da usina elétrica que está produzindo determinada energia. A Figura 5 apresenta, a nível mundial, a redução dos custos de energia entre fontes diferentes ao longo dos últimos 10 anos, com expressiva redução no custo das renováveis, principalmente a solar.

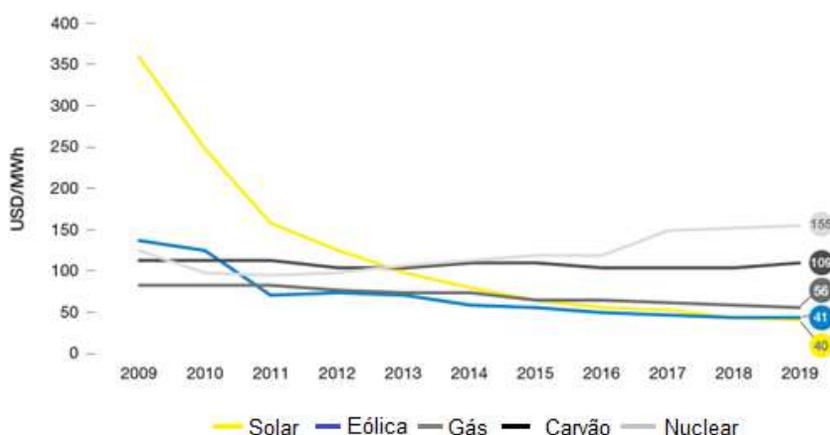


Figura 5- Comparação do custo da geração entre Solar e outras fontes (Lazard, 2019)

No cenário nacional, até Julho de 2020 as fontes solar e eólica, juntas, representavam 11% da capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN), com números em expansão, uma vez que até Outubro de 2020 há cerca de 3,3 GW de projetos eólicos em construção e 430 MW de projetos solares fotovoltaicos. Se em 2014 eram 5 usinas solares fotovoltaicas do tipo *utility scale*² em operação, o ano 2019 fechou com o número de 90 usinas de mesmas características, enquanto a eólica fechou o mesmo ano com 619 parques em operação no Brasil. No cenário internacional é expressivo o crescimento da energia eólica, posicionando-se em 8º lugar no *ranking* mundial, onde alguns anos antes, em 2015, ocupava a 15ª posição (ABE, 2019).

De acordo com as informações divulgadas no website do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em Junho de 2020 o Brasil já contava com uma geração de mais de 1.500 MWh de energia elétrica oriunda das usinas solares em operação no país, enquanto que referente as usinas eólicas o valor chegou próximo aos 8.000 MWh no mesmo período. A Figura 6 e Figura 7 apresentam a contribuição da geração média horária das usinas solares e eólicas no Brasil.

² *Utility Scale* é o termo utilizado no setor energético aludido as usinas solares de grande porte, com potência na ordem dos MW. Não há uma definição acerca da potência necessária para classificar uma usina na modalidade *Utility Scale*, mas normalmente referem-se as usinas localizadas longe da carga, e que injetam a energia gerada no sistema de transmissão, diferente das usinas fotovoltaicas definidas como Geração Distribuída, essas costumam possuir apenas algumas dezenas ou centenas de kW como potência, e são conectadas na rede de média ou baixa tensão.

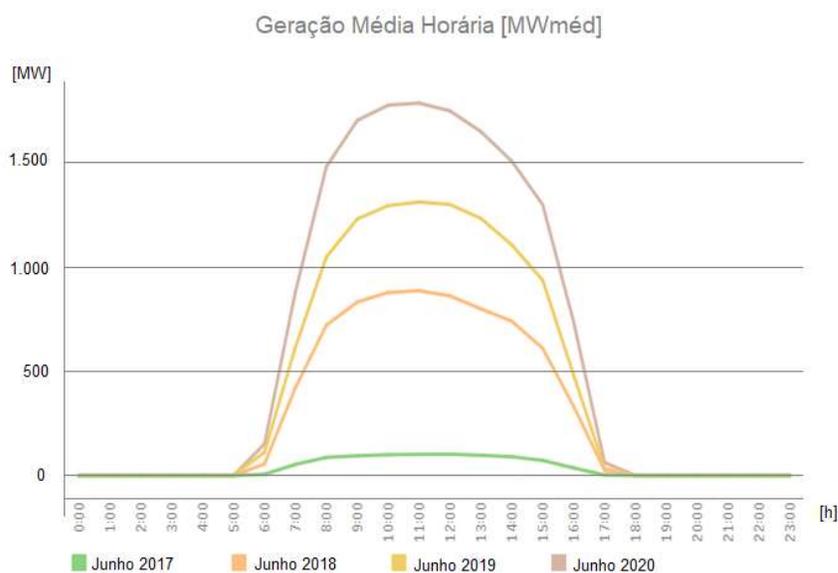


Figura 6- Geração solar fotovoltaica média horária (Adaptado de ONS, 2020)

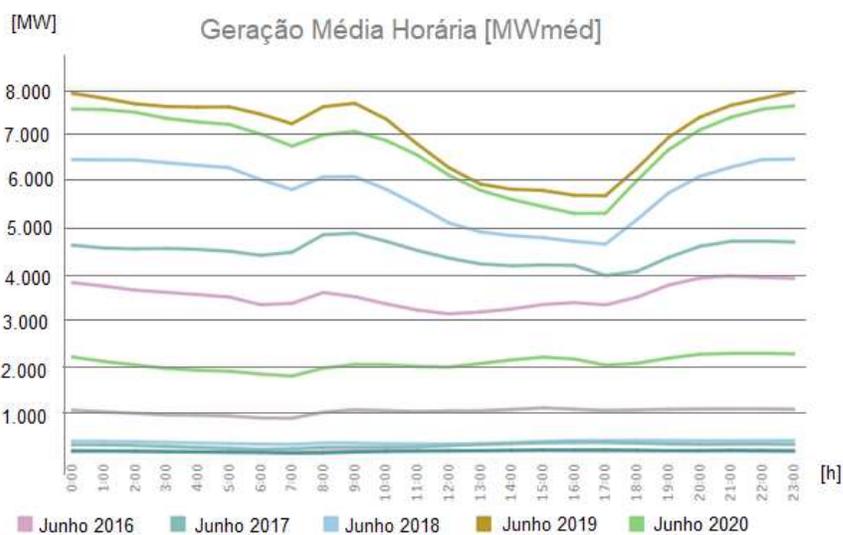


Figura 7- Geração eólica média horária (Adaptado de ONS, 2020)

A evolução da participação das fontes renováveis no Brasil fica evidente através da Figura 8, onde se percebe o aumento da contribuição destas fontes no horizonte de 2006 até 2020, principalmente da energia eólica.

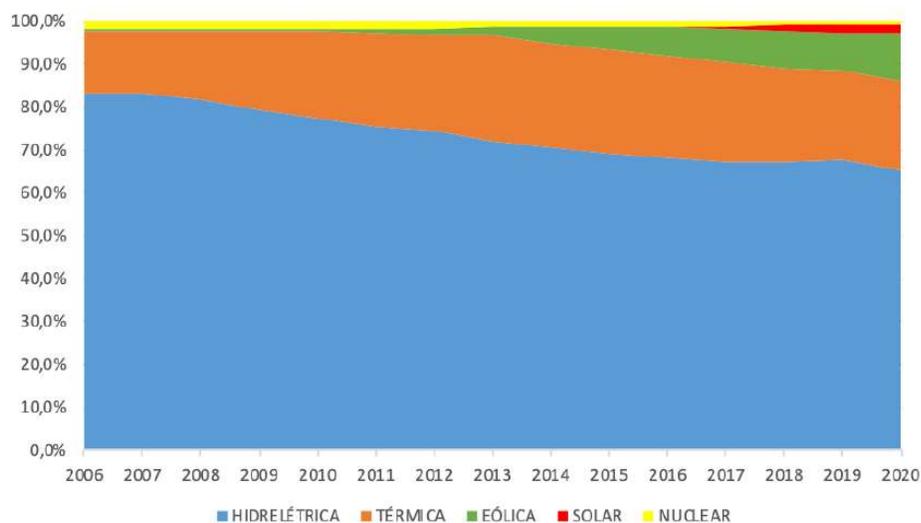


Figura 8- Participação das fontes de energia na operação do SIN (ANEEL, 2020)

Enquanto as usinas solares fotovoltaicas encontram-se distribuídas pelo Brasil, no caso das eólicas, é nítida uma maior concentração na região Nordeste, principalmente nos estados do Ceará e Bahia, conforme apresentado pela Figura 9, principalmente em função do potencial do recurso eólico da região.



Figura 9- Distribuição das usinas solares e eólicas no Brasil (SIGA, 2020)

O crescimento e maturidade dos projetos renováveis abre oportunidade também para o desenvolvimento de projetos híbridos, que embora ainda em fase inicial, possuem grande oportunidade de implantação, seja através da hibridização de um parque em operação, como também o desenvolvimento de projetos híbridos desde a fase inicial (projetos *greenfield*). Historicamente, a combinação de fontes energéticas distintas através da hibridização tem sido utilizada em sistemas elétricos de menor porte, como exemplo, os localizados em ilhas e regiões pouco povoadas e distantes do sistema elétrico principal (EPE, 2019), no entanto há muitos pontos atrativos quanto à hibridização de plantas renováveis a nível de *utility scale*, como será discutido nos próximos capítulos.

Em linhas gerais, a demanda de energia elétrica é considerada como variável, ou seja, não se pode determinar com exatidão qual será o consumo em um determinado instante. Por outro lado, a geração de energia elétrica foi, por muito tempo, considerada como despachável e prontamente disponível, visto que esta geração era fruto de fontes convencionais e controláveis, como as usinas termelétricas. Porém, esse mesmo conceito não pode ser aplicado as fontes de energia renováveis, essas com características de geração variável e de difícil previsão. O setor elétrico brasileiro vive um período de transição energética, de um sistema elétrico com alicerces em usinas hidrelétricas e apoiado pelos despachos das usinas térmicas, movendo-se para um sistema com o aumento da participação das fontes renováveis, principalmente solar e eólica, com características intermitentes.

Embora as fontes renováveis, ao longo dos últimos anos, tenham apresentado custos decrescentes, como mencionado anteriormente, há um fator que as penaliza: variabilidade de curto prazo na geração. Por serem fontes atreladas a recursos variáveis (regime dos ventos e irradiação solar) e menos controláveis, para que seja possível tirar máximo proveito de seus benefícios, preservando o equilíbrio energético do sistema, segundo abordado por Dikes et al. (2017), uma série de condições deve ser satisfeita: a demanda deve se adaptar à oferta, ou a oferta se adaptar à demanda, provendo assim atendimento da demanda. Independente do caso, sistemas intermitentes, como solar e eólico, dependerão de algumas mudanças para que possam operar de forma mais eficiente, confiável e viável economicamente.

Segundo Cavados (2015), alguns países já conduziram diversos estudos com objetivo de verificar a capacidade de fontes intermitentes que sua matriz energética pode absorver sem que haja impactos em termos energéticos ou econômico. Um exemplo é o estudo realizado pelo Laboratório Nacional de Energia Elétrica (NREL) nos Estados Unidos, onde foi identificado que o país tem capacidade de receber cerca de 20% de energia eólica em sua matriz até 2030.

Historicamente, o planejamento do sistema elétrico é desenvolvido com o objetivo de que a oferta de energia se adapte à demanda, o que requer confiabilidade e previsibilidade por parte da geração. Com o crescimento das fontes renováveis, passaram a ser necessários mecanismos de flexibilidade, como tecnologias de armazenamento, recurso de resposta à demanda e emprego de frotas de veículos elétricos para garantir a confiabilidade do sistema em um cenário de energia variável em expansão (JURASZ et al., 2020). Nesse aspecto, os sistemas híbridos de energia também oferecem vantagens, como abordado à frente, no item 2.2, visto que duas fontes de energia gerando em conjunto para uma mesma usina pode diminuir a variabilidade da energia injetada na rede.

2.2. SISTEMAS HÍBRIDOS

Conforme mencionado anteriormente, sistemas híbridos são aqueles que compartilham duas ou mais fontes de geração, onde a energia elétrica é indistinguível, ou seja, não se sabe qual das fontes foi a responsável por cada parcela do total de energia gerada.

Devido aos desafios, oportunidades e contribuições acerca do tema, nesse estudo o foco refere-se aos sistemas híbridos entre fontes de energia solar fotovoltaica e eólica, enquadrados como *utility scale*, ou seja, plantas de energia que são conectadas diretamente na rede de alta tensão. Embora os sistemas de armazenamento (*storage energy*) sejam constantemente associados aos sistemas híbridos, nesse trabalho o estudo é realizado sem levar em consideração a adição de sistemas de armazenamento. Entende-se que as baterias serão uma evolução dos projetos híbridos, com atratividade atrelada as reduções de seus custos.

No Brasil a ANEEL já iniciou a fase de debates sobre o tema, conforme Nota Técnica nº 094/2020-SRG/ANEEL (ANEEL, 2020) e Tomada de Subsídios ANEEL 011/2020, coletando contribuições dos agentes do setor para a elaboração das propostas de adequação regulatória necessária à inserção de sistemas de armazenamento no setor elétrico brasileiro. No entanto, entende-se que há outros desafios para serem analisados e discutidos a respeito do tema das usinas híbridas, por essa razão o tema de armazenamento de energia elétrica através de baterias não é o foco nesse estudo.

Segundo apresentado por Dykes (2016), historicamente várias usinas de geração do tipo híbrida, combinadas ou não com baterias, foram implantadas ao redor do mundo com o intuito de fornecer energia elétrica mais confiável para diversos tipos de aplicação. Porém, uma vez que os consumidores passaram a ter, com a expansão do sistema elétrico, uma possibilidade de conexão em redes com níveis de energia mais confiáveis, estáveis e de baixo custo, o interesse

por sistemas híbridos diminuiu, voltando a crescer, junto com o interesse por sistemas renováveis, durante a década de 1970, devido à crise do petróleo.

Embora o tópico dos sistemas híbridos ainda seja considerado novo no Brasil, e ainda em fase de debates no atual momento, em outros países os estudos e implantações estão em fases mais avançadas e desenvolvidas. Experiências internacionais demonstram que alguns países já possuem metas mais concretas relacionadas à penetração das usinas híbridas na matriz energética, e até mesmo possuem algumas usinas em fase de operação.

Na Índia, por exemplo, em 2018 foi lançado um leilão para contratação de energia apenas de fontes híbridas, assim como também ocorreu no ano seguinte, em 2019 (EPE, 2019). É um dos países pioneiros nos estudos de projetos híbridos para atendimento à demanda de energia elétrica do país, com metas agressivas para os próximos anos, onde pretende atingir, ao menos, 175 GW de energias renováveis até 2022. Um dos fatores que servem de impulso para os estudos e avanços dos projetos híbridos é alusivo à baixa disponibilidade de terras para construção de projetos solares e eólicos, como também para expansão do sistema de conexão (rede de alta tensão e média tensão).

Na Austrália, estudos realizados pela ARENA (Agência Australiana de Energias Renováveis) foram desenvolvidos com o objetivo de estimar os custos de projetos híbridos com fontes solar e eólica, onde foi identificado que esse tipo de tecnologia pode trazer uma economia de até 13% no que diz respeito à construção dos projetos. Atualmente o país conta com uma usina híbrida formada pelas usinas *Gullen Solar Park* (10MW) e *Gullen Range Wind Farm* (165MW) (EPE, 2019).

Nos Estados Unidos, um dos países pioneiros no tema, o primeiro sistema híbrido foi instalado como alternativa energética frente à crise de petróleo de 1973. Nesta mesma década outras duas usinas híbridas foram instaladas, uma de fonte eólica – diesel no Novo México, e outra a partir de fotovoltaico – diesel no Arizona. A respeito de usinas híbridas através da fonte solar – eólica, há o complexo formado por três projetos: *California Pacific Wind* (140MW), *Oasis Wind* (60MW) e *Catalina Solar* (143MWdc), que são beneficiados pela sinergia operacional que possuem (EPE, 2019).

Ainda, segundo EPE (2019), no Reino Unido desde 2016 um conjunto de 13,4 MW híbrido encontra-se em operação, onde constata-se complementaridades diárias da produção de energia elétrica. Já na China, maior produtor de energia renovável do mundo, em 2012 foi construído e segue operando um parque híbrido que, além do solar e eólico, ainda conta com a

utilização de baterias de 140MW de potência. No entanto, mesmo com avanços, esses países também enfrentam dificuldades, especialmente a nível comercial e regulatório.

Segundo estudo elaborado pela MRTS Consultoria (2019), a energia solar é uma fonte potencial de energia renovável, e geralmente possui uma correlação negativa com a fonte eólica, isso significa que, para muitos casos, os momentos ao longo do ano/dia de maior produção solar, são os momentos de menor produção eólica, e vice-versa. Dessa forma, uma usina híbrida é considerada mais eficiente, visto que ao agregar a contribuição de cada uma das gerações, a curva associada de geração apresenta um perfil menos variável.

De acordo com Yang et al.(2017), verificam-se diversos benefícios ao se trabalhar com projetos híbridos solar-eólico, como por exemplo:

- (i) Redução nos custos de investimentos (CAPEX³);
- (ii) Redução nos tempos de construção;
- (iii) Aumento do fator de capacidade da planta híbrida.

Ainda, observa-se redução de riscos ambientais, visto que a construção de uma usina solar próxima ao projeto eólico reduz, e em alguns casos até evita, a utilização de mais áreas que teriam impactos na fauna e flora. Estudos sugerem que a construção de uma usina solar próxima a uma usina eólica já em operação tem seu custo reduzido em cerca de 20%, devido ao compartilhamento de algumas infraestruturas entre ambas usinas (REZAEI et al., 2017).

No Brasil, entre as possíveis combinações de fontes energéticas para implementação de sistemas híbridos, há uma em específico que se mostra mais propícia para inserção em algumas regiões do país, devido à chamada complementaridade de energia. Nesse caso, trata-se dos sistemas híbridos constituídos por parques solar fotovoltaico e eólico. A complementaridade ocorre, em alguns casos, porque há uma correlação negativa entre a capacidade de geração das fontes mencionadas, ou seja, isso se dá em função dos momentos em que a velocidade do vento se mostra expressiva, que são justamente os momentos onde o nível de irradiação solar decresce.

Dessa forma, um sistema híbrido constituído por solar-eólico poderia, de forma otimizada, compartilhar a infraestrutura e capacidade de uso da rede. Para fins de exemplificação, considera-se um parque solar fotovoltaico de 200MWp com CAPEX atrelado

³ *Capital Expenditure*, é uma sigla que caracteriza o montante de dinheiro desembolsado para a compra de bens ou serviços. No caso das usinas fotovoltaicas o CAPEX representa o custo total para construção ou aquisição da usina.

à subestação e sistema de transmissão-conexão de aproximadamente USD 15MM⁴, então o valor de economia, *saving*, caso o projeto seja hibridizado é bastante expressivo.

Atualmente, não existe, no setor elétrico brasileiro, uma regulamentação que trate sobre usinas híbridas, porém, a complementaridade entre recursos de fontes renováveis e a associação dessas fontes, para gerar energia de forma integrada, vem sendo amplamente discutida no setor, dado que já se reconhece que a utilização da combinação de fontes pode resultar em melhor aproveitamento do sistema elétrico de transmissão e gerar benefícios econômicos para o empreendedor, e conseqüentemente, para o consumidor final (HEERDT, 2019).

O que se verifica no Brasil é a construção de projetos solares fotovoltaicos e eólicos muito próximos uns aos outros, compartilhando algumas instalações e, dessa forma, já usufruindo de alguns benefícios na ótica do CAPEX do projeto, que poderiam ser potencializados caso houvesse uma regulamentação que reconhecesse a existência de uma usina híbrida. No entanto, as usinas são tratadas de forma individual, segundo regulação específica para cada fonte.

Embora o conceito de usinas híbridas não seja novo, apenas em 2017 a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) emitiu a Nota Técnica EPE-DEE-NT-025/2017-r0 (EPE, 2017) avaliando as possíveis integrações entre fontes de energia. Dessa forma, pode-se dizer que os debates sobre o tema estão em fase inicial, contudo, ressalta-se o interesse público no fomento ao assunto no âmbito do mercado energético brasileiro. Desde então, outros documentos e notas técnicas foram editados e divulgados, como a NT-029/2019-r0 (EPE, 2019) onde questionamentos pertinentes ao tópico são abordados, como por exemplo, se as usinas híbridas podem aumentar a segurança do sistema, e se as usinas híbridas tornariam a geração menos variável, contribuindo para a confiabilidade da rede.

No final de 2019 foi emitida pela ANEEL (2019) a nota técnica NT-133/2019-SRG-SCG em que após um período de consulta pública, em Junho de 2019, 202 contribuições foram enviadas para a agência e, então, analisadas. Como fruto dessa Consulta Pública, esta nota técnica dividiu o estudo de usinas híbridas em seis diferentes categorias, que deverão ser considerados no âmbito da implementação da regulamentação, quais sejam: (i) tipos de arranjo; (ii) operação das usinas híbridas/associadas; (iii) outorga de geração; (iv) uso do sistema de transmissão e geração; (v) garantia física; e (vi) leilões de expansão específicos.

⁴ Através de análises de propostas recebidas pelo autor ao longo dos últimos anos, na média, para uma planta de ~200MWp pode-se considerar como número preliminares para o serviço de EPC da subestação e EPC da linha de AT, os respectivos custos 0,04 \$/Wp e 0,02 \$/Wp.

Em outro relatório emitido pela ANEEL (2020), foram abordados e analisados os principais impactos no âmbito regulatório que os sistemas híbridos podem trazer ao setor. Os objetivos específicos reportados neste relatório são: (i) facilitar as outorgas de centrais geradoras com mais de uma fonte de geração; (ii) estabelecer uma forma de contratação de uso por centrais geradoras híbridas ou associadas; (iii) possibilitar a comercialização da energia gerada por usinas híbridas ou associadas; e (iv) apresentar alternativas para a definição de garantia física de centrais geradoras com mais de uma fonte de geração.

A Figura 10 apresenta o status regulatório com relação ao tema das usinas híbridas no Brasil:

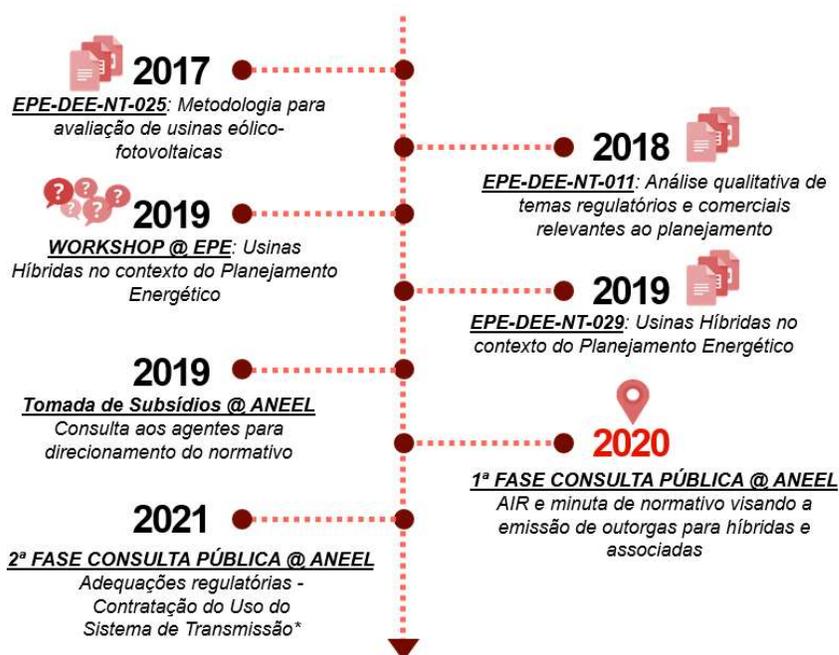


Figura 10- Status regulatório usinas Híbridas no Brasil (Elaborado pelo autor, 2020)

Segundo a proposta da EPE, existem quatro possíveis modelos de integração entre duas ou mais fontes de energia: Usinas Adjacentes, Usinas Associadas, Usinas Híbridas e Portfólios Comerciais, todas demonstradas abaixo conforme Figura 11:

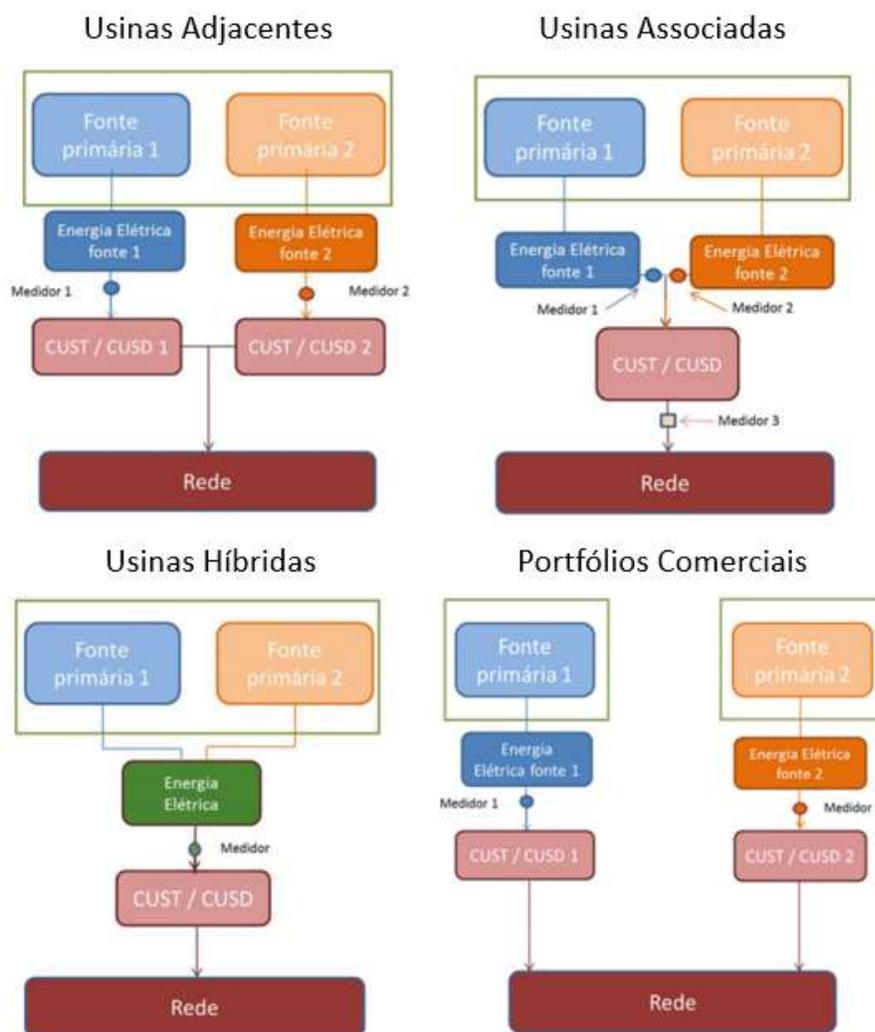


Figura 11- Topologias (NT EPE, 2019)

Nesse trabalho será dado foco às usinas híbridas classificadas como ‘Usinas Híbridas Associadas’, uma vez que são essas configurações que proporcionam a sinergia com relação ao montante contratado de energia na conexão ao sistema. Atualmente, Usinas Adjacentes já existem no Brasil, compartilhando o mesmo espaço territorial. No entanto, uma mudança de caracterização para Usinas Associadas ou Híbridas requer mudanças no âmbito regulatório atual.

Ressalta-se que, atualmente, a comercialização de energia elétrica para os parques eólicos e solares no Brasil pode ser realizado através de dois ambientes: (i) ACR -Ambiente de Contratação Regulado, onde a energia é vendida às distribuidoras de energia através de leilões centralizados de energia, específicos por tipo de fonte; e (ii) ACL – Ambiente de Contratação

Livre, onde os contratos de venda de energia são realizados com comercializadoras, consumidores livres e especiais, distribuidoras, importadores e exportadores. Contudo, o modelo de comercialização vigente enxerga apenas as gerações individualizadas dos parques, e com o advento dos parques híbridos o mesmo deverá ser readequado. No atual modelo regulatório cada projeto é tratado individualmente, seguindo regulamentação específica para cada fonte de geração de energia, e cada projeto tem seu contrato específico de conexão onde é necessário que se declare o respectivo MUST (Montante de Uso do Sistema de Transmissão).

Segundo a resolução normativa 666/2015 da ANEEL o valor do MUST é declarado pelo empreendedor, que representa o valor máximo da potência elétrica injetável no sistema, o qual deverá ter valor no mínimo igual à potência instalada subtraída da mínima carga própria. Dessa forma, a contratação do MUST pelas fontes de energia eólica e solar, em geral, é definida como a potência nominal do projeto, onde em casos de ultrapassagem de tal valor, penalidades financeiras são aplicadas conforme Eq.2 descrita nos submódulos 15.7 e 15.8 dos Procedimentos de Rede do ONS:

$$PI_{U-G} = 3 \times \sum_i [(P_{máxi} - 1,01 \times MUST_i) \times TUST_{ger}] \quad (2)$$

Onde:

PI_{U-G} : parcela de ineficiência por ultrapassagem a ser cobrada da central de geração, em R\$, quando seu valor for maior que zero;

$P_{máxi}$: potência elétrica máxima mensal medida no ponto de conexão i , em kW;

$MUST_i$: MUST contratado em caráter permanente no ponto de conexão i , em kW; e

$TUST_{ger}$: TUST do ciclo tarifário vigente estabelecida para a central de geração, em R\$/kW.mês.

A contratação do MUST é de análise central para o tema dos projetos híbridos, onde três pontos principais devem ser levados em consideração: (i) possibilidade de ultrapassagem do MUST contratado, devido a geração conjunta entre o solar-eólico (complementaridade); (ii) a otimização na definição do MUST contratado; (iii) impacto da ocorrência de penalidades decorrentes de eventuais ultrapassagens.

Ao introduzir o conceito de projetos Híbridos Associados, os projetos solares fotovoltaicos-eólico operam de forma integrada, com a contratação de um único MUST, de valor inferior à soma das potências instaladas dos dois projetos em conjunto. Ou seja, significa dizer que os dois projetos se tornam um único projeto com maior produção de energia, porém sem aumentar o pico de produção, mantendo o mesmo MUST contratado, aliviando assim a contratação do uso do sistema elétrico.

Em momentos em que se verifiquem picos de produção de energia de ambas as fontes, por exemplo, um dia com muito vento e forte radiação solar, o parque possivelmente deverá ter sua potência limitada, evitando assim momentos de ultrapassagem e, por consequência, pagamentos de penalidade.

Denomina-se como *curtailment* exatamente essa limitação da energia que ultrapassaria o valor do MUST contratado para o projeto. É um parâmetro importante na ótica dos projetos híbridos associados, pois um valor elevado na frequência em que o *curtailment* ocorre pode ser traduzido como um volume alto de energia elétrica que está sendo gerada, porém que não pode ser comercializada, ou seja, perda de receita para o empreendedor. Em outras palavras, o empreendedor possui uma usina que gera mais, mas não consegue injetar na rede, e consequentemente vender, 100% do que foi gerado.

Embora o empreendedor possa ter sua geração ultrapassando o valor do MUST contratado, não é recomendado, haja vista que estas ultrapassagens prejudicam o correto dimensionamento da rede, sobrecarregando o SIN. A reincidência de ultrapassagem poder até vir a gerar penalidades mais severas, como a perda do desconto do uso do fio atribuído as energias incentivadas.

Como forma de exemplificar o MUST contratado, *curtailment* e a complementaridade entre projetos com a fonte solar fotovoltaica e eólica conectados, considera-se como exemplo o projeto eólico pertencente a empresa Enel Green Power (EGP), com potência instalada de 79,9MWac, operando no estado de Pernambuco desde 2014, onde a venda de energia foi realizada através de um leilão de energia. O empreendimento é constituído basicamente pelos aerogeradores, subestação e uma linha de transmissão para se conectar à rede básica do sistema elétrico e então escoar a energia ao SIN.

Atualmente existe em uma área próxima ao parque eólico uma usina solar com 10 MWac de potência instalada, também em operação, que está conectada junto à subestação do parque eólico, compartilhando também a mesma linha de transmissão. Esses são os únicos pontos de vínculo entre os dois projetos, uma vez que são operados de forma separada, e seus

respectivos contratos de venda de energia são independentes, ou seja, cada um possui seu próprio modelo de contrato e preços de venda de energia distintos. Segundo regulação vigente até este momento, ambos os parques possuem contratos de conexão independentes, com um MUST associado, sendo esse o valor máximo da potência instalada de cada um dos projetos. Ou seja, atualmente o projeto eólico possui valor de MUST contratado referente a sua potência nominal, de 79,9 MWac, enquanto o projeto solar fotovoltaico também possui um MUST contrato referente a sua potência nominal de 10 MWac.

Através do levantamento de dados horários de geração de energia elétrica dos dois empreendimentos entre os anos de 2016, 2017, 2018 e 2019 foram traçadas as suas respectivas curvas de geração. Abaixo são apresentadas tais curvas de produção mensal de ambas as usinas, considerando o ano de 2018 como referência.



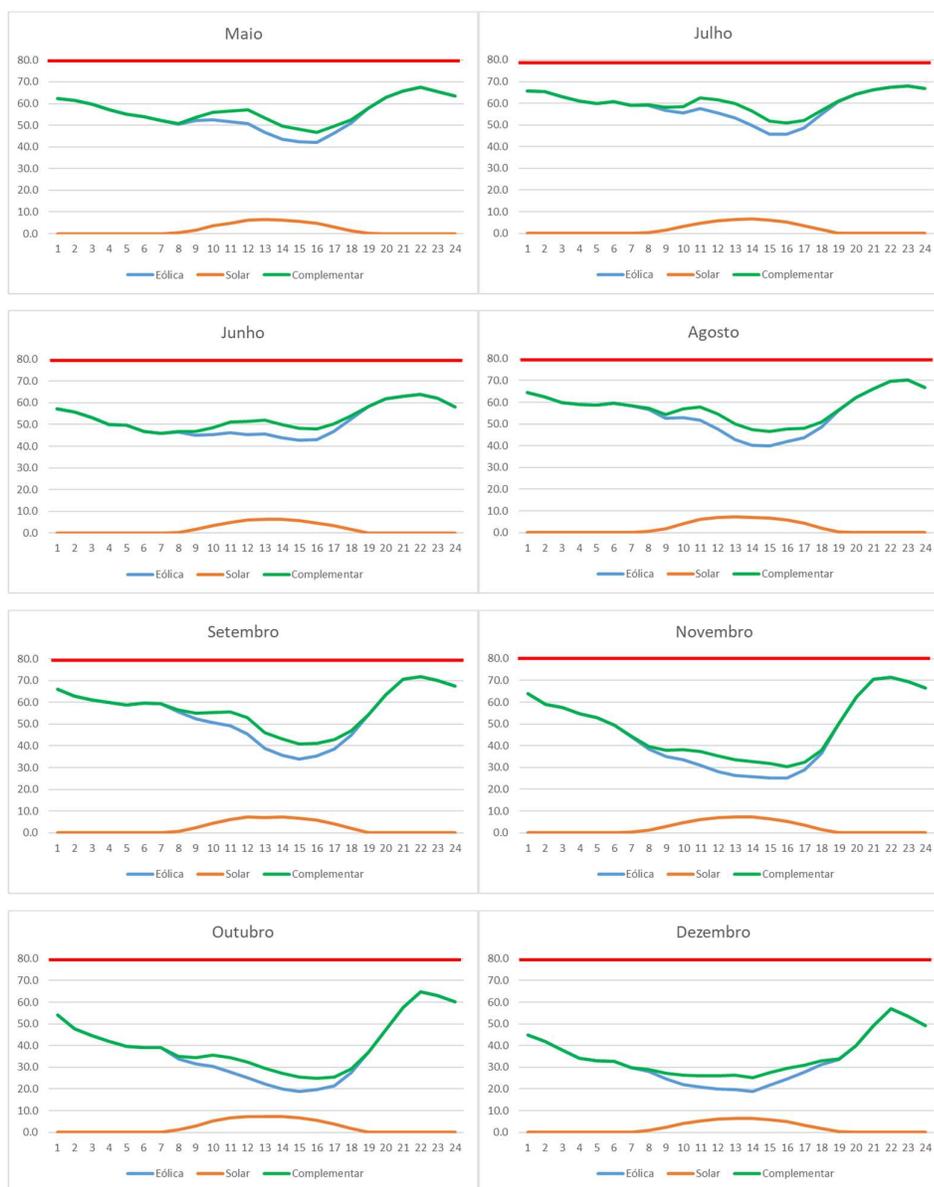


Figura 12- Perfil produção mensal ano de 2018 (Elaborado pelo autor, 2020)

Por meio dos gráficos apresentados é possível identificar a complementaridade entre as duas usinas através da curva ‘verde’, constituída pelo somatório entre a curva ‘azul’, representando a produção da usina eólica, e a curva ‘laranja’, como a curva de geração da usina solar fotovoltaica. Percebe-se que os momentos de geração máxima do solar são justamente quando o projeto eólico possui menor geração. A linha em ‘vermelho’ representa o valor atual do MUST contratado para o projeto eólico (79,9MWac). De acordo com os dados de 2018, não houve nenhum momento de ultrapassagem do MUST contratado, ou seja, nenhuma penalização ocorreu.

A partir do contexto regulatório anteriormente explicitado e das análises das curvas de geração dos projetos eólicos e solar, verifica-se que a adoção de projetos híbridos é uma possibilidade para o sistema, tendo em vista os benefícios que apresenta. Nesse sentido, com a intenção de se definir o melhor local para implantação da usina híbrida associada, os próximos capítulos exploram os critérios relevantes e possíveis ferramentas para a tomada de tal decisão, sendo um primeiro passo no percurso de desenvolvimento de projetos híbridos no Brasil.

3. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

3.1. ANÁLISES MULTICRITÉRIO

O processo de tomada de decisão, embora característico de diversos contextos da vida humana, assume na engenharia, e na economia, um papel estratégico e ao mesmo tempo relativamente formalizável.

De acordo com Simon (1965), as atividades realizadas pelas organizações são essencialmente processos de tomada de decisão e de resolução de problemas, em todos os seus níveis hierárquicos (estratégico tático e operacional). As decisões tomadas são muito importantes, principalmente as que se originam na alta administração da empresa, uma vez que tem um impacto sobre um maior número de pessoas. Portanto, percebe-se a importância em se adotar uma metodologia como forma de suporte no momento da tomada de decisão, principalmente em processos que envolvem diversos critérios e alternativas.

As empresas, independente do seu setor de atuação, precisam tomar decisões a todo momento, e para isso podem utilizar diversos métodos como forma de apoio, os quais se aplicam a casos com múltiplos critérios, utilizando diferentes abordagens para, enfim, chegar a uma melhor decisão.

Os processos de tomada de decisão são realizados com base em informações, dados e também pela experiência que o tomador de decisão/organização possui referente a um determinado tópico abordado. A Figura 13 apresenta a estruturação, de acordo com Choo (2003), do fluxo que antecede uma tomada de decisão.

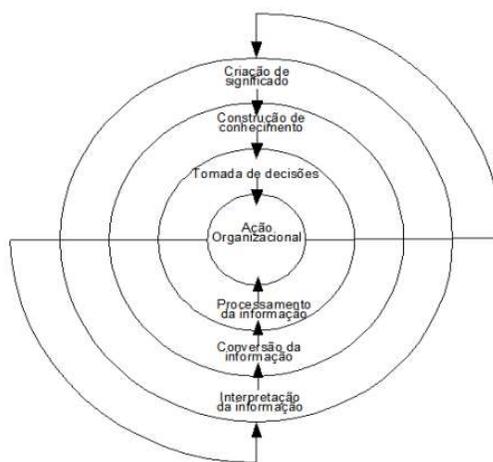


Figura 13- Fluxo tomada de decisão (CHOO, 2003)

Ainda que as informações e dados sejam importantes para o processo de tomada de decisão, nem sempre todas as variáveis na análise são do tipo objetivas, em diversos casos encontram-se variáveis do tipo subjetivas, que também influenciam no processo. Dessa maneira, novas aproximações foram desenvolvidas por meio de abordagens sistemáticas e estruturadas, que conduziram à um processo decisório mais aderente às necessidades (MEIRELLES; GOMES, 2009).

Em resumo, o processo de tomada de decisão consiste no rastreamento, entre as diversas opções disponíveis, daquela que apresenta a melhor expectativa. Portanto, entende-se que tomar uma decisão é definir a opção que melhor se enquadra no objetivo proposto.

Segundo abordado por Roy (1996), os métodos de decisão que consideram mais de um critério na avaliação de um problema com uma ou mais alternativas são definidos como Métodos de Decisão Multicritérios (MCDM – *Multi-Criteria Decision Making*). Esses métodos se mostram como um importante conjunto de ferramentas para abordar decisões complexas em organizações, auxiliando os gestores em situações de incerteza, complexidade e objetivos conflitantes (WANG, 2010).

O MCDM é uma metodologia que auxilia o tomador de decisão, no processo decisório que envolve um número finito de opções, na verificação e escolha da melhor alternativa que se encaixa à determinado objetivo (ARAÚJO, 2019), oferecendo suporte também nas avaliações de problemas que muitas vezes não possuem características tangíveis. Um dos benefícios da utilização do MCDM é agregar significativo valor na tomada de decisão, permitindo a avaliação de problemas considerados complexos, e trazendo clareza e transparência que muitas vezes não são atingidos quando se utilizam métodos de um único critério.

Segundo os estudos de Saaty (1980), Keeney (1982) e Tsoukiàs (2007) o método MCDM consiste, basicamente, em cinco estágios:

- (1) Ponderar cada critério de acordo com sua importância em relação à meta/objetivo;
- (2) Atribuir pontuação para cada alternativa com relação aos critérios;
- (3) Calcular a pontuação ponderada global das alternativas;
- (4) Classificar as alternativas, com base nas pontuações ponderadas globais;
- (5) Selecionar a alternativa mais adequada, ou seja, aquela com maior pontuação.

De acordo com Vike (1992), os métodos MCDM podem ser subdivididos de acordo com a escola que pertencem: Escola Norte-Americana e Métodos da Escola Europeia. Cada um desses dois grandes grupos tem também suas subclassificações. Enquanto a Escola Europeia (também conhecida como Escola Francesa) emprega métodos utilizando uma modelagem mais simples e flexível do problema, não determinando como obrigatório a comparação entre alternativas e a criação de uma estrutura hierárquica de critérios, a Escola Norte-Americana utiliza métodos mais vinculados as comparações e atribuições de pesos para cada um dos critérios e subcritérios avaliados. Fazem parte das subclassificações da Escola Norte-Americana os métodos *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Analytic Network Process* (ANP) e *Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution* (TOPSIS).

A Figura 14 apresenta os principais métodos utilizados compreendidos no MCDM:

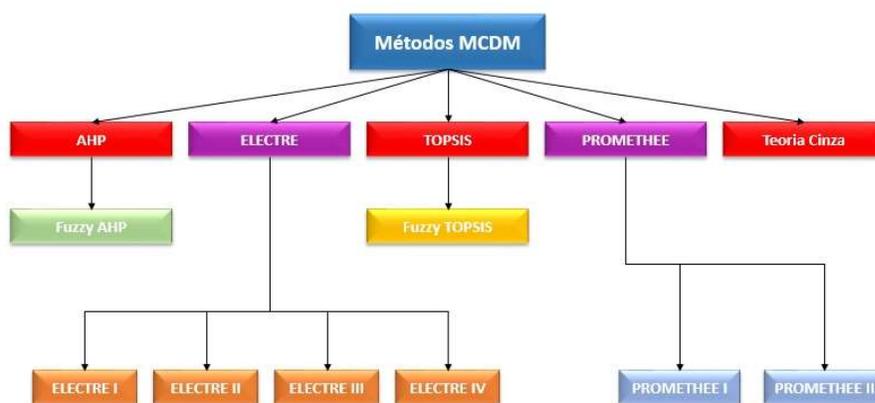


Figura 14- Métodos de Decisão Multicritérios (Adaptado de ARAUJO, 2019)

O MCDM é uma das técnicas preferidas pelos usuários que lidam com o planejamento do sistema elétrico, sendo o AHP muito utilizado devido a flexibilidade e intuição para os envolvidos no processo de tomada de decisão (ALGRARÍN; LLANOS; CASTRO, 2017).

Existem diversos estudos na literatura que apresentam a utilização do método MCDM como ferramenta de avaliação de projetos de energia renovável, podendo citar os estudos de Wang et al. (2009), confirmando que os pesos dos critérios da análise possuem influência direta nos resultados da tomada de decisão, Kurka e Blackwood (2013) comparando as metodologias AHP, DELTA e PROMETHEE para utilização em tomadas de decisão que envolvem projetos de energia renovável, concluindo que o AHP possui melhor aceitação comparado aos outros dois métodos, e ainda Stein (2013) desenvolvendo um modelo para tomada de decisão

envolvendo projetos de energia renovável (solar, eólico, hidro, biomassa e geotérmico) ou não renovável, através do método AHP.

3.1.1. AHP – *Analytic Hierarchy Process*

Conforme mencionado no item anterior, o AHP, ou também conhecido como Processo de Análise Hierárquica, é um dos métodos enquadrados na área do MCDM e serve como ferramenta para ranquear opções, dentre algumas possíveis, auxiliando o tomador de decisão na seleção.

Logo após seu desenvolvimento, o método foi muito aplicado no setor financeiro, no entanto, logo passou a ser utilizado nos setores de educação, engenharia, governamental, industrial, gestão, fabricação, pessoal, político, social e até mesmo nos esportes (VAIDYA; KUMAR, 2006).

O método foi desenvolvido por Thomas L. Saaty no final da década de 60, e é baseado na estrutura hierárquica de problemas MCDM para representar a relação entre os critérios, subcritérios e alternativas (CHAVEZ; BERENTSEN; LANSINK, 2012). Dessa forma, através do método, um problema complexo pode ser decomposto em vários níveis hierárquicos.

Através do método AHP o tomador de decisão realiza certos julgamentos, realizando comparações paritárias entre cada um dos critérios da análise que estão vinculados às possíveis alternativas do problema, nas quais, no processo de comparação, são atribuídas notas, baseadas em quão bem cada alternativa, ou possibilidade, combinam entre si, ainda que estejam sendo analisados atributos que não são quantificáveis, ou seja, atributos subjetivos. A pontuação é então concedida fundamentada na relação de importância entre dois itens, dessa maneira, os julgamentos são quantificados numericamente. Através da avaliação dos pesos dos critérios envolvidos na análise é processado o *ranking*, o qual contribui com o processo decisório por parte do tomador de decisão (SULLIVAN; CANADA, 1989).

Conforme mencionado anteriormente, há outros métodos disponíveis para auxiliar no processo de tomada de decisão, como o ANP e TOPSIS, no entanto o AHP ainda é o mais utilizado quando comparado com estas outras duas metodologias, devido à simplicidade no processo de modelagem, fácil utilização, grande flexibilidade e possibilidade de contribuição por diversas pessoas (comitê) (EMROUZNEJAD; HO, 2018).

Geralmente, quando o processo de tomada de decisão envolve a área de Engenharia, raras são as situações onde uma única pessoa é a responsável por tomar a decisão final, na maior parte dos casos esta ocorre em conjunto com um comitê formado por especialistas. Segundo

Gomes (2009) o método AHP também apresenta como vantagem permitir a participação de diversas pessoas no processo da tomada de decisão. No entanto, uma vez que a pontuação é atribuída por processos subjetivos, ela é volúvel, e ao depender muitas vezes da percepção subjetiva, pode conter incertezas e imprecisões.

No método AHP a decisão entre a melhor alternativa, dentro de um número finito de opções, inicia-se com a criação da chamada *pairwise comparison*, basicamente uma matriz de comparação entre critérios e alternativas (TAHA, 2003). Essa matriz o tomador de decisão analisa, compara e indica uma pontuação com base em sua preferência.

Para que seja possível realizar o processo de comparação paritária entre critérios e alternativas, é utilizada uma escala que varia entre 1 – 9, servindo como indicação da força de importância, relativa do elemento sob julgamento. Conforme abordado por Vreeker, Nijkamp e Welle (2002), a escala é utilizada em função de sua eficácia para refletir as informações qualitativas de um problema de decisão, e então permitir que pesos desconhecidos sejam verificados.

Segundo estudos realizados por Dubois e Prade (1980) o método AHP pode ser dividido através das seguintes etapas:

1. Estruturação do problema: O problema é decomposto em classes hierárquicas através de critérios, sub-critérios e alternativas. Essa é uma das principais etapas, pois é o momento onde se estrutura quais serão, de fato, os critérios de comparação analisados no processo de tomada de decisão, dessa maneira, espera-se que os critérios avaliados sejam coerentes ao objeto de avaliação do estudo;

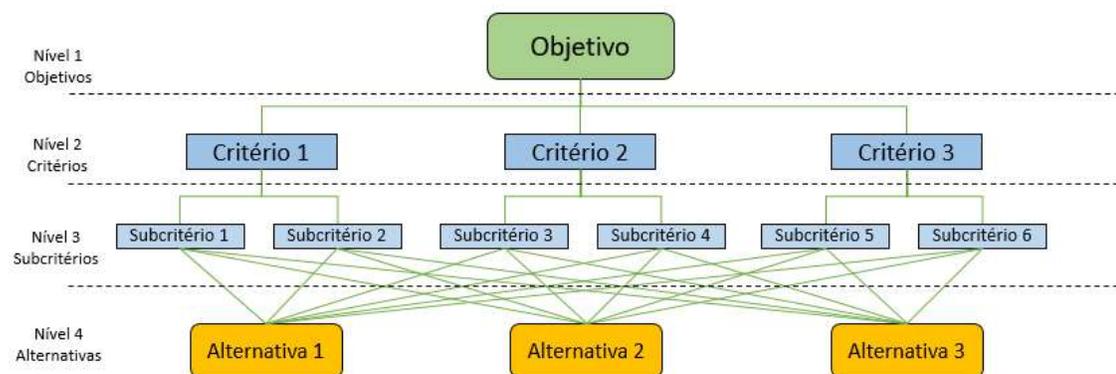


Figura 15- Classes hierárquicas (Elaborado pelo autor, 2020)

2. Construção da matriz *pairwise comparison*: Os especialistas/comitê que avaliarão o problema, comparam cada um dos critérios de avaliação através da utilização da variável linguística e o valor numérico associada a ela. Como indicado na Tabela 1.

Tabela 1: Escala fundamental

Variável Linguística	Valor Numérico
Mesma Importância	1
Importância pequena de uma sobre a outra	3
Importância grande ou essencial	5
Importância muito grande	7
Importância absoluta	9

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de (BRIOZO, 2015)

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	5	3
Alternativa 2	1/5	1	9
Alternativa 3	1/3	1/9	1
Σ	1.53	6.11	13.00

Figura 16- *Pairwise Comparison* (Elaborado pelo autor, 2020)

3. Normalização da matriz *pairwise comparison*: Cada um dos elementos da matriz é dividido pelo somatório da coluna a qual pertence;

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ
Alternativa 1	0.652	0.818	0.231	1.701
Alternativa 2	0.130	0.164	0.692	0.986
Alternativa 3	0.217	0.018	0.077	0.312
Σ				3.000

Figura 17- *Pairwise Comparison* Normalizada (Elaborado pelo autor, 2020)

4. Definição e comparação dos pesos: A importância relativa de cada um dos critérios, comparados através da matriz *pairwise*, é calculada por meio do autovalor e autovetor da matriz *pairwise comparison* normalizada, sendo que os elementos do autovetor normalizados são denominados como o ‘peso’ da alternativa.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Σ		Autovetor
Alternativa 1	0.652	0.818	0.231	1.701	1.701/3.000	0.567
Alternativa 2	0.130	0.164	0.692	0.986	0.986/3.000	0.329
Alternativa 3	0.217	0.018	0.077	0.312	0.312/3.000	0.104
				Σ 3.000		

Figura 18- Cálculo do Autovetor (Elaborado pelo autor, 2020)

5. Cálculo do Autovetor máximo ($\lambda_{m\acute{a}x}$): Uma vez calculado os autovetores para cada uma das alternativas, é necessário então proceder com o cálculo do Autovetor Máximo, conforme cálculo da Figura 19 abaixo:

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3		Autovetor	
Alternativa 1	1	5	3	x	0.567	2.524
Alternativa 2	1/5	1	9		0.329	1.380
Alternativa 3	1/3	1/9	1		0.104	0.330
					Σ 4.233	(Valor de $\lambda_{m\acute{a}x}$)

Figura 19- Cálculo do Autovetor máximo (Elaborado pelo autor, 2020)

6. Verificação do índice de consistência preliminar (ICp): Este índice serve como forma de validação das comparações realizadas nos passos anteriores. No caso do valor do índice estar acima de 0,2, então os passos anteriores precisam ser refeitos⁵. O índice de consistência pode ser calculado através da Eq.3:

⁵ Para refazer os passos anteriores é preciso criar uma nova matriz *pairwise comparison*.

$$IC_p = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (3)$$

Onde:

n : Número de critérios avaliados através da matriz *pairwise comparison*;

$\lambda_{m\acute{a}x}$: autovetor máximo.

Após o cálculo do IC_p , segundo o procedimento do método AHP desenvolvido por Saaty, deve-se comparar o valor calculado do IC_p com o IC oriundo de uma matriz aleatória, conforme Tabela 2, que representa o erro aleatório relacionada a ordem da matriz. Esse IC recebe o nome de IR (*Random Consistency Index*). Finalmente, nessa etapa, é necessário calcular o índice conhecido como IC (Índice de Consistência) conforme Eq.4, onde de acordo com Saaty o resultado deve ser menor que o valor de 0,1, indicando assim um resultado confiável.

$$IC = \frac{IC_p}{IR} \quad (4)$$

Tabela 2: Índice de Consistência Aleatória

Ordem da matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de (BRIOZO, 2015)

O procedimento geral do método AHP é apresentado através da Figura 20:

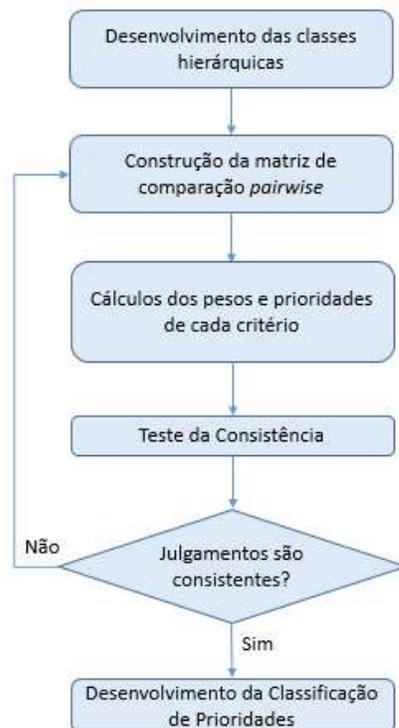


Figura 20- Fluxograma do Método AHP (Adaptado de EMROUZNEJAD, 2018)

Como conclusão, segundo abordado por Saaty (1980), a teoria sobre a metodologia AHP é baseada em quatro axiomas:

1. O tomador de decisão pode realizar comparações a_{ij} entre duas alternativas i e j que correspondam a um critérios e sub-critério, em uma escala de razão que é recíproca, ou seja, $a_{ij} = 1/a_{ji}$;
2. O tomador de decisão nunca pode julgar uma alternativa que seja infinitamente melhor do que a outra que está comparando, ou seja, $a_{ij} = \infty$;
3. O problema de decisão pode ser elaborado em classes hierárquicas;
4. Todos os critérios, sub-critérios e alternativas que estão relacionadas ao problema de decisão são representadas e avaliadas em forma hierárquica de uma só vez.

Desde o início de seu desenvolvimento, o método AHP vem sendo utilizado em diversos problemas de tomada de decisão, abordando os mais diferentes temas. Em Kablan (2004) o método é utilizado como ferramenta de seleção de políticas de conservação de energia na Jordânia, uma vez que o autor relaciona julgamentos de valor subjetivos na análise de priorização das políticas de conservação de energia a serem implementadas. Athanasios, Chatzimouratidis e Pivalachi (2009) utilizam o método para diferenciar, entre dez usinas, o impacto causado por elas com base em seu combustível: renovável ou não renovável. Onde, como conclusão, verificaram que a adoção de usinas de energias renováveis na matriz energética são as melhores soluções para um futuro mais sustentável.

As tecnologias enquadradas como modelo de Geração Distribuída foram avaliadas por Karger e Hennings (2009) como forma de garantir uma geração de eletricidade sustentável, onde através dos resultados encontrados e apresentados no estudo, não foi possível classificar a descentralização da geração de energia elétrica como claramente positiva ou negativa. De acordo com os estudos expostos por Heo, Kim e Cho (2012) o método AHP é empregado como suporte para seleção de métodos, entre seis opções, de produção de hidrogênio, através da análise por um comitê de *experts*. No entanto os autores também propõem um novo estudo, porém com julgamento dos critérios por pessoas que não conheçam o tema da geração de energia elétrica por hidrogênio.

Nos estudos de Petrillo et al. (2016) a metodologia AHP é introduzida com o objetivo de analisar o impacto ambiental e o custo do ciclo de vida de um sistema híbrido *off-grid* de energia renovável, com base na análise, julgamentos e pontuações de critérios ambientais, econômicos e sociais. Já Vafaeipour et al. (2014) aplicam o AHP avaliando alguns critérios quantitativos e qualitativos com o objetivo de selecionar, entre 25 localidades no Iran, o melhor local para implementação de uma usina de energia solar. Como conclusão verificaram que a identificação de localizações geográficas adequadas para a instalação de usinas solares não está apenas associada à quantidade de radiação solar recebida no local, mas há outros fatores, econômicos, ambientais, sociais e de risco que também devem ser levados em consideração para a tomada de decisão.

Por fim, Ozdemir e Sahin (2018) utilizam o AHP para selecionar, dentre três localidades, qual a melhor para receber a instalação de uma usina solar. Para isso, avaliam critérios quantitativos e qualitativos, pertinentes à temática, como por exemplo, potencial de geração de energia, fatores ambientais, segurança, distância à linha de conexão e questões topográficas, em estudo muito similar ao aplicado por Joseph, Umoren e Markson (2016).

3.1.2. FAHP – Fuzzy Analytic Hierarchy Process

3.1.2.1. Teoria Fuzzy

A percepção que se tem sobre o mundo real é estabelecida por muitos conceitos que não possuem limites bem definidos, como por exemplo: muito, baixo, velho, muito jovem, e tais conceitos são verdadeiros ou falsos apenas até certo ponto. Esses conceitos, ou fatos, podem ser chamados de conceito *fuzzy*, ou conhecidos como conceitos vagos (SIVANANDAM; SUMATHI; DEEPA, 2007). Os dados que não possuem precisão podem ser resultados de dados que não são quantificáveis, incompletos ou até mesmo informações que não foram obtidas (EMROUZNEJAD; HO, 2018).

Enquanto os humanos lidam com esses conceitos diariamente, o mesmo não se pode dizer dos computadores, estes trabalham em um processo binário, analisando 0 ou 1, por essa razão pode-se atestar que, pelo menos até início da década de 1980, computadores não possuíam uma linguagem *fuzzy*, ou seja, trabalhavam apenas considerando as declarações do universo da álgebra Booleana (BOOLE, 1984), onde algo é enquadrado como VERDADEIRO ou FALSO, 0 ou 1, BRANCO ou PRETO. Esta conceituação está ilustrada conforme Figura 21:

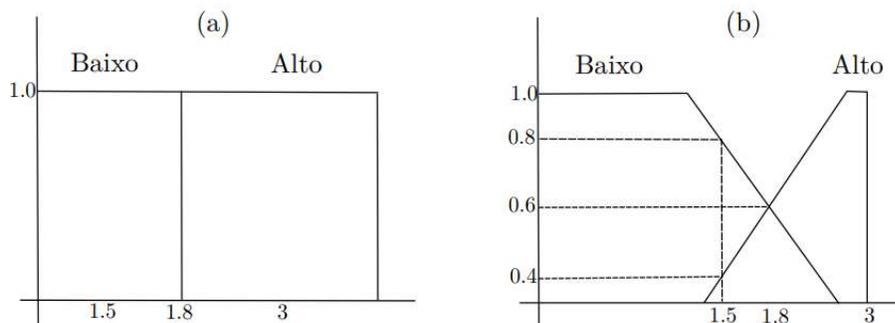


Figura 21- Conceito Booleano (a) Conjunto Fuzzy (b) (BUENO, 2017)

A teoria *fuzzy* foi inicialmente discorrida por Zadeh (1965), engenheiro e cientista, em 1965, quando forneceu uma metodologia matemática para lidar com incertezas e imprecisões. De acordo com seus estudos, através da metodologia *fuzzy* é possível modelar a incerteza que muitas vezes está associada à imprecisão, dados vagos e falta de informações. Segundo Vidal (2015), a utilização da lógica *fuzzy* viabiliza, de forma rápida, o controle de problemas imitando a maneira que o próprio ser humano pensa e, então, toma suas decisões.

A utilização dos chamados Números *Fuzzy* dentro do método AHP, *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP) é justamente adotada para reduzir, ou até mesmo eliminar, a imprecisão originária de uma escolha, que surge através do julgamento humano, conforme comentado anteriormente, e que é encontrada no método AHP. De acordo com o exposto por Kaya e Kahraman (2010), os números *fuzzy* podem ser usados com sucesso em modelos onde há incertezas devido as preferências e escolhas humanas. Ainda, segundo Rainer e Cegielski (2012), a lógica *fuzzy* é, então, baseada no fato de que a tomada de decisão não possui sempre uma verdade absoluta, sendo o termo “talvez” mais apropriado em alguns casos.

Em um de seus primeiros estudos, Zadeh expõe que em um método MCDM a avaliação humana normalmente consiste em expressões qualitativas que são difíceis de serem apresentadas através dos números *crisps*⁶, entretanto por meio do conceito de teoria *Fuzzy* podem ser abordados. Através dessa teoria, é possível tratar a ambiguidade que não pode ser explicada por um senso matemático usual, como por exemplo ‘número de pessoas baixas numa classe’, ou ‘número de pessoas ricas dentro de um grupo’.

Os números conhecidos como *crisps*, ou em português algo assim como ‘números nítidos’, podem ser classificados apenas como 0 ou 1, enquanto que os números *fuzzy*, ou ‘números difusos’ podem ser descritos como qualquer número real dentro do intervalo [0,1]. Quanto mais o número *fuzzy* se aproxima do valor 1, então o grau de participação, ou também chamado de grau de pertinência, desse número é maior. De acordo com Yen e Langari (1999), o grau de pertinência na verdade é uma medida de compatibilidade do objeto analisado com o conceito representado pelo conjunto *fuzzy*. Também pode ser entendido como uma medida que expressa a possibilidade de que um determinado elemento seja membro do conjunto *fuzzy*.

A possibilidade de se trabalhar com informações vagas e imprecisas, oriundo dos processos humanos, é a grande flexibilidade proporcionada pela teoria *fuzzy* (AMENDOLA; SOUZA; BARROS, 2004).

Segundo a literatura apresentada por Goetschel (1986), um número *fuzzy* pode ser declarado na forma paramétrica como um par de funções contínuas $c(r)$ e $\underline{c}(r)$ que satisfazem as seguintes condições:

1. $c(r)$ é limitado, monotômico aumentado e pertence a uma função contínua.
2. $\underline{c}(r)$ é limitado, monotômico diminuído e pertence a uma função contínua.

⁶ Números *crisps* foram abordados há muitos séculos atrás, pelo filósofo Aristóteles. Segundo ele, a matéria era essencialmente numérica, então o próprio universo poderia ser definido através de uma relação numérica.

3. $c(r) > \underline{c}(r)$ para $0 \leq r \leq 1$.

Sendo o peso de um número *fuzzy* determinado considerando que o peso deve ser maior quando o número *fuzzy* está perto de um outro número *fuzzy* também envolvido no conjunto.

Quando se diz, por exemplo, que uma pessoa é alta, essa variável está relacionada à qual valor de altura uma determinada pessoa julga ser considerada como alta, nesse caso, duas pessoas, X e Y, podem atribuir a mesma variável para pessoas que não necessariamente possuem o mesmo valor de altura, ou seja, não há uma definição única a respeito da altura que uma pessoa precisa ter para ser enquadrada como uma pessoa alta. Com isso, percebe-se que há incertezas associadas à definição da variável.

Para que seja possível classificar uma pessoa como alta é necessário, então, conhecer o que classifica uma pessoa como baixa. Na metodologia *fuzzy* tais variáveis, alta ou baixa, recebem o nome de Variáveis Linguísticas. Segundo abordado por Zadeh (1980) em seus estudos, com o intuito de se tomar decisões adequadas em situações que ocorrem incertezas, o conceito de *membership value*, ou grau de pertinência, foi desenvolvido, como explicado anteriormente.

3.1.2.2. O Método FAHP (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process*)

Diversos autores propuseram métodos para lidar com a metodologia FAHP, como por exemplo nos estudos de Laarhoven e Pedrycz (1983) e Buckley (1985). Nessa metodologia, assim como na AHP, é utilizada a matriz de comparação *pairwise comparison*, contudo, a variável linguística utilizada é “adaptada” para os números *fuzzy*, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Variável linguística e respectivo número *fuzzy*

Números <i>Crisp</i>	Números <i>Fuzzy</i>	Variável Linguística	Função atrelada aos números Fuzzy triangulares	Função Recíproca atrelada aos números Fuzzy
1	$\tilde{1}$	Igualmente Importante	(1,1,1)	(1,1,1)
3	$\tilde{3}$	Moderadamente Importante	(2,3,4)	(1/4, 1/3, 1/2)
5	$\tilde{5}$	Importante	(4,5,6)	(1/6, 1/5, 1/4)
7	$\tilde{7}$	Muito Importante	(6,7,8)	(1/8, 1/7, 1/6)
9	$\tilde{9}$	Extremamente Importante	(9,9,9)	(1/10, 1/9, 1/8)

Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2018)

Quando um número *fuzzy* representa um conceito linguístico, o resultado é chamado de variável linguística. A utilização de variáveis linguísticas representa um outro ponto benéfico a favor da lógica *fuzzy* quando comparada com a lógica booleana, visto que expressões como, ‘muito grande’, ‘pouco frio’, ‘mais ou menos jovem’, podem ser utilizadas em substituição a descrição numérica (GARCIA et al., 2007).

Segundo o método FAHP apresentado por Buckley (1985), é utilizado o Método da Média Geométrica como mecanismo de trabalho com as variáveis linguísticas formadas por números *fuzzy*. De acordo com seu estudo, as etapas do método podem ser descritas conforme etapas abaixo. Percebe-se que as primeiras fases são exatamente as mesmas que ocorrem no Método AHP:

1. Definição do objeto a ser estudado, e com isso formação de um comitê com os especialistas que irão julgar determinado objeto/assunto, e arbitrar os pontos de importância de cada tópico;
2. Construção da estrutura hierárquica do problema. Nessa etapa os especialistas irão formular a base da estrutura através das alternativas que desejam estudar e os critérios que serão avaliados para definição da melhor alternativa.
3. Definição da escala de importância relativa através da associação, para cada critério e alternativa, das variáveis linguísticas e seus respectivos números *crisps*, representados através de uma escala de cinco pontos. Estes, arbitrados pelos especialistas do comitê. No método FAHP, diferente do AHP, os números *crisps* são transformados em números *fuzzy*, onde o processo é conhecido como *Fuzzification*. Para esse respectivo trabalho é considerado o uso dos números *fuzzy* triangulares. Onde, segundo Pedrycz (1994), devido à simplicidade de conceito, e formato da função de pertinência, os números *fuzzy* triangulares constituem uma solução imediata para os problemas de otimização na modelagem *fuzzy*.
4. Construção da matriz de comparação *pairwise comparison* $\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}]$ através de:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & (1, 1, 1) & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & (1, 1, 1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde $\tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ji} \approx 1$ e $\tilde{a}_{ij} \cong w_i / w_j$, $i, j = 1, 2, \dots, k$.

5. Cálculo do valor médio geométrico *fuzzy* (\tilde{r}_i), conforme Eq.6:

$$\tilde{A}_1 \otimes \tilde{A}_2 = (l_1, m_1, n_1) \otimes (l_2, m_2, n_2) = (l_1 \cdot l_2, m_1 \cdot m_2, n_1 \cdot n_2) \quad (6)$$

Onde \tilde{r}_i é determinado por:

$$\tilde{r}_{ij} = (\tilde{a}_{i1} \times \tilde{a}_{ij2} \times \dots \times \tilde{a}_{ik})^{1/k} \quad (7)$$

6. Cálculo do peso associado ao número *fuzzy* (\tilde{w}_i), para que seja criada uma nova coluna ao lado da matriz de comparação *pairwise*:

$$\tilde{W}_i = \tilde{r}_i \times (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} \quad (8)$$

Onde,

$$\tilde{A}^{-1} = (l, m, n)^{-1} = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l}\right) \quad (9)$$

7. Etapa da *Defuzzyfication*, onde cada número *fuzzy* $\tilde{r}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, n_{ij})$ é novamente transformados em número *crisp* (r_{ij}). Esse processo pode ser realizado pelo método do centro de gravidade (MCG), conforme Eq. 10:

$$\tilde{w}_i = \left(\frac{l + m + n}{3}\right) \quad (10)$$

A Tabela 4 indica as operações matemáticas referentes aos números *crisps* e *fuzzy*:

Tabela 4: Operações aritméticas

Operação aritmética	<i>Crisps</i> a=3, b=2	<i>Fuzzy</i> a = (-2, 3, 8) , b=(-1, 2, 7)
Adição (a + b)	3 + 2 = 5	(-2, 3, 8) + (-1, 2, 7) = (-3, 5, 15)
Subtração (a - b)	3 - 2 = 1	(-2, 3, 8) - (-1, 2, 7) = (-1, 1, 1)
Multiplicação (a x b)	3 x 2 = 6	(-2, 3, 8) x (-1, 2, 7) = (2, 6, 56)
Divisão (a ÷ b)	3 ÷ 2 = 1.5	(-2, 3, 8) ÷ (-1, 2, 7) = (2, 1.5, 1.14)

Fonte: Adaptado de VALLE (VALLE, 2015).

Em resumo, dado dois números *fuzzy*, \tilde{A} e \tilde{B} , as principais operações matemáticas são as descritas a seguir:

$$\tilde{A} + \tilde{B} (l, m, n) + (s, t, u) = (l + s, m + t, n + u) \quad (11)$$

$$\tilde{A} - \tilde{B} = (l, m, n) - (s, t, u) = (l - s, m - t, n - u) \quad (12)$$

$$\tilde{A} \times \tilde{B} = (l, m, n) \times (s, t, u) = (l \times s, m \times t, n \times u) \quad (13)$$

$$\tilde{A} \div \tilde{B} = (l, m, n) \div (s, t, u) = (l \div s, m \div t, n \div u) \quad (14)$$

$$-\tilde{B} = -(l, m, n) = (-n, -m, -l) \quad (15)$$

Apoiado nos estudos de Buckley (1985), no ano de 2000 foi proposto por Mikhailov (2000) um novo procedimento para lidar com a metodologia FAHP, através de programação linear, e uma atualização do modelo ocorreu posteriormente, em 2003, pelo próprio Mikhailov (2003), quando propôs um método para obter os números *crisps* e seus pesos a partir de um processo de otimização não-linear, podendo ser resolvidos através de alguns *softwares* computacionais, como por exemplo o MATLAB[®]. Em termos de procedimento, a metodologia difere da de Buckley (1985) após a construção da matriz de comparação *pairwise comparison*, que tem as seguintes etapas:

1. Avaliação do problema de priorização máxima, onde:

Max λ

$$\lambda \leq \mu_{ij}(w); i = 1, 2, \dots, n-1; j = 1, 2, \dots, n; j > i$$

$$\sum_{l=1}^n w_l = 1, w_l > 0; l = 1, 2, \dots, n-1$$

2. Transformação das funções de pertinência, constituídas por números *fuzzy* triangulares, em um problema de programação não-linear, onde:

Max λ

$$(m_{ij} - l_{ij}) \lambda_{w_j} - w_i + l_{ij} w_j \leq 0$$

$$(u_{ij} - m_{ij}) \lambda_{w_j} - w_i + u_{ij} w_j \leq 0$$

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1, w_k > 0; k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1; j = 2, 3, \dots, n-1; j > i$$

3. Utilização de algum método numérico destinado à otimização não-linear para obtenção da solução ótima do problema: (λ^*, w^*) . Através do valor de λ^* é aferida a consistência dos julgamentos do conjunto *fuzzy*, onde em caso de valor positivo, pode-se então atestar que o conjunto é consistente, enquanto um valor negativo indica inconsistência.

Nos últimos anos, método FAHP também vem sendo aplicado na área de Engenharia. No artigo de Lozano, Cascales e Lamata (2015) o FAHP é aplicado como forma de avaliação dos locais mais adequados para instalação de usinas termelétricas, considerando como critérios analisados os de escopo ambiental, localização, climático. Em LEE et al. (2015) o método é utilizado como suporte na avaliação de critérios qualitativos, auxiliando na decisão

de escolha do local mais apropriado para implantação da usina solar em Taiwan. Os autores WANG et al. (2018) também oferecem um estudo muito similar, porém buscando a localização ideal para a construção da usina solar no Vietnã e utilizando o método TOPSIS junto com o AHP e números *fuzzy*.

Conforme apresentado por Wang e Tsai (2018) o método FAHP é aplicado com o objetivo de selecionar os melhores fornecedores de módulos fotovoltaicos com base em fatores qualitativos e quantitativos, totalizando mais de 10 critérios analisados no estudo. Muitos outros autores também utilizaram o método FAHP para resolver problemas do tipo MCDM no cenário da energia renovável, como por exemplo o descrito por Ansari, Ashraf e Gopal (2010), onde a técnica foi utilizada para selecionar o melhor local na Índia para gerar energia a partir de fontes renováveis junto da metodologia VIKOR.

Stojcetovic et al. (2016) utilizam o método para selecionar o melhor projeto de energia renovável, dentre um grupo de projetos disponíveis, para ser instalado na Sérvia. Um modelo MCDM baseado em números *fuzzy* também foi proposto por Çolak e Kaya (2017) para priorizar o uso de energias renováveis na Turquia, enquanto Wright, Dey e Brammer (2013) demonstraram a aplicação do modelo para avaliação do *levelised cost of energy* (LCOE) de projetos de energia renováveis verificando variáveis como taxa de desconto, custo do investimento e valor da energia elétrica. Em Daim, Kayakutlu e Cowan (2010) se encontra o uso do FAHP para avaliação de projetos de energia renováveis que poderiam ser aplicados para cumprir a legislação do estado de Oregon nos Estados Unidos, onde até 2025 cerca de 25% da eletricidade do estado deverá ser proveniente de fontes renováveis.

3.1.2.3. Teoria dos Conjuntos Clássicos

Quando se fala em metodologia *fuzzy*, é importante mencionar a teoria dos conjuntos clássicos e dos conjuntos *fuzzy*. Na teoria dos conjuntos clássicos os números são sempre tratados como número *crisps*, indicando que um determinado elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto. Um conjunto *crisp* pode ser definido, então, de acordo com o exposto abaixo, indicando que determinado elemento pertence ou não pertence a um determinado conjunto.

$$\mu_A \rightarrow \{0,1\}$$

Como forma de exemplificação, considere-se a definição de uma pessoa como ‘alta’ ou ‘baixa’. Se for estabelecido que uma pessoa alta é aquela que possui mais de 1,80m de altura, então uma pessoa com essa altura, ou inferior, será considerada como ‘baixa’, de acordo com o conjunto clássico envolvendo os números *crisps*. Um conjunto *crisp* pode, então, ser definido de acordo com:

$$\chi^A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (16)$$

Os principais axiomas envolvendo os conjuntos com números *crisps* são:

1. Comutativa: $A \cup B = B \cup A$
 $A \cap B = B \cap A$
2. Associativa: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$
 $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$
3. Distributiva: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
 $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
4. Idempotência: $A \cup A = A$
 $A \cap A = A$
5. Identidade: $A \cup X = X$
 $A \cap X = A$
6. Transitiva: Se $A \subseteq B$ e $B \subseteq C$, então $A \subseteq C$
7. Involução: $\bar{\bar{A}} = A$

Uma vez que os conjuntos *crisps* seguem a teoria dos conjuntos clássicos, logo as relações apresentadas anteriormente são válidas para qualquer conjunto do universo U (SILVA, 2018).

3.1.2.4. Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*

Diferentemente dos conjuntos formados pelos números *crisps*, os conjuntos *fuzzy* não possuem uma fronteira definida que enquadra os números do conjunto como pertencendo ou não pertencendo ao próprio conjunto.

Aprofundando-se um pouco mais no exemplo anterior, ou seja, a definição de uma pessoa como ‘alta’ ou ‘baixa’, se tomar como exemplo uma pessoa que mede 1,75m de altura, pelas definições dos conjuntos clássicos tal pessoa seria considerada ‘baixa’, contudo, para os conjuntos *fuzzy* essa mesma pessoa pode pertencer simultaneamente a dois grupos, uma vez que sua altura está muito próxima daquela que define uma pessoa como ‘alta’ e ao mesmo tempo ‘baixa’. A lógica *fuzzy* busca modelar um raciocínio que não considera a pessoa pertencendo a apenas um grupo, ao contrário, considera que é possível, através de graus de pertinência distintos, ser enquadrada em mais de um grupo (Silva, 2018).

A Figura 22 abaixo indica que, ‘a’ é membro do conjunto *fuzzy* denominado como ‘P’, enquanto ‘c’, evidentemente, não faz parte do mesmo conjunto, e ‘b’ acaba possuindo grau de pertinência vago, incerto. Desta forma, para ‘a’ pode ser atribuído o grau de pertinência igual a 1, para ‘c’ o grau 0, enquanto ‘b’ pode assumir valores entre 0 e 1.

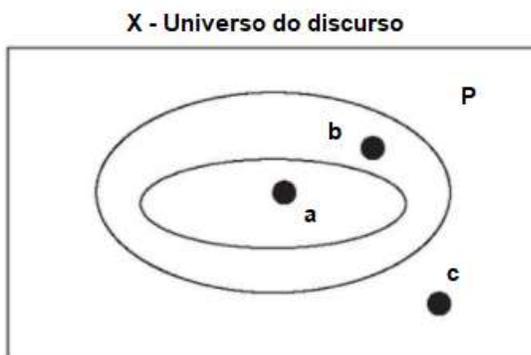


Figura 22- Região de fronteira de um conjunto *fuzzy* (Adaptado de SIVANANDAM, 2020)

Conforme apresentado por GARCIA et al. (2007), $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é conhecido como função de pertinência do elemento x no conjunto \tilde{A} , onde o domínio é χ e o contradomínio o intervalo $[0,1]$.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x) \mid x \in \chi\} \quad (17)$$

Onde:

$\chi_A(x)$ é o grau de pertinência do elemento x em um conjunto A ;

A é o conjunto inteiro no universo.

No livro escrito por Shingal (2013) há um bom exemplo para ilustrar o tema. No caso de um determinado especialista atribuir um determinado grau de pertinência para uma pessoa que ganha 9,7 laque⁷ e outro para uma outra pessoa que ganha 9,9 laque, em um conjunto *fuzzy* que engloba as pessoas consideradas como ricas, então uma função de pertinência pode ser utilizada para estimar o grau de pertinência de uma pessoa que ganha 9,8 laque, ou seja, para uma pessoa que não teve o grau de pertinência inicialmente atribuído pelo especialista.

A construção da função de pertinência é um processo subjetivo, onde a percepção e conhecimento por parte do especialista que está analisando um determinado critério faz a diferença, dessa forma, a definição não está associada a um processo aleatório, mas sim ao juízo do especialista. Esse fato é importante, e é exatamente ele que distingue a abordagem *fuzzy* da teoria da probabilidade (SIVANANDAM; DEEPA; SUMATHI, 2007).

Na Figura 23 é apresentado, como exemplo, o critério ‘Temperatura’ sendo representado através do conceito de números *fuzzy* e números *crisps*, onde a função de pertinência pode ser especificada como:

$$[T_1, T_2] \rightarrow [0,1]$$

⁷ Laque é uma unidade do sistema de numeração indiana equivalente a cem mil, ou seja, 10^5 , bastante utilizada para expressar valor monetário.

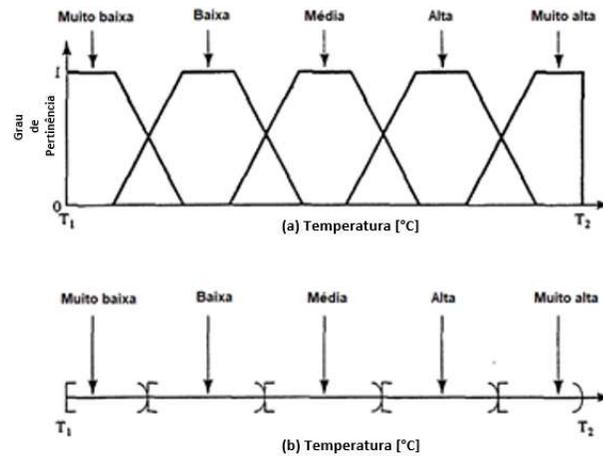


Figura 23- Temperaturas entre o conjunto $[T_1, T_2]$, onde (a) *fuzzy*; (b) *crisps*
(Adaptado de KLIR, 1995)

Importante mencionar que, para o exemplo da figura acima, a função de pertinência apresentada é a de formato trapezoidal, embora haja diversos tipos, como por exemplo: triangulares, gaussiana e sigma. Para este trabalho serão adotadas as do tipo triangulares.

Segundo abordado por Anand e Bharalraj (2017), a função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ do conjunto $\tilde{A} = (a,b,c)$ é considerada como triangular se:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (18)$$

Na Figura 24 são indicados dois números *fuzzy* $\tilde{A} (1,2,3)$ e $\tilde{B} (2,3,4)$, dispostos através de funções de pertinência triangulares. A união dos dois números, representada por $\tilde{A} \oplus \tilde{B}$, origina um novo número *fuzzy* $\tilde{C} (3,5,7)$. No eixo vertical são representados os valores da função de pertinência, enquanto no eixo horizontal os valores dos números *fuzzy* associados.

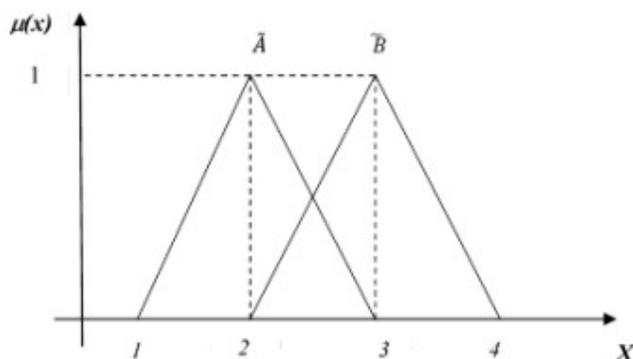


Figura 24- Funções de pertinência triangulares (Adaptado de ZHU et al., 1999)

Em Sivanandam, Sumanthi e Deepa (2007), assim como nos estudos apresentados por McNeill e Thro (1994), são expostos e discutidas em detalhes as diversas operações, leis e propriedades dos conjuntos clássicos e conjuntos *fuzzy*. As noções sobre estes conceitos e propriedades são fundamentais para a compreensão dos cálculos matemáticos que abordam estes conjuntos, uma vez que as aplicações acabam por exigir as combinações desses conjuntos de várias maneiras distintas. Dessa maneira, embora o aprofundamento desse tópico não seja foco desse trabalho, recomenda-se as leituras das obras destes autores, onde conceitos e principais operações matemáticas envolvendo conjuntos, tanto formados por números *crisps*, como também números *fuzzy*, são profundamente discutidos.

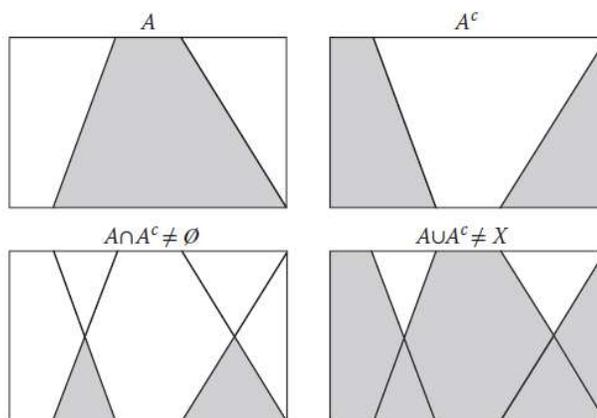


Figura 25- Conjuntos *fuzzy* e aplicação da álgebra Booleana (MILOSEVIC, 2012)

Diferente das operações aritméticas que regem os conjuntos clássicos, as operações para os conjuntos *fuzzy* seguem outro comportamento. Sejam A e B dois subconjuntos *fuzzy*, com funções de pertinência $\mu_A(x)$ e $\mu_B(x)$ respectivamente, de um determinado universo U . Nesse

caso, A é considerado subconjunto *fuzzy* do conjunto B se $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ para todo $x \in U$. Nesse caso também poderia ser dito que $A \subset B$.

Utilizando as funções *max* e *min* tem-se as seguintes equações definindo as operações que envolvem dois conjuntos *fuzzy*:

1. União ($A \cup B$):

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max_{x \in U} \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (19)$$

2. Intersecção ($A \cap B$):

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min_{x \in U} \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \quad (20)$$

3. Complementar (A^c):

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x), x \in U \quad (21)$$

A Figura 26 apresenta as principais operações matemáticas aplicadas para dois conjuntos *fuzzy* A e B :

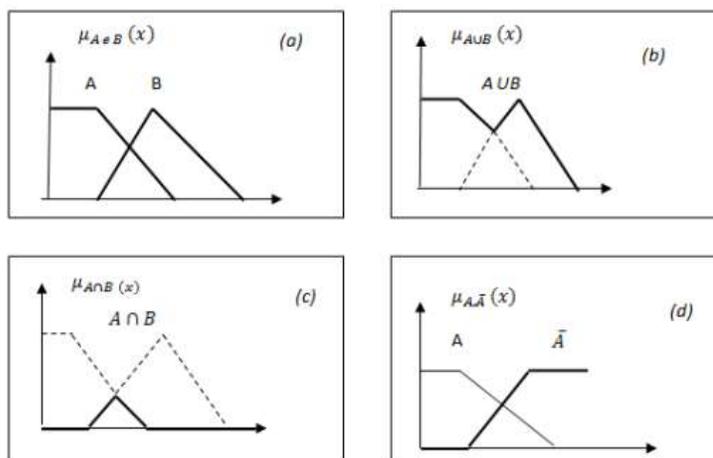


Figura 26- Representação de conjuntos *fuzzy*: (a) Conjunto A e B; (b) união; (c) intersecção; (d) complemento (SILVA, 2013)

Na obra de Silva (2018) é apresentado um bom exemplo referente as operações envolvendo os conjuntos *crisps* e os conjuntos *fuzzy*. Considerando dois conjuntos, A e B , onde o conjunto A é formado pelos números pares e o conjunto B pelos números ímpares:

$$A = 2, 4, 6, \dots$$

$$B = 1, 3, 5, \dots$$

A Tabela 5 apresenta as operações de união, intersecção e complementaridade envolvendo esses dois conjuntos:

Tabela 5: Operações com Conjuntos *Crisps*

A	B	$A \cup B$	$A \cap B$	A^C	$A \cap A^C$	$A \cup A^C$
2, 4, 6,...	1, 3, 5,...	\mathbb{N}	\emptyset	B	\emptyset	\mathbb{N}

Fonte: SILVA, 2018

A Tabela 6 apresenta as operações, porém agora envolvendo os conjuntos do tipo *fuzzy*, considerando que o conjunto A possui grau de pertinência de 0,8 para um determinado número próximo de 3, enquanto o conjunto B possui grau de pertinência de 0,7, também para um determinado número próximo de 3. Nota-se que, diferente do ocorrido nos conjuntos *crisps*, os momentos de intersecção nos conjuntos *fuzzy* não são vazios.

Tabela 6: Operações com Conjuntos *Crisps*

A	B	$A \cup B$	$A \cap B$	A^C	$A \cap A^C$	$A \cup A^C$
0,8	0,7	0,8	0,7	0,2	0,2	0,8

Fonte: SILVA, 2018

3.1.2.5. Lógica *Fuzzy*

Há ainda uma outra metodologia com extensão a partir do método FAHP e da lógica clássica que vem sendo desenvolvida ao longo dos últimos 10 anos por alguns autores em suas obras, como Dobric et al. (2015), onde através de conceitos da Álgebra Booleana se aplicam relações de lógica *fuzzy* que abrangem os critérios sob julgamento de um processo decisório.

Compreende-se essa metodologia como uma otimização do método FAHP original, pois considera as regras do universo da lógica como forma de comparação dos critérios.

Segundo Dragovic et al. (2013), a grande fraqueza dos métodos AHP e FAHP é a técnica de obtenção dos pesos, pois é realizada permitindo apenas uma relação linear entre os critérios da avaliação. Dessa forma, critérios podem influenciar e sofrer influência de outros critérios, de modo que seja importante estar atento a todas as interdependências no momento dos julgamentos.

Na lógica *fuzzy*, ao invés de definir a importância e comparação dos critérios através de uma matriz de comparação *pairwise comparison*, o processo é realizado por meio de funções lógicas, como: SE, ENTÃO, OU, E, onde o grau de pertinência de um certo critérios também é definido através de uma função de pertinência assumindo valores reais entre o conjunto $[0,1]$.

De acordo com os estudos de Shaw e Simões (1999), a lógica *fuzzy* prevê um método de aproximar o raciocínio humano e sua linguagem, que podem ser vagos e imprecisos, em uma forma compreensível pelos computadores. Através da utilização dos computadores foi possível desenvolver os controladores *fuzzy* para lidar com problemas não-lineares, baseado em todo o avanço teórico a respeito da teoria *fuzzy* exposto nos capítulos anteriores. De acordo com a Figura 27, as principais etapas de um controlador de lógica *fuzzy* são: (i) Fuzzificação, (ii) Base de Conhecimento, (iii) Inferência e (iv) Defuzzificação.

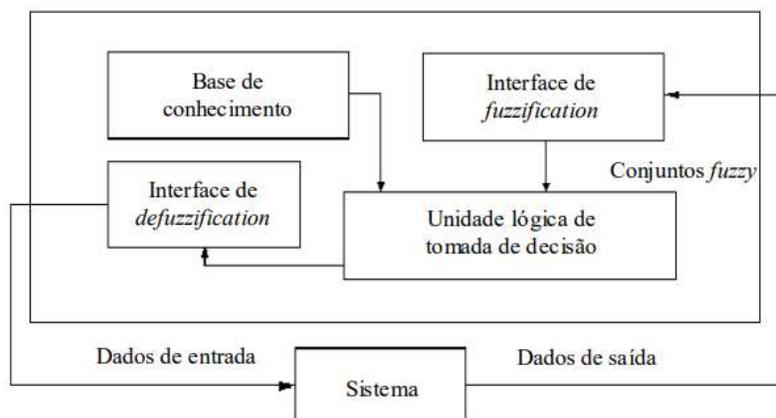


Figura 27- Diagrama controlador *fuzzy* (Niitymäkkim, 1998)

1. Fuzzificação: É a primeira etapa do processo, onde as variáveis do problema, representadas por números *crisp*s, são transformadas em número *fuzzy*. Os gráficos formados pelas funções de pertinência podem ser do tipo triangular, trapezoidal,

gaussiana. De acordo com Caneppele (2007), uma das etapas mais relevantes da construção de um modelo *fuzzy* é a seleção da função de pertinência de cada conjunto *fuzzy*, uma vez que este exercício determina a relação entre os dados de entrada e os seus conceitos linguísticos.

2. Base de Regras: Etapa em que as regras lógicas, envolvendo todos os critérios e suas respectivas variáveis linguísticas são elaboradas. Em geral, os seres humanos tomam decisões com base em seus conhecimentos sobre determinado assunto, onde estes conhecimentos são armazenados em forma de regras, muitas vezes do tipo ‘SE-ENTÃO’.
3. Inferência: É considerada uma das etapas principais do processo, sendo justamente onde ocorrem os cálculos que fornecerão os dados de saída (*output*) do problema. A literatura sobre Lógica *Fuzzy* apresenta diversos métodos de inferência, no entanto o MATLAB® oferece duas opções, conhecidas como: Método de Mamdani e Método de Sugeno. Nesse trabalho é utilizado o método de Mamdani (1973), baseado em regras do tipo ‘SE a ENTÃO b’, por se tratar de um método eficaz e adequado à intuição humana (AMENDOLA; SOUZA; BARROS, 2005). De acordo com Barin et al. (2010), o número de regras possíveis em simulações envolvendo sistemas *fuzzy* está relacionado com a quantidade de variáveis linguísticas atribuídas para cada um dos critérios. Segundo Silva e Gonçalves (2012), na fase de inferência aplicam-se os operadores *fuzzy*, assim como os operadores da lógica booleana, onde no caso da lógica *fuzzy* os operadores são representados por ‘E’ e ‘OU’. No Método de Mamdani, a regra de inferência utilizada é a do tipo Máx-Min, onde realiza os procedimentos considerando as operações de união e intersecção. A Figura 28 ilustra esse processo de inferência quando existem duas regras do tipo $A_i \rightarrow B_i$ e $A_j \rightarrow B_j$:

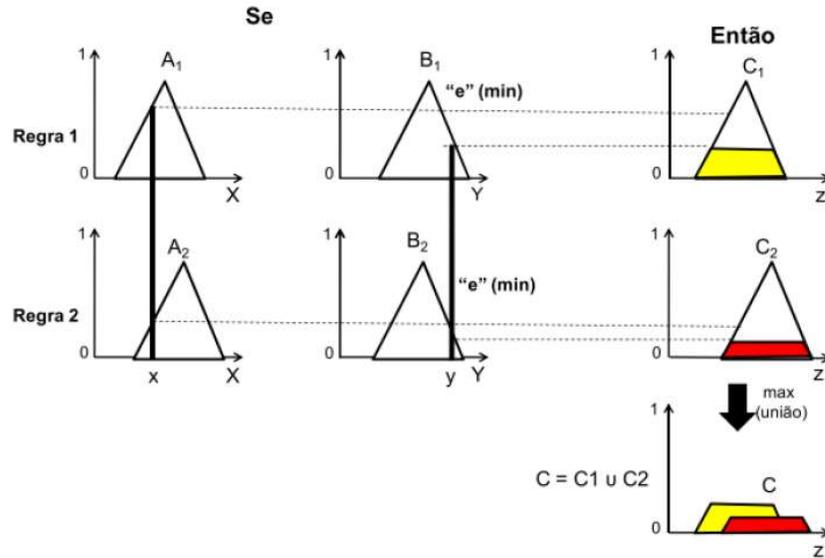


Figura 28- Inferência *Fuzzy* (GANGA, 2010)

Na etapa da inferência ocorre a análise de todas as regras lógicas que estão sendo consideradas em um determinado problema, e também a consolidação, em um único valor, das composições das conclusões de todas as regras. De acordo com Albuquerque (2020) através do método de Mamdani estabelece-se uma relação binária M entre x e u de forma a modular matematicamente a base de regras, onde através dos procedimentos descritos por Barros e Bassanezi (2010) a inferência Máx-Min é detalhada:

- Para cada uma das regras *fuzzy* a aplicação Δ (mínimo) modela a condicional “se x é A_j então u é B_j ”;
- O conectivo “e” é referenciado a partir do t-norma Δ (mínimo);
- O conectivo lógico “ou” é referenciado pelo t-conorma ∇ (máximo).

Dessa forma, a função de pertinência que relaciona o subconjunto *fuzzy* de $X \times U$ formado pela relação *fuzzy* M pode ser descrita como Eq. 22:

$$\varphi_M(X, \mu) = \max_{1 \leq j \leq r} \left(\varphi_{R_j}(X, u) \right) = \max_{1 \leq j \leq r} \left[\varphi_{A_j}(x) \Delta \varphi_{B_j}(u) \right] \quad (22)$$

Onde:

r : Número de regras que compõe a base de regras;

A_j e B_j : subconjuntos *fuzzy*;

φ_{A_j} e φ_{B_j} : graus de pertencimento de x e u aos conjuntos *fuzzy* A_j e B_j

4. Defuzzificação: Embora existam alguns métodos de defuzzificação, nesse trabalho é considerado o método do Centro de Gravidade, também conhecido como Centro de Área. Conforme descrito por Martins (2014), o método do centro de gravidade consiste no cálculo do centro de área das funções de pertinência. O procedimento ocorre através do cálculo da média das figuras que representam os graus de pertinência de um determinado subconjunto *fuzzy*.

Segundo abordado por Duarte et al. (2007), a lógica *fuzzy* possui um fator importante, que é o fato de ser pautada no raciocínio dedutivo, diferenciando-a de outras abordagens matemáticas para resolução de problemas e modelagens. Nesse tipo de lógica, os dados não são tratados de forma individual, mas sim pelo seu comportamento ou variação em conjunto, em função de certas regras que são atribuídas.

A literatura sugere que estas regras sejam as mais simples possíveis, e também não conflitantes, embora algumas vezes possam ser. A etapa de inferência trabalha justamente na avaliação das regras adicionadas ao sistema lógico, onde a resposta do sistema não é baseada numa equação, como na regressão, mas do cálculo do centro de gravidade do resultado das funções de pertinências analisadas, e as regras definidas no processo de análise. Ou seja, o sistema lógico analisa cada uma das funções de pertinência, de cada critério, e através das regras atribuídas ao sistema, realiza as operações matemáticas para gerar uma única função de pertinência, isto é, uma única curva geométrica.

A respeito das regras que são criadas nos sistemas de lógica *fuzzy*, de acordo com Silva (2008) às seguintes propriedades são esperadas:

- (i) Qualquer combinação entre as variáveis de entrada deve ativar ao menos uma regra;
- (ii) Duas ou mais regras com as mesmas entradas devem ter saídas iguais. Caso contrário, as regras são inconsistentes;

- (iii) Para todas as saídas de regras vizinhas as funções de pertinência devem apresentar interseção.

De acordo com Duarte et al. (2007), a utilização da lógica *fuzzy* é recomendada em modelagens de problemas de Engenharia, devido à simplicidade e à clareza com que os resultados são processados e expressos. No estudo de Aljicevic, Kostic e Dautbasic (2018) a lógica *fuzzy* é utilizada através do software MATLAB® para avaliar, dentre quatro localidades, a melhor para inserção de uma usina de fonte renovável. Para isso os autores avaliaram dez critérios de entrada, como: recurso eólico, recurso solar, capacidade a ser instalada, condições do terreno, custo da terra, temperatura, questões culturais e sociais, distância até a linha de transmissão, restrições aéreas e telecomunicação, distância à indústria, e então através de 100 regras lógicas avaliam as combinações e resultados.

No estudo de Souza (2018) a lógica *fuzzy* também é aplicada utilizando o *software* MATLAB® com o intuito de gerenciar a energia de um sistema híbrido *off-grid* formado por tecnologias solar fotovoltaica, baterias para armazenamento e gerador à diesel. Estudo similar ao desenvolvido por GODOY et al. (2020), onde o objetivo principal foi averiguar a melhor maneira de recarregar três baterias, e para isso utilizou a lógica *fuzzy* avaliando alguns dados de entrada, como: radiação solar, velocidade do vento e três estados iniciais de carga das baterias.

Os estudos de TAVANA et al. (2017) também tem o objetivo de trazer uma proposta para tomada de decisão na escolha de um local para construção de uma usina solar, para isso utilizaram a lógica *fuzzy* avaliando cinco critérios de entrada: distância até área residencial, irradiação solar, acesso ao projeto, distância até as rodovias e linhas de transmissão, e 37 regras lógicas do tipo ‘SE, ENTÃO’, concluindo que para seleção de um projeto de energia solar nem sempre é possível escolher aquele onde o nível de irradiação solar é o melhor, há outros importantes fatores a serem analisados.

4. METODOLOGIA

Nesse capítulo são discutidos os métodos propostos para avaliar e ranquear quais projetos eólicos em fase de operação ou construção, entre cinco propostos, são os mais atrativos para serem hibridizados através da adição de um projeto solar fotovoltaico. Este capítulo está dividido conforme etapas apresentadas na Figura 29 abaixo:

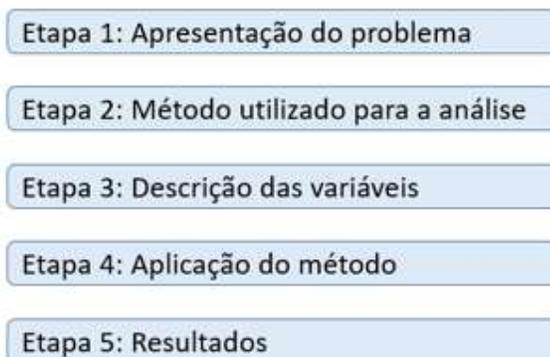


Figura 29- Etapas da Metodologia (Elaborado pelo autor, 2020)

4.1. PROBLEMA PROPOSTO

Conforme aprofundado nos capítulos 1 e 2, a seleção dos projetos eólicos candidatos a receber a inserção de uma usina solar fotovoltaica, através do modelo de associação híbrida, faz parte de um processo de tomada de decisão por parte da empresa. Diante dos avanços dos projetos híbridos no mundo, e no Brasil, é fundamental que as empresas atuantes do setor de energias renováveis, que pensam em expandir seus negócios através dos projetos híbridos, sejam capazes de definir os locais mais indicados para construção da usina solar para que, considerando o modelo regulatório atualmente em estudo por parte da EPE e demais associações do Setor Elétrico brasileiro, possam ser conectadas junto à usina eólica, compartilhando então de um único valor de MUST contratado para ambos os projetos.

A complementaridade de energia entre a usina eólica e solar depende principalmente do recurso energético da região. Com os projetos híbridos associados procura-se otimizar o uso do fio, ou seja, do sistema de transmissão, logo, pode-se dizer que o projeto ótimo é aquele em que a soma das gerações eólica e solar represente um valor total de geração próximo à capacidade máxima de escoamento da rede elétrica e MUST contratado.

Nesse trabalho são consideradas cinco usinas eólicas como possíveis de serem hibridizadas com a associação da usina solar fotovoltaica. Esses parques eólicos são reais, pertencem a empresa Enel Green Power (EGP), e atualmente estão em fase de operação, construção ou desenvolvimento. Como forma de sigilo e ética profissional, não será em nenhum momento desse estudo indicado o nome real dos projetos, assim como as coordenadas geográficas específicas de tais. Dessa forma, os projetos serão identificados como ‘Projeto A’, ‘Projeto B’, ‘Projeto C’, ‘Projeto D’ e ‘Projeto E’. Através dos resultados, são apresentados dois possíveis métodos para analisar e ranquear os projetos com maior atratividade, servindo como suporte ao processo decisório da escolha de qual usina eólica a ser hibridizada.

4.2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO

Nesse trabalho são utilizados dois *softwares* computacionais para trabalhar com o Método AHP e Lógica *Fuzzy*, onde em ambos os casos o objetivo é gerar um *ranking* de atratividade dos projetos através da classificação das melhores usinas eólicas a serem hibridizadas com usina solar fotovoltaica. É utilizado o *software* Super Decision® para a aplicação do método AHP, enquanto para a lógica *fuzzy* foi adotado o MATLAB® versão R2017b como ferramenta de implementação.

O MATLAB®, em sua versão R2017b, permite o acesso de diversas ferramentas previamente disponíveis no *software*, dentre elas a *Fuzzy Logic Toolbox*, como apresentada na Figura 30.

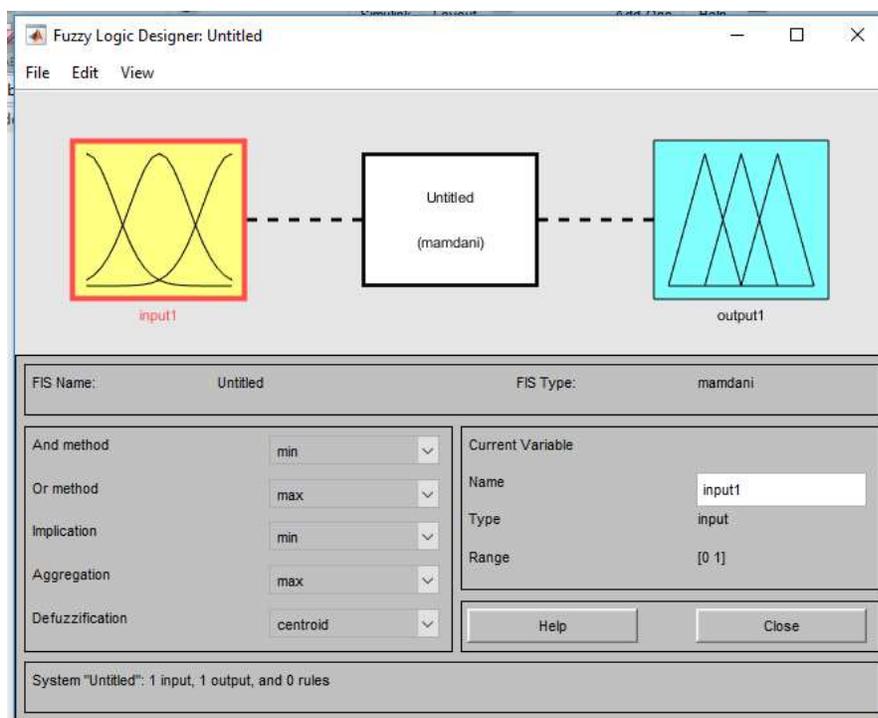


Figura 30- Menu inicial *Fuzzy Logical Toolbox* (MATLAB®, 2020)

Os conceitos básicos de utilização da *Fuzzy Logical Toolbox* que serão apresentados a seguir, tem como base o estudo de Amendola, Souza e Barros (2005). Pode-se dizer que o menu principal da *Fuzzy Logical Toolbox* do *software* é composto por: Dados de Entrada (*Input*), Controlador e Dados de Saída (*Output*).

4.3. LEVANTAMENTO DE DADOS

Essa etapa do trabalho consiste no procedimento adotado como forma de pesquisa para a coleta dos dados utilizados para resolução do problema proposto. Como descrito no item 2.3.1., em uma abordagem de múltiplos critérios é importante que os especialistas à frente de um determinado assunto possam participar do momento de levantamento e definição dos critérios e alternativas que serão analisados.

O levantamento das informações para se trabalhar com o Método AHP e Lógica *Fuzzy* foi realizado através de três perguntas e uma tabela Excel, previamente preenchida com alguns possíveis critérios sugeridos pelo autor, compartilhadas através de e-mail para 11 pessoas que trabalham na área de energias renováveis da empresa EGP, justamente com o objetivo de coletar suas opiniões referentes aos critérios que acreditam ser importantes no estudo de projetos

híbridos solar-eólico, e dentre esses, indicar quais consideram como os mais relevantes. Os especialistas que participaram desse trabalho atuam em diferentes áreas dentro da empresa, entre elas: *Business Development* (Desenvolvimento de Negócios), Engenharia Solar e Engenharia Eólica, onde todos possuem, no mínimo, três anos de experiência no setor de energias renováveis. As perguntas enviadas foram:

- Concordam com o critério escolhido para a análise?
- Qual seria o seu *ranking* de prioridades para cada um dos critérios?
- Há outros critérios que julgue ser importante para a análise? Quais?

Na Tabela 7 a seguir são apontados os critérios considerados importantes para o estudo:

Tabela 7: Critérios importantes para Projetos Híbridos

Critérios
Irradiação Solar
Velocidade do Vento
Complementaridade
CAPEX projeto Solar
OPEX
Comprimento do circuito de Média Tensão
<i>Development Fee</i>
<i>Permitting</i>
Potência do Projeto
Topografia
Área do Terreno
Questões Sociais
Acesso ao Projeto
Autorização de Conexão à Rede
TUST
Custos Arrendamento
Indisponibilidade Externa
Caracterização geotécnica
Sombra (<i>far shading losses</i>)
Direção do vento
Hidrologia
Restrições ambientais
Localização das turbinas e relação aos módulos
Albedo e temperatura local

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

Baseado nas respostas recebidas dos especialistas que participaram da pesquisa, 24 critérios foram identificados como importantes nesse estudo. A seguir, apresentam-se os detalhes de cada um dos critérios:

a. Irradiação Solar: A irradiação solar é constituída pela integração da radiação solar em um determinado período de tempo, onde de acordo com Smets et al. (2016) o dimensionamento ótimo de um sistema solar fotovoltaico depende da disponibilidade desse recurso.

b. Velocidade do Vento: A velocidade do vento está associada a velocidade que uma certa partícula de ar se move entre dois pontos determinados. Junto com sua direção, estão associadas a maior ou menor geração da usina eólica.⁸

c. Complementaridade: Este parâmetro faz referência ao quanto as fontes (eólica e solar) se complementam para um determinado projeto. Um projeto com uma boa complementaridade pode ser traduzido como um projeto onde os momentos de maior recurso eólico possuem menor recurso solar, e vice-versa.

d. CAPEX do Projeto Solar: Entende-se por CAPEX (*capital expenditure*) o dinheiro utilizado por uma empresa para construir ou adquirir uma determinada indústria, edifício, construção. Nesse caso, qual o custo total para construção da usina solar fotovoltaica.

e. Comprimento Circuito de Média Tensão: Relacionado ao comprimento do cabeamento de média tensão necessário para conectar os inversores de frequência da usina solar à subestação elevadora do parque eólico. Quanto maior a distância, maiores as perdas elétricas e custo de implantação;

f. *Development Fee*: É o custo desembolsado para o pagamento de uma empresa terceira (desenvolvedor) por ter trabalhado em diversos aspectos para desenvolver o projeto. Nem todos os projetos possuem uma empresa desenvolvedora por trás, quando o projeto é desenvolvido pela própria empresa que é dona da usina, o projeto é denominado como projeto *greenfield*.

⁸ Cada turbina eólica apresenta uma característica distinta com relação à curva de velocidade do vento e potência. Normalmente, em momentos de vento com velocidade superior a 13m/s os aerogeradores atingem seu ponto de saturação, onde mesmo com aumento da velocidade do vento a potência continua constante.

g. *Permitting*: Está associada as permissões, licenças e aprovações de entidades ambientais para que uma usina solar fotovoltaica possa ser liberada para construção.

h. Potência da usina solar: Critério referente à potência do projeto. No caso de uma usina solar fotovoltaica, a potência [MWdc] aumenta à medida que os números de painéis fotovoltaicos são instalados, enquanto a potência [MWac] aumenta ao passo que são instalados mais inversores de frequência.

i. Topografia: Critério com forte influência no custo e geração de uma usina solar fotovoltaica. Para este tipo de usina, quanto mais plano o terreno, melhor, pois assim são economizados serviços de movimentação de terra. Um terreno pouco, ou não montanhoso, proporciona também instalação simétrica dos painéis fotovoltaicos, evitando então possíveis sombreamento e redução da geração de energia elétrica.

j. Caracterização geotécnica: Item relacionado as características do solo. Em caso de um solo raso, aumentam-se os custos associados às fundações das estruturas de fixação dos módulos fotovoltaicos, e também os custos para as valas de cabos.

k. Aspectos Sociais: Questões associadas às comunidades e pessoas que vivem próximas a área da usina. Principalmente no interior do Brasil, onde a maioria dos projetos de energia renováveis são construídos, o cotidiano e vida das pessoas mudam de forma significativa durante a fase de operação do projeto, e principalmente durante a fase de construção.

l. Acesso à usina: Critério relacionado à facilidade de acesso da usina, se está próxima de centros comerciais, conectada a malha rodoviária e próxima a portos, para que o sistema logístico funcione de forma eficiente.

m. Custo de Arrendamento: Desembolso de dinheiro para compra ou arrendamento de um terreno para construção do projeto, normalmente quanto maior o terreno, maior este custo.

n. Sombreamento (*far shading*): Perdas associadas a possíveis objetos que estejam longe da usina solar, onde no início e/ou final do dia podem gerar sombras nos módulos fotovoltaicos, ocasionando em perdas ao sistema;

o. Sombreamento (*near shading*): Perdas associadas as sombras causadas por possíveis objetos que estejam próximos da usina solar, como por exemplo, os aerogeradores da usina eólica;

p. Direção do vento: Em casos onde a usina solar seja construída na frente da usina eólica, devido a mudança de rugosidade do terreno, o deslocamento da massa de ar pode ser alterado, dessa forma trazendo redução na produção do parque eólico;

q. Hidrologia: Estudo relacionado às possíveis movimentações de água em uma determinada área. É um fator importante a ser considerado na análise, visto que está associado aos riscos de instalação e operação da usina solar;

r. Restrições ambientais: Estudo referente às possíveis restrições de caráter ambiental que uma determinada área pode conter. Além de estar associado ao licenciamento ambiental, e aprovações para utilização do terreno para construção da usina solar;

s. Albedo: Valor associado a quantidade de irradiação solar que a superfície do solo pode refletir. É um valor que varia entre 0 e 1, e tem grande importância, principalmente para os projetos com utilização de módulos de tecnologia bifacial, uma vez que, quanto maior o albedo, mais irradiação está atingindo a parte posterior do módulo, logo, mais energia sendo convertida.

A partir dos resultados obtidos através da pesquisa realizada com o comitê de especialistas, esse estudo limitou-se a trabalhar com cinco critérios, conforme Tabela 8, dentre os 24 levantados, selecionando os de maior relevância ao tema segundo a ordem de prioridade vinculada a cada um dos critérios estabelecida pelos especialistas no momento do preenchimento da pesquisa. Importante enunciar que o critério ‘CAPEX’, considerado como o 3º critério mais importante segundo os especialistas, e ‘OPEX’, não entram como critérios de avaliação nesse estudo, pois ambos estão relacionados com a potência do projeto solar e, no entanto, por esse estudo não ter como objetivo selecionar a potência ótima da usina solar, entende-se que os critérios não devem ser considerados nessa análise.

Tabela 8: Critérios prioritários para análise

Critérios
Irradiação Solar
Complementaridade
Área do Terreno
Comprimento Circuito MT
Topografia

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

Outro ponto importante a ser esclarecido é que o critério ‘Velocidade do Vento’ é de total importância na verificação dos projetos a serem desenvolvidos como Híbridos, conforme também comprovado pelas respostas recebidas dos especialistas. Entretanto, nesse estudo, os projetos eólicos já estão em operação ou construção, de forma que a localização destes já está definida, tornando o critério não relevante para a análise. Caso o desenvolvimento do projeto eólico ocorresse desde a fase zero, como um projeto *greenfield*, este deveria ser um critério relevante a ser analisado.

4.4. DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM FUZZY

Uma vez que os critérios e a variável de saída foram definidos após consulta aos especialistas, a construção do modelo *fuzzy* é descrita conforme a Figura 31:

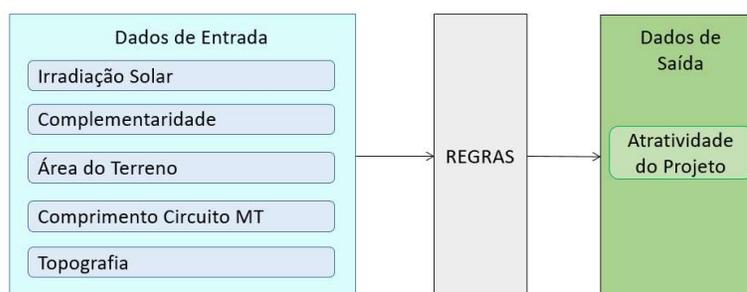


Figura 31- Variáveis do Modelo *Fuzzy* (Elaborado pelo autor, 2020)

Para elaboração das variáveis linguísticas e números *fuzzy* associados a cada um dos cinco critérios (dados de entrada) do problema, foram adotados alguns valores como premissas, que serão detalhados nos próximos parágrafos deste mesmo capítulo. A Tabela 9 indica as

variáveis linguísticas e os termos das partições *fuzzy* associados a elas. São consideradas cinco variáveis (critérios) e quatro ou três categorias (grau de pertinência), dependendo do caso.

Tabela 9: Variáveis linguísticas e graus de pertinência correspondentes

Critérios	Graus de Pertinência			
	1	2	3	4
Irradiação Solar [kWh/m ² *ano]	Baixa (0 – 1440)	Média (1300 – 2000)	Alta (1900 – 2150)	Muito Alta (>2100)
Complementaridade	Muito Baixa (0 – 4)	Baixa (3 – 7)	Média (6 – 10)	Alta (> 9)
Área do Terreno [hectares]	Pequena (0 – 2500)	Média (1500 – 4500)	Grande (>3500)	-
Comprimento Circuito MT [km]	Pequeno (0 – 7)	Médio (5 – 13)	Grande (>11)	-
Topografia [inclinação %]	Plana (0 – 3)	Moderada (2 – 8)	Montanhosa (>7)	-

Dado de Saída

Atratividade do Projeto	Baixa (0 – 40)	Moderada (30 – 70)	Alta (60 – 100)
-------------------------	-------------------	-----------------------	--------------------

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

4.4.1. Irradiação Solar

A irradiação solar é um parâmetro de grande relevância para os projetos de energia solar fotovoltaica, uma vez que possui relação direta com o valor de corrente dos módulos fotovoltaicos e, por consequência, com a produção de energia gerada na usina. Os empreendedores podem trabalhar com valores de irradiação provenientes de fontes por satélite, ou através das torres de medição, normalmente instaladas dentro da área onde o projeto fotovoltaico será desenvolvido. Existem algumas empresas especializadas no fornecimento de base de dados, onde então é possível obter, normalmente através de pagamento, dados de irradiação solar, temperatura, velocidade do vento, para muitos anos decorridos (geralmente mais de 20 anos). Esses dados podem, juntos dos dados medidos *in loco* pela torre de medição,

ser utilizados para a elaboração do chamado Ano Típico, ou seja, 1 ano de medição do recurso que mais representa toda a série histórica analisada.

No Brasil, para o cadastramento dos projetos fotovoltaicos com objetivo de participarem dos leilões de energia do governo, é necessário que o empreendedor instale ao menos uma torre de medição na área onde o projeto será desenvolvido, seguindo as instruções de acordo com o documento específico emitido pela EPE (2018), onde a torre deve medir no mínimo 1 ano do recurso. Os dados coletados são posteriormente utilizados por uma empresa externa, que é responsável por elaborar a Certificação de Dados de Medição, validando o método e dados medidos, onde então as informações são utilizadas para o cálculo da Garantia Física da usina.

A partir da Figura 32, extraída do Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira, 2017), foram verificados os valores mínimos e máximos da Irradiação Global Horizontal [*Global Horizontal Irradiation* – GHI] média diária no Brasil, para servir de premissas para arbitrar as variáveis linguísticas e seus termos de partição, que foram definidos como: Baixa, Média, Alta, Muito Alta.

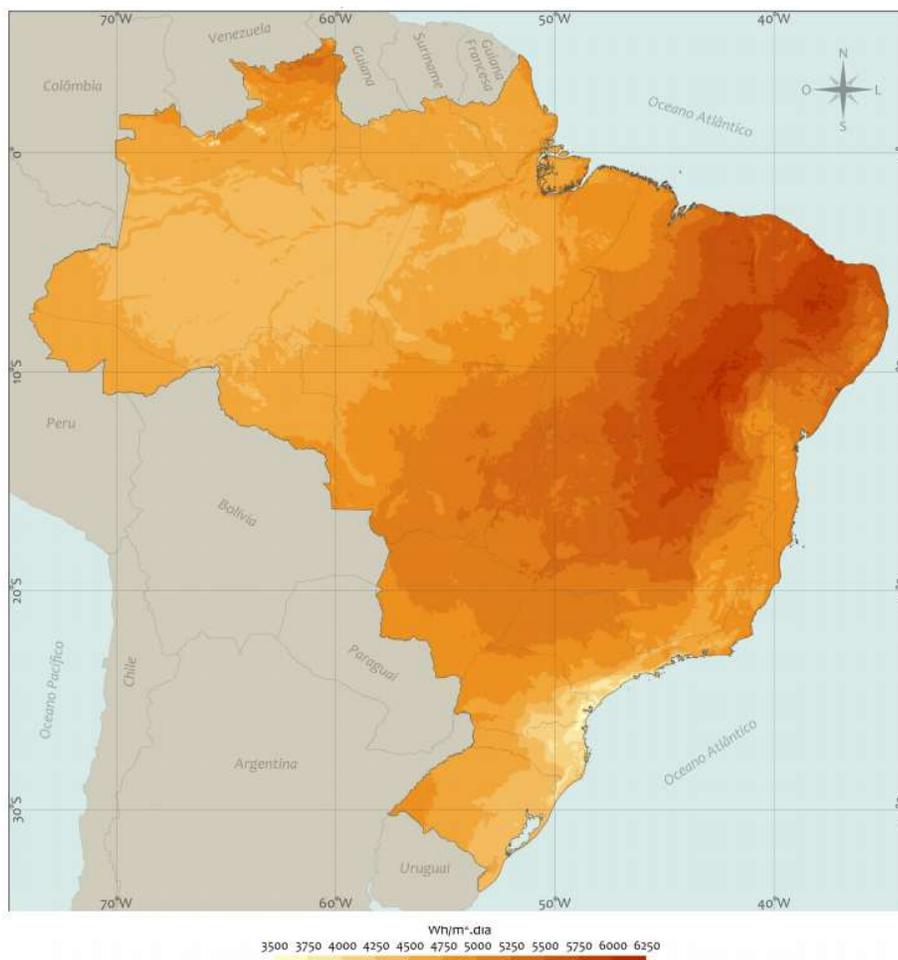


Figura 32- Irradiação Global Horizontal média (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017)

Segundo a escala do mapa, foi considerado que o termo BAIXA se enquadra entre 0-4000 Wh/m²*dia, MÉDIA a 4000-5250, ALTA a 5250-6000 e MUITO ALTA para >6000. Os números foram transformados em kWh/m²*ano multiplicando os valores por 365 dias, divididos por 1000.

A Figura 33 apresenta os valores adicionados ao software MATLAB® onde, então, as funções de pertinências do tipo triangulares foram moldadas. Quando o valor atribuído a Irradiação Solar for de, por exemplo, 1380 kWh/m²*ano, este valor pertence tanto à partição do tipo Baixa quanto do tipo Média. No caso de uma irradiação de valor 1900 kWh/m²*ano, o valor pertence à partição Média e Alta.

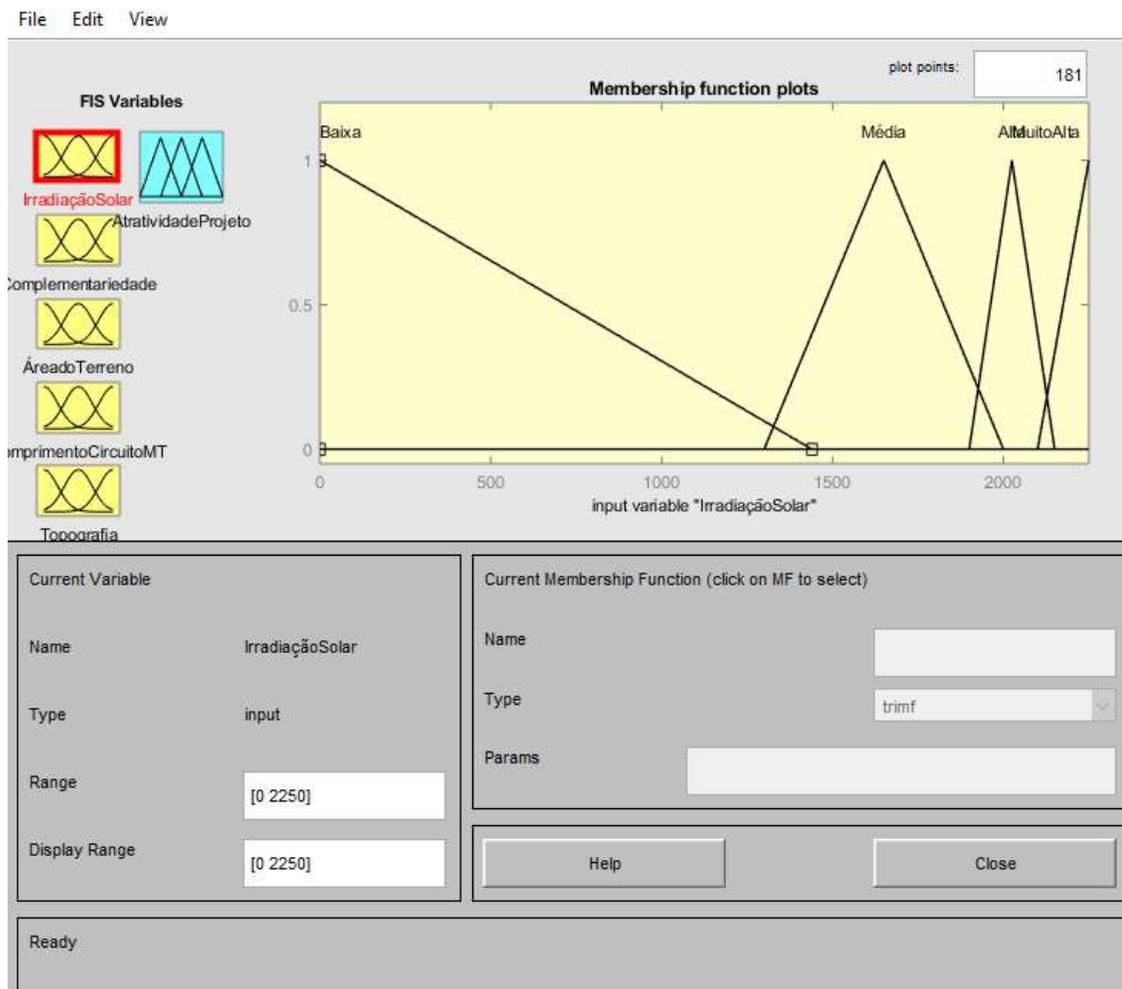


Figura 33- Função de pertinência do critério Irradiação Solar (Elaborado pelo autor, 2020)

Por meio da Tabela 10 é possível identificar os números *fuzzy* e as variáveis linguísticas adotados para o critério Irradiação Solar:

Tabela 10: Variáveis linguísticas - critério Irradiação Solar

Critério	Irradiação Solar		
Variável Linguística	Números <i>fuzzy</i> associados		
Baixa	-	0	1440
Média	1300	1650	2000
Alta	1900	2025	2150
Muito Alta	2100	2250	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

4.4.2. Complementaridade

O parâmetro complementaridade é, sem dúvida, o elo que une os projetos solares fotovoltaicos aos projetos eólicos. É através da complementaridade que se objetiva a otimização do uso do sistema de transmissão de energia elétrica. Dizer que a geração da usina solar fotovoltaica é complementar à usina eólica significa dizer que nos momentos de menor geração de uma das fontes, a outra está gerando mais, ou, quando um recurso aumenta, o outro diminui.

Quanto maior a complementaridade entre as duas fontes de energia, menores são os efeitos da sazonalidade inter e intra-anual da geração total. Em outras palavras, fontes complementares possibilitam o achatamento da curva de geração de energia elétrica, deixando-as o mais próximo possível, e em maior quantidade de tempo, de sua potência nominal. A Figura 34 apresenta o efeito da complementaridade entre uma usina solar fotovoltaica e eólica no estado do Rio Grande do Norte, exposto em um dos relatórios elaborado por consultoria especializada MRTS Consultoria (2019).

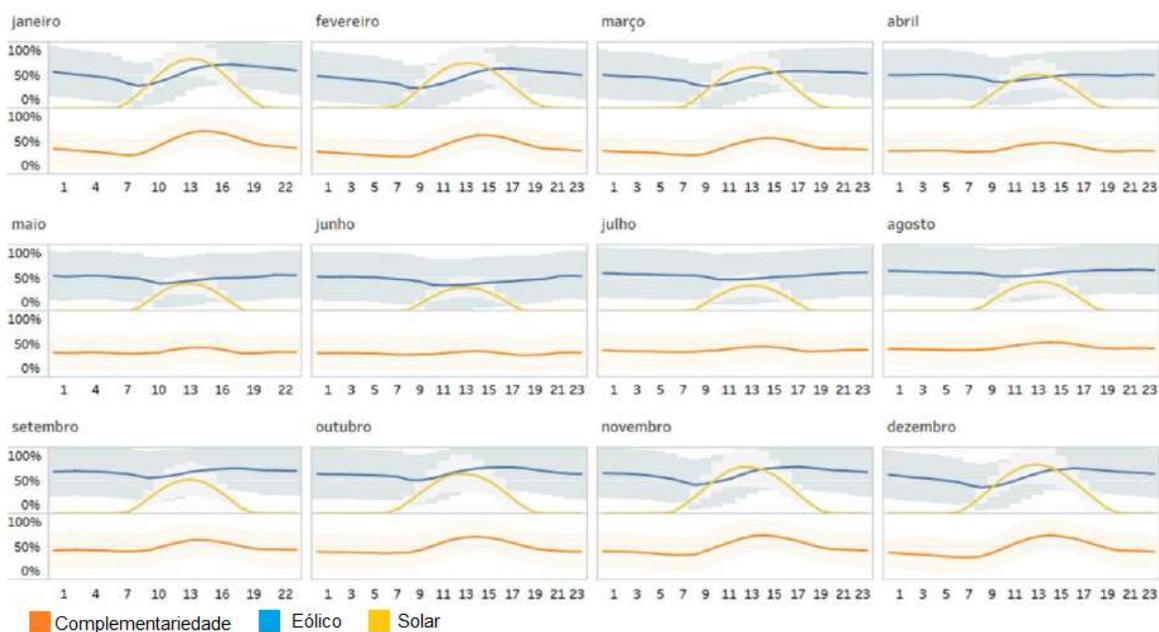


Figura 34- Análise das médias horárias de geração solar, eólica e complementaridade (Adaptado de MRTS Consultoria, 2020)

Nesse trabalho, para definição das variáveis linguísticas e números *fuzzy* associados ao critério ‘Complementaridade’ foi necessário elaborar um artifício de análise, através das curvas

do recurso solar e eólico para cada um dos projetos, para então poder distinguir quais projetos, a princípio, proporcionam uma complementaridade maior ou menor.

Os dados de irradiação solar foram coletados através das plataformas Solargis⁹, onde 20 anos de medição horária foram verificados, e através destes dados foi criado o chamado Ano Típico, ou seja, 1 ano de medição com 8760 valores horários mais representativos para a série histórica de 20 anos. Um exercício similar foi realizado com os dados de velocidade do vento (m/s@100m de altura) obtidos através da plataforma Vortex¹⁰, onde foram considerados 30 anos de dados para a série histórica, e como ano típico considerou-se a média diária anual do recurso.

Para verificação da complementariedade de cada um dos projetos foi definido que, todo intervalo de tempo em que a usina eólica não está operando com o máximo do recurso eólico disponível, e há irradiação solar, então existe margem para complementaridade das energias. Mediante as séries históricas do recurso solar e eólico obtidos para cada uma das usinas, foi realizada a normalização dos seus respectivos valores, conforme Eq.23, com objetivo de apresentar os valores em uma escala comum, sem que haja diferenças nos intervalos dos valores.

$$X = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (23)$$

Os gráficos e cálculo das áreas a seguir foram processados através do software MATLAB®, e a leitura que se faz é a de que, quanto maior o valor da área em ‘verde’, maior a complementaridade para o projeto, pois essa área envolve exatamente os intervalos onde há recurso solar e ao mesmo tempo margem para aumentar a produção conjunta de ambas as plantas, uma vez que a eólica não está mais operando no ponto de maior velocidade do vento, representando o valor de potência nominal da planta.

Abaixo são apresentadas as curvas dos recursos e complementaridade para cada um dos cinco projetos:

⁹ www.solargis.com

¹⁰ www.vortexfdc.com

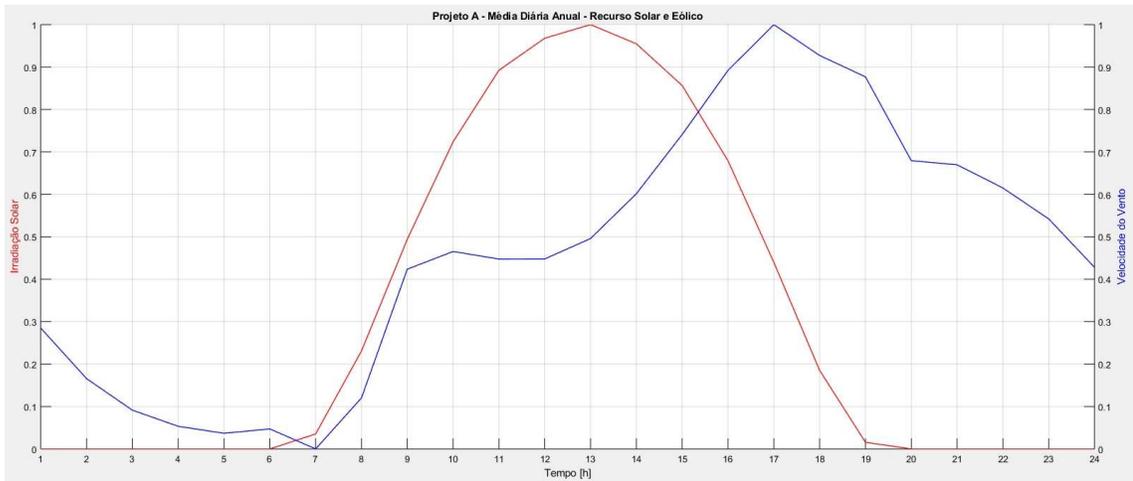


Figura 35- Curva do recurso do Projeto A (Elaborado pelo autor, 2020)

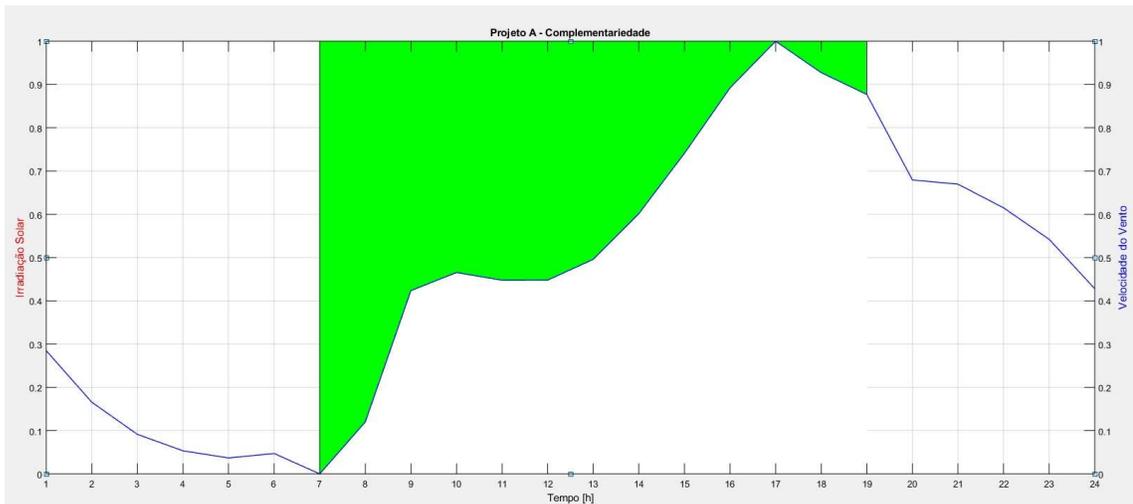


Figura 36- Curva da complementaridade do Projeto A (Elaborado pelo autor, 2020)

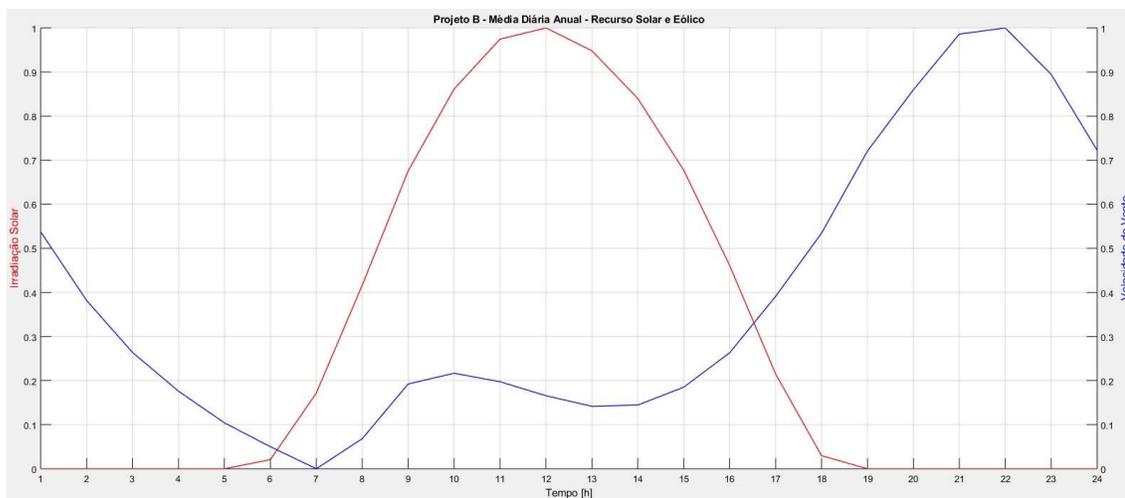


Figura 37- Curva do recurso do Projeto B (Elaborado pelo autor, 2020)

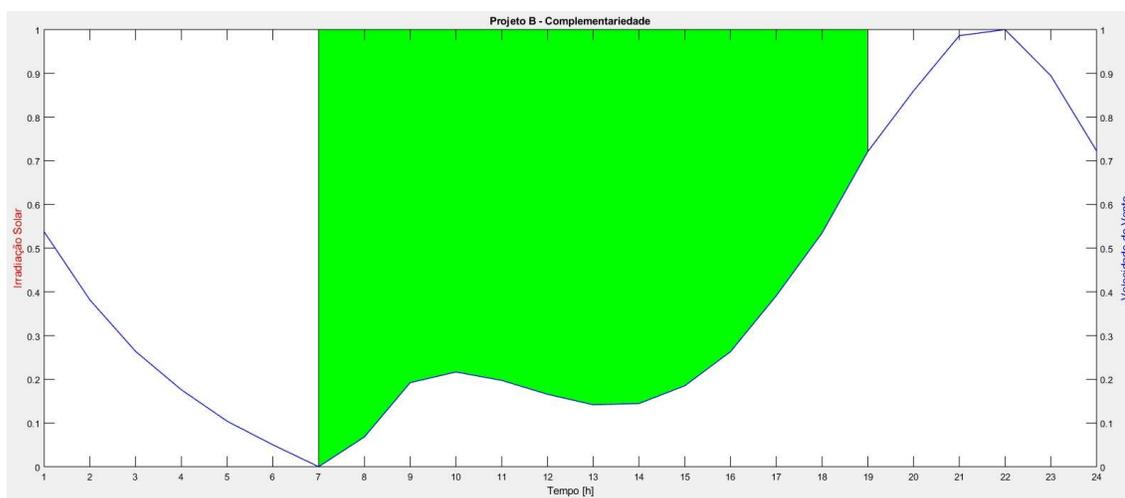


Figura 38- Curva da complementariedade do Projeto B (Elaborado pelo autor, 2020)

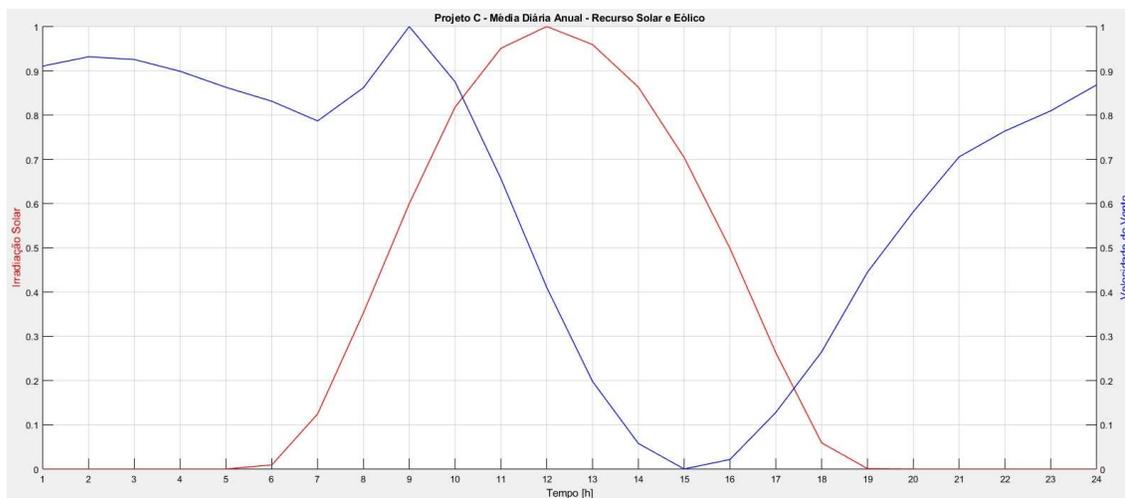


Figura 39- Curva do recurso do Projeto C (Elaborado pelo autor, 2020)

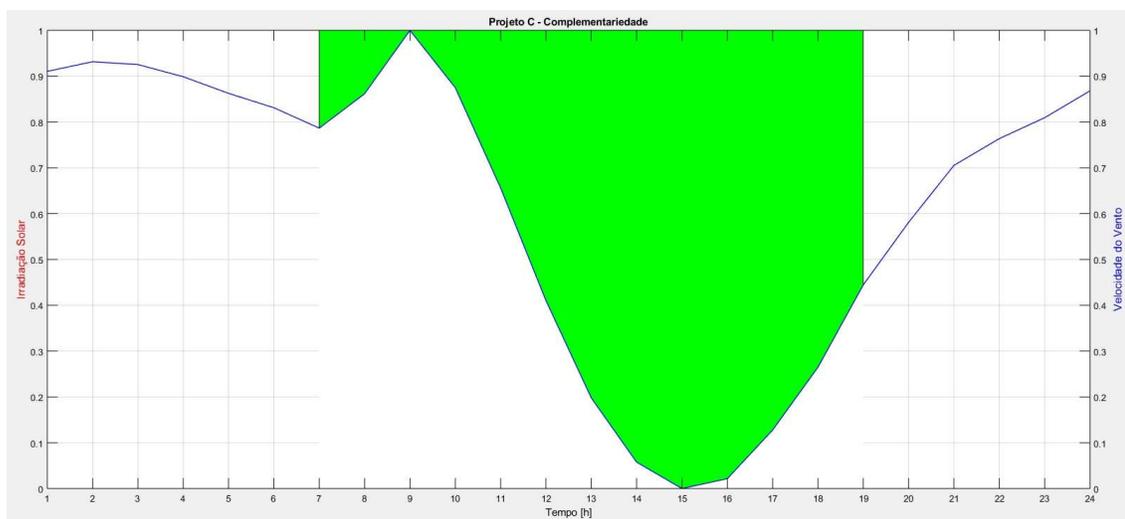


Figura 40- Curva da complementariedade do Projeto C (Elaborado pelo autor, 2020)

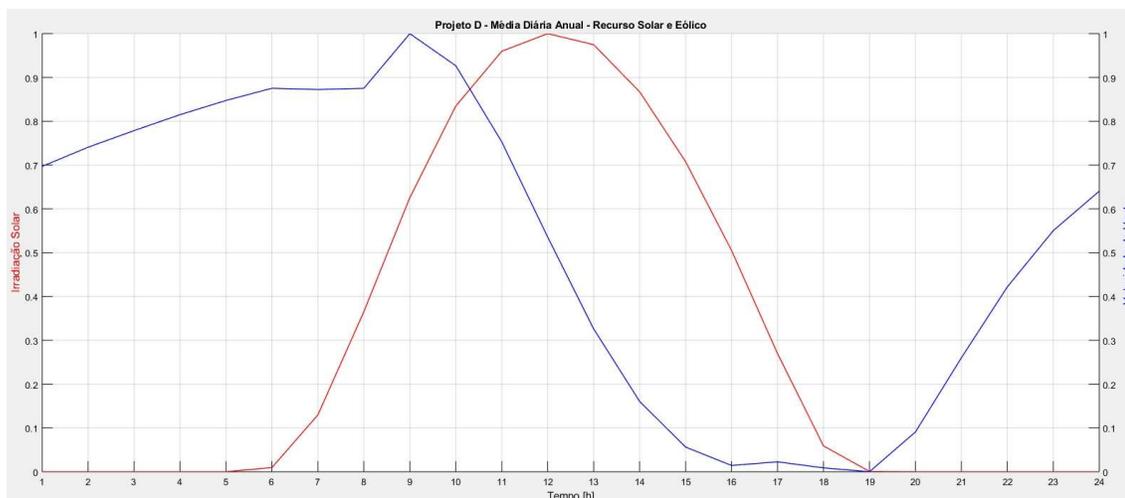


Figura 41- Curva do recurso do Projeto D (Elaborado pelo autor, 2020)

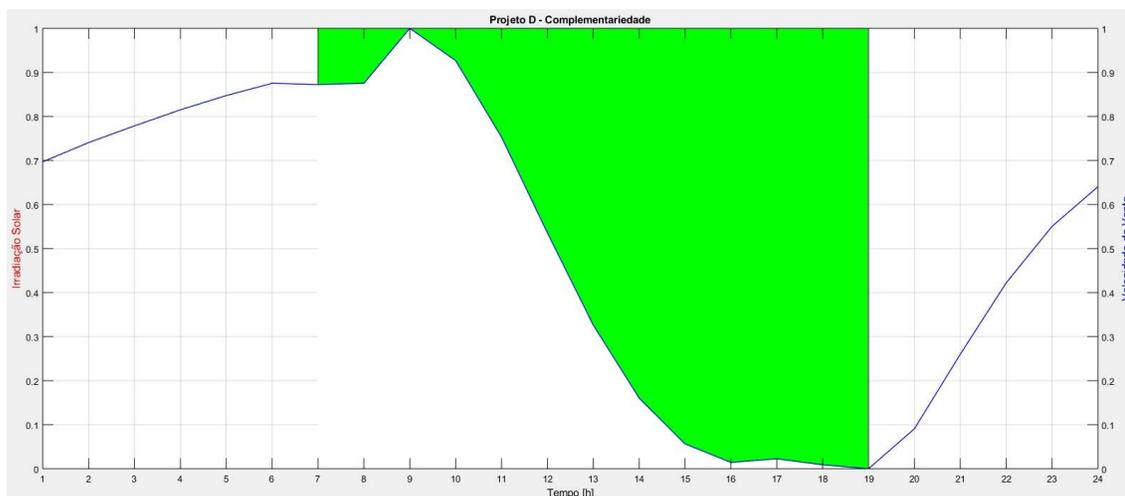


Figura 42- Curva da complementariedade do Projeto D (Elaborado pelo autor, 2020)

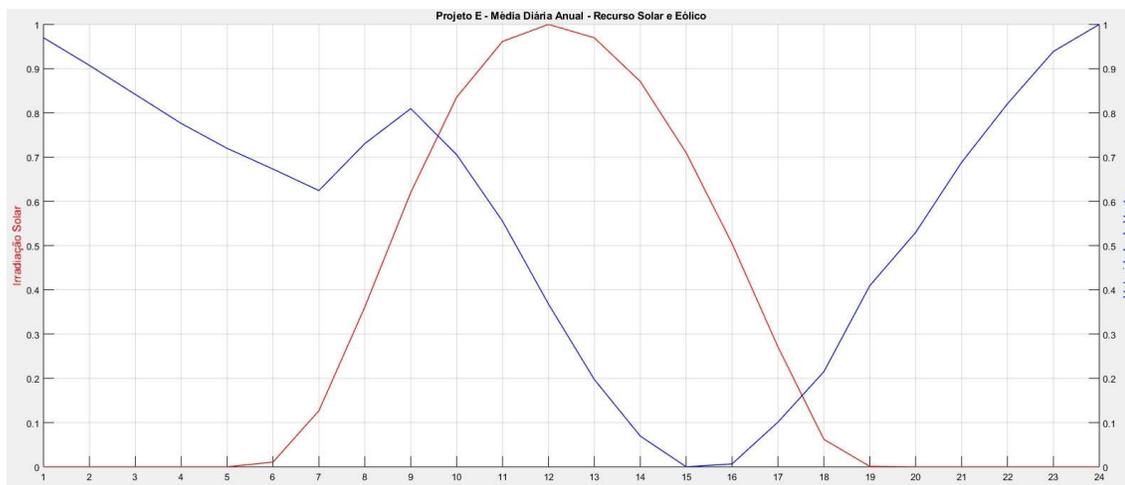


Figura 43- Curva do recurso do Projeto E (Elaborado pelo autor, 2020)

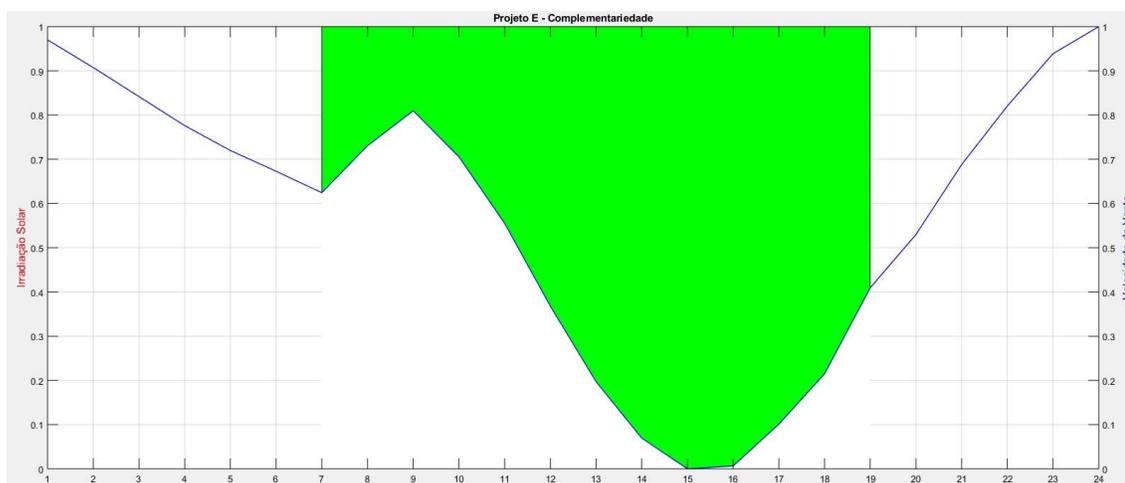


Figura 44- Curva da complementaridade do Projeto E (Elaborado pelo autor, 2020)

O valor da área de complementaridade encontrado após o cálculo de integração é:

- Projeto A: 4,99
- Projeto B: 9,14
- Projeto C: 6,91
- Projeto D: 6,88
- Projeto E: 7,72

Através dessa abordagem procurou-se caracterizar o que seria considerado como uma complementaridade: MUITO BAIXA, BAIXA, MÉDIA e ALTA, sem precisar entrar no detalhe da produção de energia e possível *curtailment* dos projetos, pois ambos parâmetros estão associados à potência da usina solar, valor este que não é avaliado na análise preliminar. Desta forma, analisando a complementaridade exclusivamente através da verificação do recurso energético, se estabelece que não existe necessidade da definição da potência para o projeto solar nessa etapa inicial de avaliação, possibilitando ao empreendedor verificar a relação de complementaridade de cada projeto e, em uma análise posterior, o estudo mais aprofundado a respeito do valor ótimo da potência para a usina solar.

O conceito de *curtailment* está diretamente associado à potência do projeto solar que seria conectado junto à eólica, e o objetivo desse trabalho é abordar quais projetos são os mais atrativos para serem hibridizados, e não qual a potência ótima a ser considerada para a usina solar. Não há dúvidas de que o valor da potência ótima para a usina solar tem total relevância para o empreendedor, e que deve ser verificado após definição do local de construção da usina, no entanto não é objeto de estudo nesse trabalho. Para esse tipo de análise, possíveis modelos relacionados ao Método de Monte Carlo e Programação Não-Linear poderiam ser adotados, conforme exposto por Antunes (2020).

As funções de pertinência para o critério ‘Complementaridade’ são apresentadas na Figura 45:

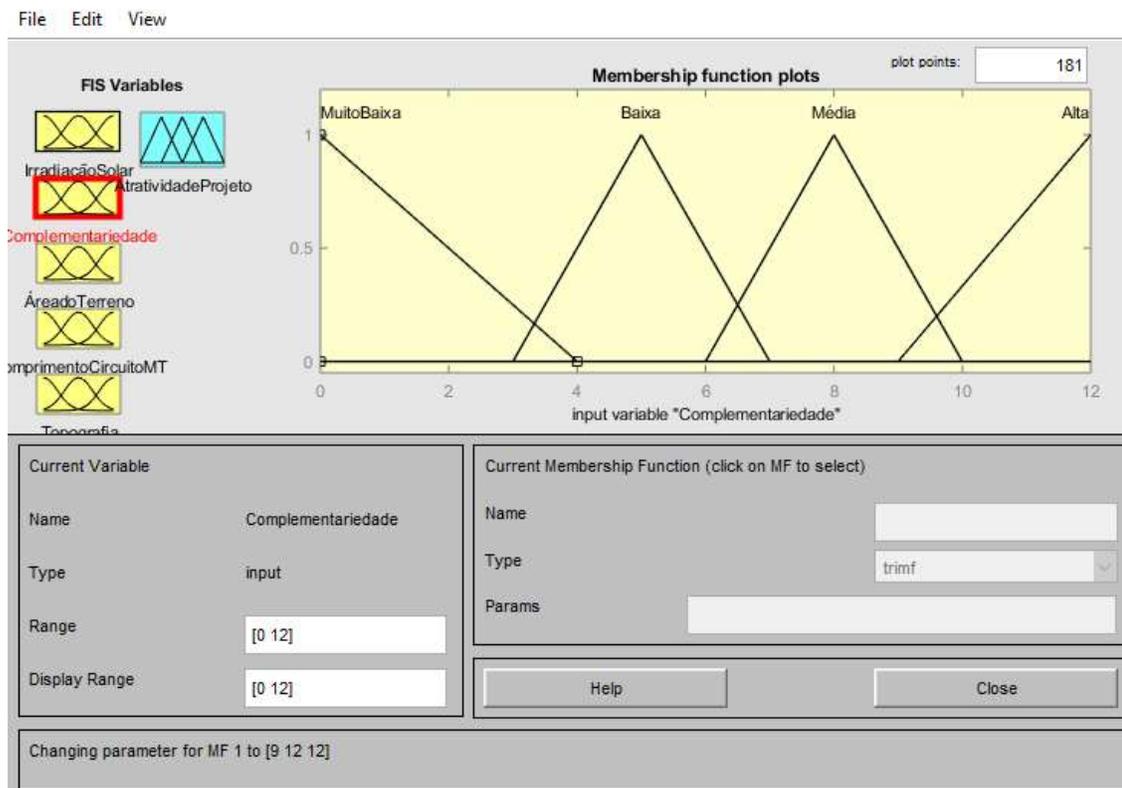


Figura 45- Função de pertinência do critério Complementariedade (Elaborado pelo autor, 2020)

Os números *fuzzy* adotados têm como referência os valores das áreas de complementaridade encontradas para cada um dos projetos avaliados. Foi definido como valor máximo de complementaridade o valor 12, correspondendo a área máxima de um polígono variando no eixo x de 7h às 19h com eixo y de valor unitário, representando 100% de complementaridade, e a partir dessa definição estabeleceu-se a relação entre valor da área de complementaridade de cada curva e as variáveis linguísticas, conforme apresentado na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11: Variáveis linguísticas - critério Complementariedade

Critério	Complementariedade		
Variável Linguística	Números <i>fuzzy</i> associados		
Muito Baixa	-	0	4
Baixa	3	5	7
Média	6	8	10
Alta	9	12	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

4.4.3. Área do Terreno

Entende-se por Área do Terreno à área total disponível para construção da usina solar fotovoltaica. Os principais benefícios vinculados ao aumento da área destinada à construção da usina são: (i) Quanto maior a área, mais equipamentos podem ser instalados, logo, maior a potência; (ii) Terrenos maiores permitem mais margens de manobra caso seja necessário realizar algum tipo de construção secundária na usina, como por exemplo, bacias de contenção, banco de capacitores e depósitos de armazenamento; e (iii) Quando se trabalha em terrenos maiores é possível aumentar a distância entre as fileiras de estruturas de módulos, ou o chamado *pitch*, dessa forma diminuindo os efeitos de sombreamento mútuo entre os módulos (*near shading losses*) e também, em caso de projetos com tecnologia bifacial, aumentar os ganhos devido a maior quantidade de irradiação difusa refletida pelo solo que atinge a face posterior do módulo fotovoltaico.

Para definição dos números *fuzzy* e variáveis linguísticas para o critério ‘Área do Terreno’ dentro do software MATLAB®, foram utilizados os números reais das áreas de cada um dos projetos que está sendo avaliado, onde verificou-se que o Projeto C é o que possui maior área, com 5000 hectares. Dessa forma, foi adotado como premissa que as áreas dos projetos podem variar de 0 – 6000 hectares, e através desse *range* que as variáveis linguísticas e funções de pertinência associadas ao critério de análise ‘Área do Terreno’ foram definidas, como PEQUENA 0 – 2000 hectares, MÉDIA 2000 – 4000 hectares e GRANDE > 4000 hectares

As funções de pertinência são apresentadas de acordo com a Figura 46 a seguir:

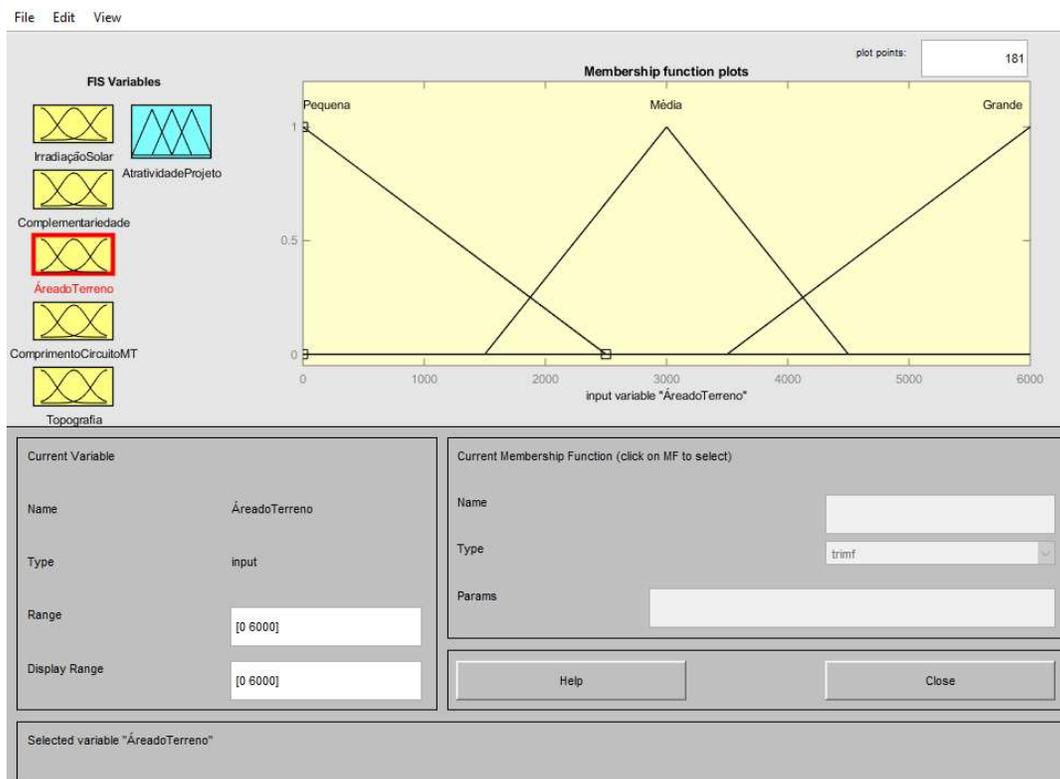


Figura 46- Função de pertinência do critério Área do Terreno (Elaborado pelo autor, 2020)

Tabela 12: Variáveis linguísticas - critério Área do Terreno

Critério	Área do Terreno		
Variável Linguística	Números <i>fuzzy</i> associados		
Pequena	-	0.00	2500
Média	1500	3000	4500
Grande	3500	6000	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

4.4.4. Comprimento Circuito MT

Um dos benefícios que os sistemas híbridos proporcionam é o de tornar mais eficiente os investimentos de acesso à rede de transmissão. Nesse estudo, em específico, como a análise parte de projetos eólicos já em operação, os custos de construção de rede para conectar a usina à rede básica já foram realizados. Dessa forma, ao hibridizar esta planta, com a adição de uma usina solar, passa a ser necessário apenas o investimento no circuito de média tensão, para levar

todos os cabamentos de média tensão entre os inversores até a subestação da usina eólica, para que o nível de tensão seja então elevado de MT/AT. Caso as usinas fossem estabelecidas de forma individual, a implantação da usina solar requereria investimentos muito superiores, de expansão da rede.

O circuito de média tensão pode ter topologias distintas, como aérea ou subterrânea, onde a solução pode variar de projeto para projeto de acordo com as restrições existentes, com os custos inerentes a cada uma das opções e as perdas associadas às distâncias. Por parte do empreendedor, o benefício maior é quando o comprimento do circuito é pequeno, pois assim as perdas (ôhmicas e indutivas), como também os custos, são reduzidos.

Assim como para os critérios ‘Complementaridade’ e ‘Área do Terreno’, as variáveis linguísticas e números *fuzzy* associadas ao critério ‘Comprimento Circuito MT’ são definidas a partir dos números reais do comprimento do circuito de média tensão para cada um dos cinco projetos, onde o Projeto D é o que apresenta o maior circuito, com 15 km de cabos para conexão da usina solar fotovoltaica até a subestação da usina eólica. Partindo desse valor, foi adotado como premissa que o *range* de avaliação do critério está entre 0km – 20 km, e então foi adotado as seguintes variáveis linguísticas: PEQUENO 0 – 6 km, MÉDIO 6 – 12 km e GRANDE > 12 km. As funções de pertinência são apresentadas na Figura 47:

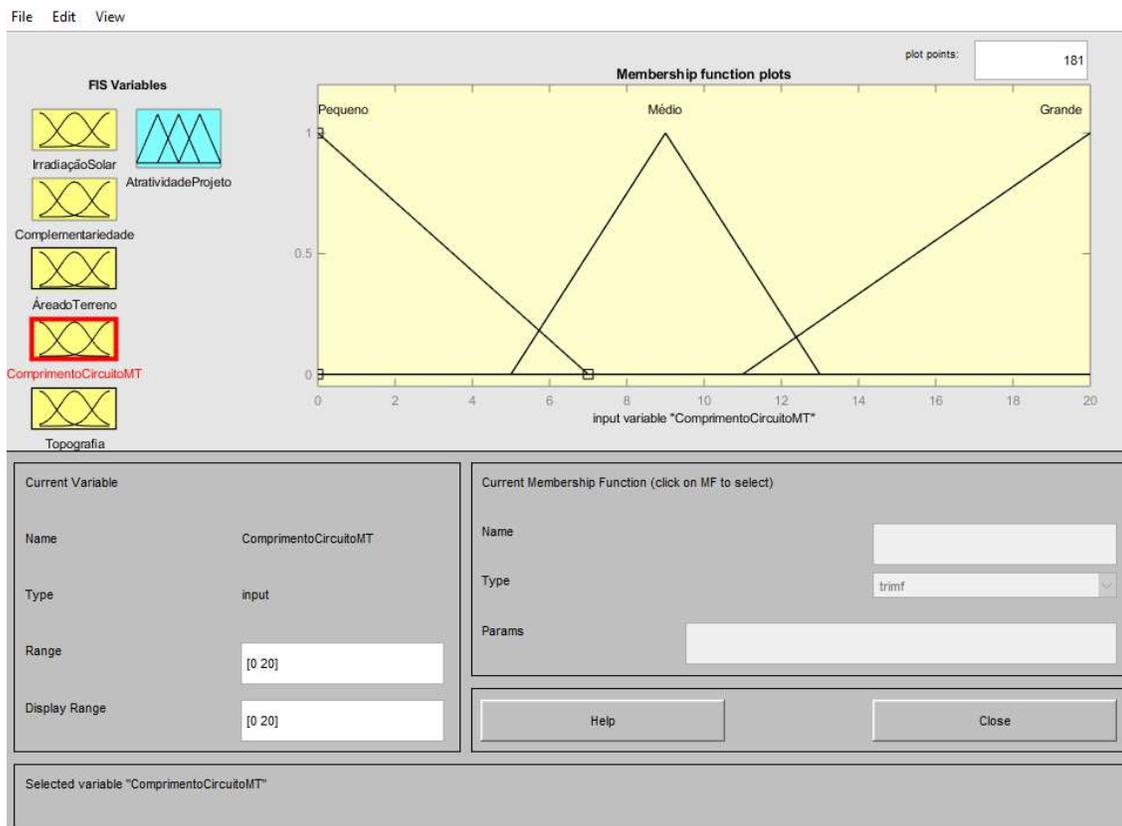


Figura 47- Função de pertinência do critério Área do Terreno
(Elaborado pelo autor, 2020)

Os números *fuzzy* e as variáveis linguísticas adotadas para o critério 'Comprimento Circuito MT' são descritos conforme Tabela 13 a seguir:

Tabela 13: Variáveis linguísticas - critério Comprimento do Circuito MT

Critério	Comprimento Circuito MT		
Variável Linguística	Números <i>fuzzy</i> associados		
Pequeno	-	0	7.0
Médio	5.0	9.0	13.0
Grande	11.0	20	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

4.4.5. Topografia

Os estudos topográficos do terreno, onde uma determinada usina solar será construída, são cruciais para o sucesso na fase de projeto e instalação do empreendimento. Junto dos estudos ambientais, os estudos topográficos auxiliam no momento da escolha do local apropriado para o desenvolvimento do projeto.

Dentre os parâmetros que podem ser avaliados através de uma análise topográfica completa, os principais utilizados nos estudos das usinas solares são inclinação (percentual da declividade), sondagem e estudos hidrológicos. Entende-se por declividade a inclinação do terreno com relação ao seu plano horizontal, por sondagem a análise da composição do solo e por estudos hídricos as medições e levantamentos a respeito das possíveis zonas de alagamento e fluxo da água no terreno.

Para projetos de energia solar, procura-se trabalhar em áreas planas, ou seja, com valores de declividade muito baixos, dessa forma os painéis fotovoltaicos da usina podem ser instalados praticamente com mesmo ângulo, reduzindo assim perdas de geração devido à sombreamento (*near shading*) que uma fileira de painéis pode causar na outra, e também redução de perdas por *mismatching*¹¹.

Os estudos de sondagem são importantes na identificação das camadas do solo que estão abaixo da camada superficial, onde os resultados auxiliam a identificar as áreas mais aconselháveis para instalação das estruturas de fixação da usina fotovoltaica. Dependendo do tipo do solo, a instalação pode ser muito custosa, pois necessita de etapas adicionais para perfuração do solo e então fixação das estacas, onerando assim o CAPEX do projeto.

Por fim, porém não menos importante, estão os estudos hidrológicos, com objetivo principal de checar possíveis regiões de alagamento e fluxos de água a partir das chuvas. A vida útil estimada de uma usina fotovoltaica é de cerca de 25 anos, então é primordial que esses estudos contemplem também os possíveis efeitos para anos à frente. Os resultados dessa análise suportam na identificação dos melhores setores dentro da área total para construção da usina fotovoltaica, como também no dimensionamento do sistema de drenagem do projeto.

Como definição do critério ‘Topografia’, nesse estudo o foco será relacionado à inclinação do terreno, ou seja, os estudos de sondagem e hidrológicos não entram na análise.

¹¹ Perdas de *Mismatching* estão associadas a perdas que ocorrem a partir das conexões entre painéis fotovoltaicos com diferentes características elétricas, podendo ser verificadas pela identificação da curva I-V através de testes de laboratório. Em casos onde a *string* possua módulos conectados em série que estão sob efeitos de irradiação solar diferentes, o que pode ser causado pela diferença no ângulo dos painéis a partir da irregularidade do terreno, esse tipo de perda pode ser intensificado na usina.

Para verificação de forma preliminar, porém útil, da inclinação de uma certa área é possível utilizar o software Google Earth®, globalmente comercializado, onde através da Figura 48 é verificada a inclinação, como exemplo, entre dois pontos quaisquer selecionados no terreno.

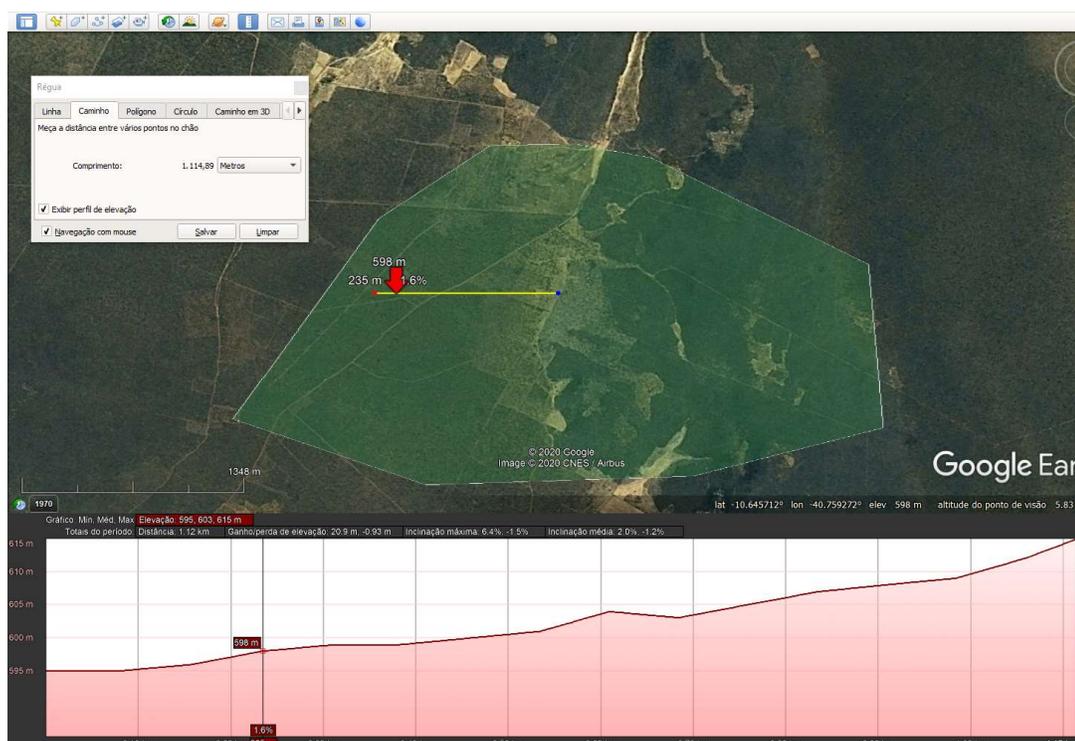


Figura 48- Inclinação do terreno (Google Earth, 2020)

Foram estabelecidas três variáveis linguísticas para tratar o critério ‘Topografia’: Plana ($0 - 3^\circ$), Moderada ($3^\circ - 10^\circ$) e Montanhosa ($>10^\circ$), apresentadas na Tabela abaixo. Esses valores de premissa são definidos com base na metodologia utilizada pelo time de desenvolvimento de negócios da empresa EGP. As funções de pertinência são apresentadas na Figura 49 e, em seguida, as variáveis linguísticas e números *fuzzy* associados na Tabela 14.

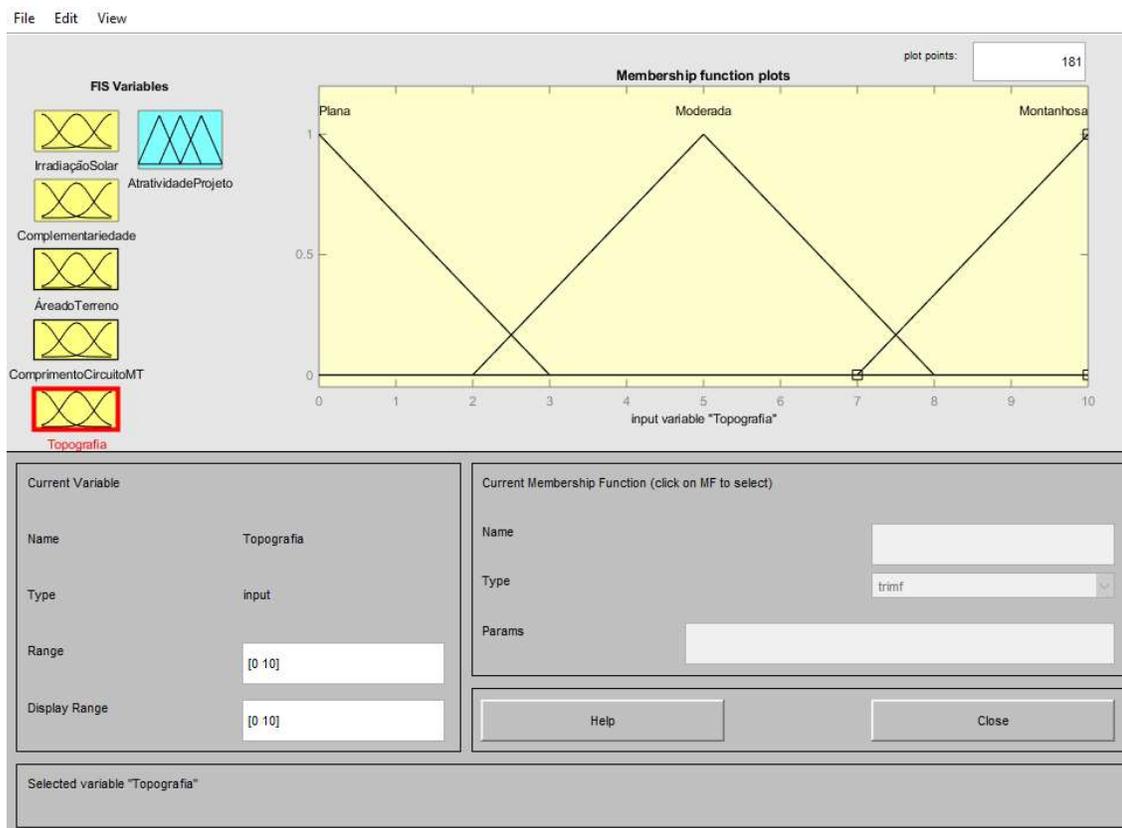


Figura 49- Função de pertinência do critério Topografia
(Elaborado pelo autor, 2020)

Tabela 14: Variáveis linguísticas - critério Topografia

Critério	Topografia		
Variável Linguística	Números <i>fuzzy</i> associados		
Plana	-	0	3
Moderada	2	5	8
Montanhosa	7	10	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

4.4.6. Atratividade do Projeto

A 'Atratividade do Projeto' é a variável de saída do modelo *fuzzy*, criado para este projeto, e possui três variáveis linguísticas: BAIXA, MODERADA e ALTA. Uma escala de 0 – 100 é considerada para avaliar a variável de saída, onde quanto maior o valor da variável de saída, maior a atratividade do projeto.

A Figura 50 apresenta as variáveis linguísticas e as respectivas funções de pertinência associadas à variável de saída, enquanto a Tabela 15 expõe as variáveis linguísticas e números *fuzzy* associados.

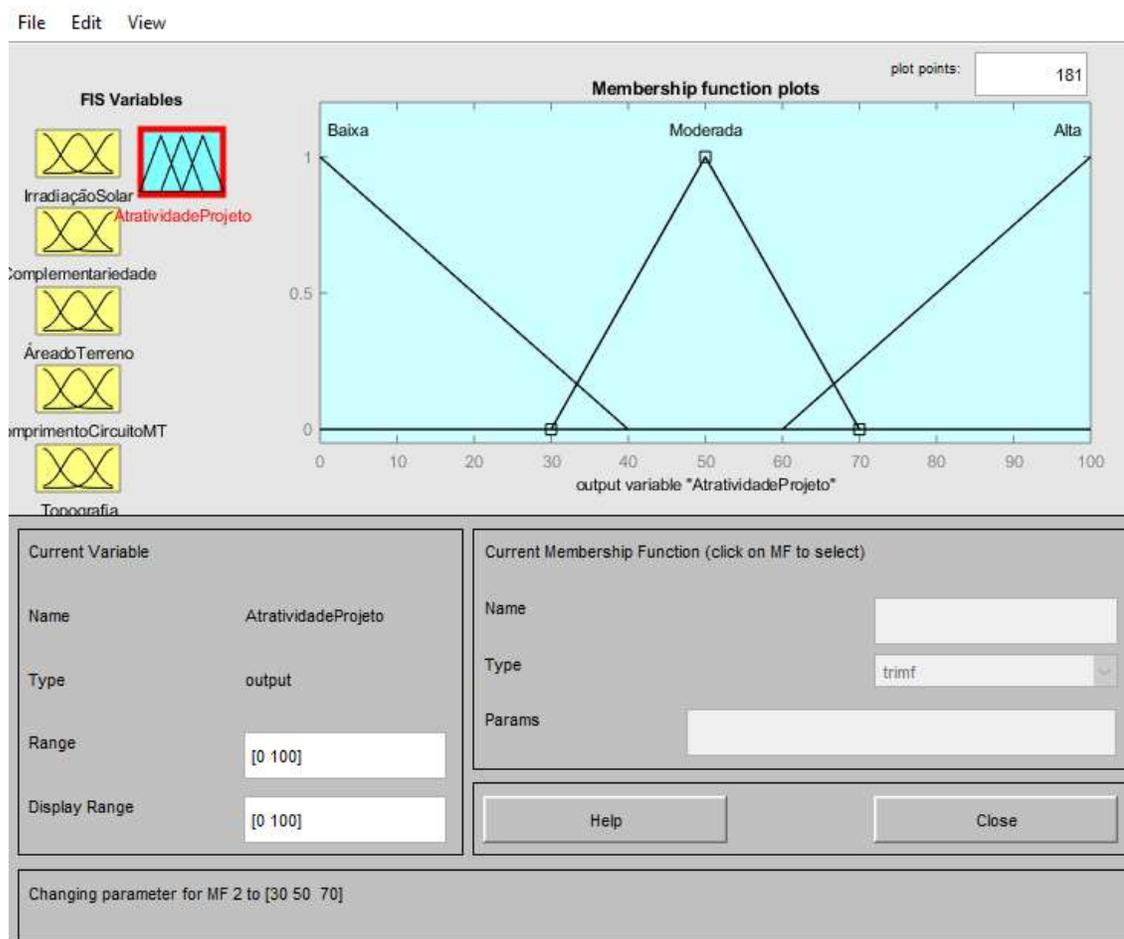


Figura 50- Função de pertinência da variável de saída
(Elaborado pelo autor, 2020)

Tabela 15: Variáveis linguísticas – variável de saída

Variável Linguística	Critério		
	Atratividade		
	Números <i>fuzzy</i> associados		
Baixa	-	0	40
Moderada	30	50	70
Alta	60	100	-

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

4.5. REGRAS LÓGICAS

A construção das regras lógicas é uma etapa muito importante na modelagem *fuzzy*, pois é o momento onde sucede a relação de combinação entre as variáveis linguísticas adotadas para cada um dos critérios da análise, como também o julgamento, ou seja, a atribuição de um resultado, também utilizando variáveis linguísticas, para cada regra lógica avaliada no modelo. No caso desse estudo, o julgamento consiste em classificar cada uma das regras lógicas com base em sua atratividade, sendo BAIXA, MODERADA ou ALTA.

Conforme mencionado no capítulo 3, nesse trabalho é adotado o método de Mamdani como sistema de inferência *fuzzy* do modelo, por duas razões: (i) é um método que já está inserido no software MATLAB®; (ii) é um método eficaz e adequado à intuição humana. Conforme abordado por Silva (2008) este método facilita a utilização e construção das regras, uma vez que as aproxima do modo com que são expressas diariamente pelos especialistas da área de conhecimento em questão.

Para o estudo são avaliados cinco critérios, onde dois estão associados a quatro variáveis linguísticas e os demais a três, desta forma, a quantidade de regras possíveis para serem utilizadas no modelo é justamente formada pela permutação do número de variáveis linguísticas disponíveis, nesse caso $4 * 4 * 3 * 3 * 3 = 432$ regras, apresentadas na tabela do Apêndice 1 desse trabalho. Para o julgamento de cada uma das 432 regras lógicas geradas, foi considerada a opinião de um membro do comitê, ou seja, esse especialista respondeu a 432 possíveis combinações nas quais julgava a atratividade de cada regra proposta.

4.6. RESULTADOS MÉTODO LÓGICA FUZZY

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos através da Lógica *Fuzzy*. Um total de cinco usinas eólicas foram avaliadas, em diferentes localidades, e os valores quantitativos para cada um dos seus respectivos cinco critérios analisados são expostos na Tabela 16 abaixo.

Tabela 16: Variáveis de Entrada

Projeto	Estado	Irradiação Global Horizontal [kWh/m ² *ano]	Complementaridade	Área do Terreno [ha]	Comprimento Circuito MT [km]	Topografia [inclinação média]
Projeto A	RN	2145	4,99	490	5,5	0,95%
Projeto B	PE	2120	9,14	420	3,5	3%
Projeto C	BA	2228	6,91	5.000	7,0	1%
Projeto D	PI	2191	6,88	900	15,0	0,8%
Projeto E	BA	2126	7,72	4.000	5,0	4,3%

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

Os valores apresentados na tabela foram utilizados como entradas no sistema *fuzzy*, após definição das 432 regras lógicas e definição das funções de pertinência para cada um dos critérios. Em seguida, foi realizado o processo de defuzzificação, obtendo-se dados numéricos, logo, permitindo classificar os valores com relação à atratividade do projeto. No apêndice 2 são apresentadas as telas de saída do MATLAB® com os resultados dessa etapa para cada uma das cinco simulações realizadas.

A Tabela 17, a seguir, revela os valores de atratividade para cada um dos projetos após simulação:

Tabela 17: Resultados Lógica *Fuzzy*

Projeto	Estado	Atratividade do Projeto (432 regras)
Projeto A	RN	82,3
Projeto B	PE	82,5
Projeto C	BA	84,4
Projeto D	PI	84,2
Projeto E	BA	82,1

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

Todos os cinco projetos apresentaram resultados que os enquadram como projetos de atratividade ‘ALTA’, uma vez que os valores estão entre 75-100. Desta forma, neste caso, quanto maior o valor de saída correspondente à atratividade do projeto, melhor classificado este está.

Com isso, finaliza-se nesse ponto a classificação dos projetos através da utilização da Lógica *Fuzzy*. Em seguida, é apresentada a segunda metodologia de classificação, com o intuito de verificar se os resultados encontrados, em ambas as simulações, são convergentes, demonstrando se há consistência nas metodologias propostas para a temática.

4.7. DESENVOLVIMENTO MODELAGEM AHP

O método AHP foi descrito no item 3.1.1, onde é explicado o processo de criação da matriz *pairwise comparison* através das comparações entre os critérios, realização dos julgamentos, obtenção dos pesos e pontuações e, por fim, elaboração do *ranking*.

Nessa seção é utilizado o *software Super Decision*[®] como ferramenta para implementação do método AHP, por ser amplamente utilizada pelos profissionais que lidam com esse método, haja vista as pesquisas acadêmicas encontradas pelo autor, por apresentar interface clara ao usuário e por permitir analisar o índice de consistência envolvido no método. O software foi desenvolvido por William J. L. Adams, da fundação *Creative Decisions*¹².

Os dados de entrada, que servem como *input* para o *software*, foram coletados por meio de pesquisa aos mesmos especialistas que responderam às perguntas para desenvolvimento da metodologia da Lógica *Fuzzy*, no capítulo anterior. Foi compartilhado um questionário, conforme apresentado no apêndice 3, para 11 pessoas que formam o comitê de especialistas, onde seis profissionais, desse comitê, responderam o documento.

Para uma análise robusta de consistência entre os modelos, tendo em vista que o número de respondentes foi diferente entre os métodos, especificamente para o método AHP foram testados 6 cenários distintos, descritos adiante, com objetivo de verificar possíveis interferências nos resultados.

A Figura 51 ilustra a estrutura hierárquica elaborada para o estudo, com os principais elementos de cada nível: Objetivos (Atratividade), Critérios (Irradiação, Complementaridade, Área do Terreno, Comprimento Circuito MT e Topografia) e Alternativas (Projetos A, B, C, D e E).

¹² Disponível em <<http://www.superdecisions.com>>

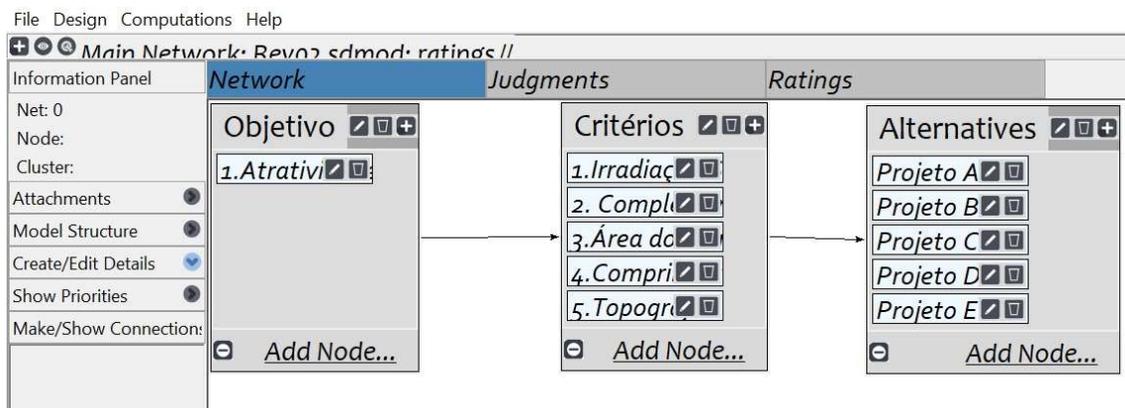


Figura 51- Estrutura Hierárquica, software *Super Decision*[®] (Elaborado pelo autor, 2020)

A Figura 52 apresenta a tela do *software* onde os valores para julgamentos entre os critérios são inseridos:

Comparisons wrt "1.Atratividade" node in "Critérios" cluster
 1.Irradiação Solar is strongly more important than 2. Complementariedade

1.	1.Irradiação~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	2. Complemen~
2.	1.Irradiação~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	3.Área do Te~
3.	1.Irradiação~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	4.Compriment~
4.	1.Irradiação~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	5.Topografia
5.	2. Complemen~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	3.Área do Te~
6.	2. Complemen~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	4.Compriment~
7.	2. Complemen~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	5.Topografia
8.	3.Área do Te~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	4.Compriment~
9.	3.Área do Te~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	5.Topografia
10.	4.Compriment~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	5.Topografia

Figura 52- Comparações e Julgamentos (software *Super Decision*[®], 2020)

Como forma de exemplificação, ao observar a primeira linha da tabela exposta na Figura 52 é verificado a seleção do valor 5, o que significa que o critério ‘Irradiação’ tem um peso maior, mas não absolutamente maior, quando comparado ao critério ‘Complementaridade’. Caso a seleção estivesse no valor 1, significaria que ‘Irradiação’ e ‘Complementaridade’ possuiriam a mesma importância, ao passo que, caso a seleção estivesse no valor 9, significaria que ‘Irradiação’ teria peso absolutamente maior que ‘Complementaridade’.

Os cenários elaborados para preenchimento da tabela, de julgamentos dos critérios, verificação do I.C. e então respectivos resultados para cada caso, são apresentados conforme Tabela 18:

Tabela 18: Cenários avaliados método AHP

Cenário 1	Resposta de apenas 01 Especialista
Cenário 2	Resposta de apenas 01 Especialista com correção do I.C. de forma parcial
Cenário 3	Resposta de apenas 01 Especialista com correção do I.C. de forma total
Cenário 4	Respostas de 06 Especialistas
Cenário 5	Resposta de apenas 06 Especialistas com correção do I.C. de forma parcial
Cenário 6	Resposta de 06 Especialistas com correção do I.C. de forma total

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

Os primeiros cenários avaliados foram os cenários 1 e 4, os quais apresentaram um valor de Índice de Consistência (I.C.) maior que 0,1 o que, conforme abordado no capítulo anterior, indica a necessidade de ajuste da matriz *pairwise comparison*, a partir de nova atribuição de julgamento aos critérios em avaliação. Dessa forma, foram desenvolvidos os demais cenários, com o objetivo de corrigir o valor do I.C. e validar os resultados obtidos através da metodologia AHP.

Para os cenários 3 e 6 foi utilizado um recurso interno do próprio *software* para correção do valor do I.C., onde são indicados os valores recomendados a serem utilizados como julgamento de cada um dos critérios, conforme apresentado na Figura 53. Neste sentido, foram adotadas todas as recomendações indicadas pelo *software* para os referidos cenários.

		Valor Atual	Valor Recomendado
1.Irradiação Solar	2.Complementariedade	5.000000	1.158716
1.Irradiação Solar	3.Área do Terreno	9.000000	36.029868
2.Complementariedade	5.Topografia	6.000000	1.738841
3.Área do Terreno	4.Comprimento Circuito MT	4.000000	1.361086
4.Comprimento Circuito MT	5.Topografia	3.000003	1.118631
3.Área do Terreno	5.Topografia	5.000000	2.743700
2.Complementariedade	4.Comprimento Circuito MT	6.000000	4.079278
1.Irradiação Solar	4.Comprimento Circuito MT	7.000000	11.755554
1.Irradiação Solar	5.Topografia	7.000000	5.638421
2.Complementariedade	3.Área do Terreno	8.000000	10.485312

Figura 53- Ajuste do I.C., software *Super Decision*[®] (Ajustado pelo autor, 2020)

Ainda, também foram criados outros dois cenários, 2 e 5, com a finalidade de corrigir o I.C., porém, não utilizando integralmente os julgamentos sugeridos pelo *software*. De forma alternativa, as correções foram realizadas parcialmente. A abordagem adotada para corrigir o valor I.C., para esses dois cenários, foi a de somar ou subtrair em uma unidade dos valores atuais, com base nas recomendações do *software*. Por exemplo, no caso da ‘Irradiação Solar’ vs ‘Complementariedade’ o *software* sugere um valor menor, ao invés do valor 5, a utilização do valor de aproximadamente 1, como exposto na Figura 53. Contudo, a nova nota de julgamento adotada, nesse caso, foi de 4, pois subtraiu-se uma unidade do ‘valor atual’. Para o caso ‘Irradiação Solar’ vs ‘Comprimento Circuito MT’, como o *software* recomenda um valor maior, de aproximadamente 11, a nova nota de julgamento passou de 7 para 8, aumentando o valor em uma unidade.

Enquanto os cenários 1, 2 e 3 são desenvolvidos levando em consideração os julgamentos de apenas um único especialista, nesse caso, o mesmo especialista que elaborou as 432 regras da Lógica *Fuzzy* no MATLAB®, para os cenários 4, 5 e 6 foram considerados os julgamentos de outras cinco pessoas, totalizando seis julgamentos. Nesses cenários (4, 5 e 6), a partir do cálculo da média geométrica das pontuações escolhidas por esses seis especialistas, foi elaborada apenas uma tabela dos julgamentos entre os critérios do estudo, como forma de possuir um julgamento único em nome do comitê.

A Tabela 19 apresenta os resultados encontrados para cada um dos seis cenários avaliados com relação ao I.C., e os pesos de cada um dos cinco critérios da análise:

Tabela 19: Cenários AHP e pesos

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
I.C.	0,147	0,072	0,017	0,108	0,013	0,083
Irradiação	0,559	0,549	0,520	0,499	0,482	0,492
Complementaridade	0,263	0,269	0,265	0,250	0,284	0,243
Área do Terreno	0,027	0,031	0,038	0,073	0,069	0,073
Comprimento Circuito MT	0,056	0,060	0,063	0,088	0,081	0,098
Topografia	0,092	0,089	0,113	0,089	0,084	0,094

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

Após o cálculo dos pesos de cada um dos critérios e verificação do I.C., para cada um dos seis cenários, a próxima etapa consiste em avaliar os pesos dos critérios para cada um dos cinco projetos. Nessa etapa, os julgamentos realizados pelos especialistas não são utilizados, uma vez que o software verifica os pesos dos critérios, de cada projeto, conforme os dados reais, utilizados também na simulação com a Lógica *Fuzzy* e expostos anteriormente na Tabela 16.

Os pesos resultantes dessa análise, para cada um dos critérios, são apresentados na Tabela 20. Tomando como exemplo de irradiação, a leitura da Tabela indica que o Projeto C possui maior valor desse critério, quando comparado aos demais projetos. No caso da Complementaridade, o Projeto B demonstra-se com a melhor opção, dentre os demais.

Tabela 20: Pesos para cada alternativa

	Irradiação	Complementaridade	Área Terreno	Comprimento Circuito MT	Topografia
Projeto A	0,198	0,140	0,045	0,207	0,272
Projeto B	0,196	0,256	0,038	0,326	0,086
Projeto C	0,206	0,194	0,462	0,163	0,258
Projeto D	0,203	0,193	0,083	0,076	0,323
Projeto E	0,197	0,216	0,370	0,228	0,060

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

Por fim, com os pesos calculados a partir das comparações entre critérios, e pesos entre comparações entre projetos, para um determinado critério, o *software* calcula os pesos normalizados, apresentados na Tabela 21, a partir da multiplicação dos pesos apresentados nas colunas da Tabela 19 pelos pesos apresentados nas linhas da Tabela 20. Em seguida, os resultados são idealizados através da divisão dos valores de cada coluna da Tabela 21 pelo maior valor da mesma coluna, com resultados expostos na Tabela 22.

Tabela 21: Resultados normalizados de Atratividade Método AHP

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Projeto A	0,186	0,185	0,186	0,180	0,178	0,181
Projeto B	0,205	0,205	0,202	0,201	0,203	0,202
Projeto C	0,212	0,213	0,216	0,223	0,221	0,222
Projeto D	0,200	0,199	0,201	0,191	0,191	0,190
Projeto E	0,196	0,197	0,195	0,205	0,205	0,204

Tabela 22: Resultados idealizados de Atratividade Método AHP

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Projeto A	0,877	0,870	0,861	0,808	0,805	0,813
Projeto B	0,965	0,965	0,935	0,904	0,920	0,906
Projeto C	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Projeto D	0,946	0,938	0,932	0,858	0,865	0,856
Projeto E	0,922	0,925	0,904	0,921	0,928	0,918

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

4.8. RESULTADOS

Esse capítulo expõe os resultados a partir dos dados encontrados e apresentados nas Tabela 17 e Tabela 22. Conforme explicado, quanto maior o resultado apresentado nessas tabelas, maior o valor de atratividade dos projetos e, desse modo, a Tabela 23 traz os resultados em formato de *ranking* de atratividade.

Tabela 23: Resultados de Atratividade

	Lógica Fuzzy		Método AHP				
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Projeto A	4º	5º	5º	5º	5º	5º	5º
Projeto B	3º	2º	2º	2º	3º	3º	3º
Projeto C	1º	1º	1º	1º	1º	1º	1º
Projeto D	2º	3º	3º	3º	4º	4º	4º
Projeto E	5º	4º	4º	4º	2º	2º	2º

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020

Em relação aos resultados encontrados nas simulações do Método AHP, verifica-se que os resultados são levemente diferentes quando o estudo é realizado considerando os julgamentos de apenas um especialista (cenários 1, 2 e 3) se comparado ao caso com os julgamentos do comitê formado por seis especialistas (cenários 3, 4 e 5). No entanto, para ambos os casos, o Projeto C se mostra como mais atrativo, enquanto o Projeto A como última opção. Ainda com relação às simulações do Método AHP, verificou-se que não houve diferenças no *ranking* entre os cenários 1, 2 e 3, e diferenças entre os cenários 4, 5 e 6, indicando que a correção do Índice de Consistência, nesses casos observados, não trouxe alterações nos resultados.

A respeito dos resultados entre metodologias avaliadas, Lógica *Fuzzy* vs Método AHP, verificou-se que os resultados encontrados são convergentes, apesar de não similares em sua totalidade. Em razão da forma de construção dos modelos, espera-se que, de fato, os resultados não sejam estritamente os mesmos, mas que possam apresentar uma orientação, com resultados que apontem, ou consolidem, uma mesma direção ou tendência.

Em ambas as análises o projeto com maior atratividade é o Projeto C, para as demais posições do *ranking* as diferenças apresentadas são, na média, de uma colocação, indicando similaridade nas atratividades obtidas. Nesse sentido, identifica-se que os modelos expostos se mostram como consistentes para suporte à tomada de decisão.

No caso das simulações de lógica *fuzzy* realizadas através do *software* MATLAB®, constatou-se que a definição das funções de pertinência, e seus números *fuzzy* associados, depende da experiência do elaborador do modelo, de forma que os resultados estão consideravelmente atrelados à escolha da modelagem do autor, de forma que a metodologia pode ser facilmente adaptada de acordo com as expectativas e objetivos de quem a constrói.

Dessa forma, os resultados apresentam consistência sob a ótica da categorização dos projetos, servindo como apoio ao processo decisório, demonstrando capacidade de adaptação

de acordo com a finalidade proposta, a partir de ajustes nos critérios de entrada, obtendo-se, assim, resultados aderentes aos cenários apresentados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou, inicialmente, o cenário atual das energias renováveis no mundo e no Brasil, onde o aumento dos projetos é crescente, sobretudo devido ao avanço tecnológico e, a redução dos custos dos equipamentos. A maturidade do setor das energias renováveis e competitividade abrem espaço para o avanço dos projetos híbridos, bem definidos em termos tecnológicos, porém, ainda em processo de debates e avanços, no que tange à regulamentação.

Esse é o caso do Brasil, em que, uma vez com regulamentação vigente, permitirá contribuições referentes a otimizações do uso da rede, incentivos a novos modelos de negócios, modernização do sistema elétrico, otimização dos recursos naturais e oportunidade de redução no preço de energia.

Como proposta central, foi exposta e discutida uma visão geral de alguns métodos compreendidos na análise multicritérios, com enfoque nos conceitos teóricos da metodologia *Analytic Hierarchy Process* e *Lógica Fuzzy*. Verificou-se, sobretudo, a flexibilidade em se trabalhar com os números *fuzzy* em situações de imprecisão, onde não existe apenas uma verdade absoluta, se diferenciando dos conceitos matemáticos “inflexíveis”.

O estudo também serviu para confirmar que a metodologia AHP, assim como a *Lógica Fuzzy*, estão vinculadas aos julgamentos realizados pelos especialistas que estão participando do processo decisório e, dessa forma, o nível de experiência que possuem com relação a determinado tema influência nos resultados obtidos.

Adicionalmente, identifica-se que há aplicabilidade em relação às duas metodologias propostas, como ferramentas para suporte à tomada de decisão, referente ao local mais atrativo para construção do projeto solar fotovoltaico a ser hibridizado à usina eólica.

O objetivo final de ranquear as usinas em termos de atratividade foi alcançado, ainda que os resultados das diferentes metodologias não tenham sido estritamente iguais, funcionando como um guia orientativo adequado, apresentando quais projetos apresentam maior atratividade, dentre os analisados.

Por fim, destaca-se que ambas metodologias podem ser aplicadas em qualquer empresa, sendo os métodos flexíveis e customizados para cada tipo de problema em avaliação. Ainda, a aplicação de tais metodologias possibilita agilidade na seleção dos projetos mais atrativos e, dessa forma, empresas podem alocar, de forma adequada, recursos humanos e capital para estudar com mais detalhes o projeto que apresenta maior grau de atratividade. Embora o recurso energético seja infinito, o mesmo não se pode dizer dos terrenos e da margem para conexão e, dessa forma, a verificação dos locais corretos para instalação da usina híbrida é etapa essencial

do processo decisório, sendo a ferramenta elaborado capaz de trazer diversos benefícios ao empreendedor.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

O aprendizado é constante, dessa forma todo estudo serve como alicerce para outros estudos. Com base nesse entendimento, e nos resultados obtidos nesse trabalho, acredita-se que as simulações realizadas podem ser complementadas através de: (i) adição de outros critérios, servindo como variáveis de julgamento para ambas metodologias expostas no trabalho; (ii) testes aplicados à Lógica *Fuzzy* alterando a quantidade de regras avaliadas; (iii) verificação da complementaridade dos projetos através das curvas horárias dos recursos, ao invés das médias horárias anuais; e (iv) análise de sensibilidade com os critérios utilizados, verificando possíveis alterações no resultado dos rankings, a partir de variações nos pesos dos critérios em análise. Dessa forma, como sugestão de pesquisa futura, cita-se a avaliação dos itens acima expostos.

ABEEólica, **Infowind Brazil**. Disponível em: < <http://abeeolica.org.br>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

AECOM, **A study into the potential for co-locating wind and solar farms in Australia**. Disponível em: < <http://www.aecom.com/au/wp-content/uploads/2016/03/Wind-solar-Co-location-Study-Final.pdf>>. Acesso em 07 ago. 2020.

ALBUQUERQUE, P. A. **Modelo de Seleção de Fornecedores para Projetos Industriais com Utilização da Lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ, 2020.

ALGARÍN, C. R., LLANOS, A. P. and CASTRO, A. O. **An analytic hierarchy process based approach for evaluating renewable energy sources**. International Journal of Energy Economics and Policy. Vol. 7, pp. 38-47, 2017.

ALJIĆEVIĆ, Z., KOSTIĆ, A., and DAUTBAŠIĆ, N. **SELECTING LOCATION FOR INFRASTRUCTURAL INVESTMENT PROJECT IN RENEWABLE SOURCES OF ENERGY USING MATLAB AND FUZZY LOGIC**. Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering, 2018.

AMARANTE O. A. C., BROWER, M., ZACK, J., SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1.2017.>>, 2020.

AMENDOLA, M., SOUZA, A. L. and BARROS, L. C. **Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5**. FEAGRI & IMECC/ UNICAMP, Campinas, 2005.

AMY, H. I., HSING, H.C.B., KANG, H.Y. **Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms**. Renewable Energy. ELSEVIER, 24 jun. 2009.

Amy, H. I., KANG, L. H.-Y., LIN., C.-Y., SHEN, K. C. **An integrated Decision-Making Model for the Location of a pv Solar Plant**. Vol. 7, pp. 13522-13541, 2015.

ANAND, M. C. J., BHARATRAJ, J. **Theory of triangular fuzzy number**, 2017.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 094/2020-SRG/ANEEL - Abertura da Tomada de Subsídios para obter contribuições para as adequações regulatórias necessárias à inserção de sistemas de armazenamento, incluindo usinas renováveis, no Sistema Interligado Nacional -SIN**. Brasília, 2020.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 133/2019-SRG-SCG-SRD/ANEEL**. Brasília, 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL lança consulta pública sobre regras para usinas híbridas**. Brasília, 2019.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Aprimoramento da regulação relacionada à contratação de acesso de múltiplas centrais geradoras**. Brasília, 2020.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica nº 090/2020-SRG-SCG/ANEEL**. Brasília, 2020.

ANSARI, A. J., ASHRAF, I. and GOPAL, B. **Integrated Fuzzy VIKOR and AHP Methodology for Selection of Distributed Electricity Generation through Renewable Energy in India**. International Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 1, pp. 1110-1113, 2010.

ANTUNES, V. de S., F. **Proposta de Metodologia para Otimização da Variabilidade em um Parque Híbrido Eólico-Fotovoltaico Utilizando o Método de Monte Carlo e Programação Não-Linear**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense - Niterói, RJ, 2020.

ARAÚJO, J. F. **Avaliação da Influência das Interferências Eletromagnéticas (EMI) produzidas por lâmpadas LED: Uma análise multicritério**. Dissertação de Mestrado, UFF - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.

ATHANASIOS, I., CHATZIMOURATIDIS, P., and PILAVACHI, A. **Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process**. Energy Policy. Vol. 37, pp. 778-787, 2009.

BARBOSA, C. F. O., PINHO, J. T., SILVA, E. J. P, GALHARDO, M. A. B., VALE, S. B., MARANHÃO, W. M. A. **Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica**. Energ. Meio Rural. Campinas, 2004.

BARIN, A., MAGNANO, K. and ABAIDE, A. R. **Seleção de fontes alternativas de geração distribuída utilizando uma análise multicriterial baseada no método AHP e na Lógica Fuzzy**. Controle & Automação, pp. 477-486, 2010.

BARROS, L. C., BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**, 2ª ed. Unicamp, Campinas, SP, 2010.

BERNARD, R. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Springer, 1996.

BEYER, H. G., LANGER, C. **A method for the identification of configuration of PV/Wind hybrid systems for the reliable supply of smalls loads**, 1996.

BHUSHAN, N., RAI, K. **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process**. Springer, 2004.

BLECHINGER, P., CADER, C., BERTHEAU, P., HUYSKENS, H., SEGUIN, R., BREYER, C. **Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands**. Energy Police, Vol. 98, pp. 674-687, 2016.

BLOOMBERG, **New Energy Outlook**. Disponível em: < <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>>. Acesso em 20 out. 2020.

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.** IEEE Transaction on energy conversion, 1996.

BRIOZO R. A., MUSETTI, M. A. **Método multicritério de tomada de decisão: aplicação ao caso da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento - UPA 24h.** Gestão & Produção, pp. 805-819. São Carlos, 2015.

Buckley, J. J. **Fuzzy hierarchical analysis.** Fuzzy Sets and Systems. Vol. 17, pp. 233-247. Dezembro, 1985.

Bueno, W. P. **O Uso da bordagem Fuzzy - AHP e Fuzzy Sets para Facilitar a Utilização da Filosofia Lean Manufacturing em Indústrias.** UFMS, Dissertação de Mestrado, Santa Maria, RS, 2017.

CANEPPELE, F. L. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para otimização da energia gerada por um sistema híbrido (solar-fotovoltaico e eólico).** Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, São Paulo, 2007.

CANHA, A. B. L. N., MAGNANO, K. F. e ABAIDE, A. da R. **Seleção de fontes alternativas de geração distribuída utilizando uma análise multicriterial baseada no método AHP e na lógica fuzzy.** Controle & Automação, Vol. 21, pp. 477-486. Santa Maria, RS, 2010.

CARVALHO, C. E. C. **Regulação para o setor de PCH e CGH.** Brasília, 2019.

CARVALHO, V. L. **APLICAÇÃO FUZZY X PID: Técnicas de Controle em Ambientes Simulados.** Curitiba, 2015.

CAVADOS, G. de A. **Análise do Impacto da Introdução das Fontes Intermitentes no Setor Elétrico Brasileiro: Estudo de Caso da Região Nordeste.** Dissertação de Mestrado - COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

CHAI, J., LIU, J., NGAI, E. W. **Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature.** Expert Systems with Applications. Vol. 40, pp. 3872-3885, 2013.

CHANG, D. Y. **Application of the extent analysis method on fuzzy AHP.** European Journal of Operational Research. Vol. 95, pp. 649-655, 1996.

CHAVEZ, M. D., BERENTSEN, P. B. M., LANSINK, A. G. J. M. O. **Assessment of criteria and farming activities for tobacco diversification using the Analytical Hierarchical Process (AHP) technique.** Agricultural Systems, Vol. 111, pp. 53-62, 2012.

CHEN, H. H., KANG, H. -Y., LEE, A. H. I. **Strategic selection of suitable projects for hybrid solar wind power generation systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, Vol. 14, pp. 413-421, 2010.

CHOO, C. W. **Organização do conhecimento: como as organizações usam a informação para criar significado, construir conhecimento e tomar decisões.** SENAC, São Paulo, SP, 2003.

ÇOLAK, M., KAYA, I. **Priorization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, pp. 840-853, 2017.

COSTA, C. C. de M., FERREIRA, M. A. M., and OLIVEIRA, L. G. **Utilização do método multicritério no processo de tomada de decisão nas organizações rurais de pequeno porte.** RACE - Revista de Administração, Contabilidade e Economia. Vol. 12, pp. 491-524, 2014.

DAIM, T. U., KAYAKUTLU, G., COWAN, K. **Developing Oregon's renewable energy portfolio using fuzzy goal programming model.** Computers & Industrial Engineering, Vol. 59, pp. 786-793, 2010.

DIHRAB, S., SOPIAN, K. **Electricity generation of hybrid PV/Wind systems in Iraq.** Vol. 35, pp. 1303-1307, 2010.

DOBRIC, V., KOVACEVIC, D., PETROVIC, B., RADOJEVIC, D. and MILOSEVIC, P. **Formalization of human categorization process using interpolative Boolean algebra** *Mathematical Problems in Engineering.* Hindawi Publishing Corporation, Vol. 8, Cairo, 2015.

DRAGOVIĆ, I., TURAJLIĆ, N. and RADOJEVIĆ, D. **Extanding AHP with Boolean consistent fuzzy logic and its application in web service selection.** Proceedings of the 12th International FLINS Conference, World Scientific Publishing Company, pp. 576-591, Istanbul, 2012.

DRAGOVIĆ, I., TURAJLIĆ, N., PILCEVIĆ, D., PETROVIĆ, B. and RADOJEVIĆ, D. **A Boolean consistent fuzzy inference system for diagnosing diseases and its application for determining peritonitis likelihood.** Computational and Mathematical Methods in Medicine. Hindawi Publishing Corporation, Vol. 10. Cairo, 2015.

DRAGOVIĆ, I., TURAJLIĆ, N., RADOJEVIĆ, D. and PETROVIĆ, B. **Combining Boolean consistent fuzzy logic and AHP illustrated on the web service selection problem.** International Journal of Computational Intelligence Systems. Vol. 7, pp. 84-93, Belgrado, 2013.

DUBOIS, D., PRADE, H. M. **Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications.** Vol. 144, 1980.

DYKES, K. **Dynamics of technology innovation and diffusion with emphasis on wind energy.** MIT, 2016.

EMROUZNEJAD, A., HO, W. **Fuzzy Analytic Hierarchy Process.** CRC Press. Boca Raton, USA, 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética **Avaliação da Geração de Usinas Híbridas Eólico-Fotovoltaica: Proposta metodológica e estudos de caso.** Rio de Janeiro, 2017.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética **Estudos de Planejamento da Expansão da Geração: Usinas Híbridas no contexto do Planejamento Energético.** Rio de Janeiro, 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética **Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética **Usinas híbridas no contexto do planejamento energético**. Rio de Janeiro, 2019.

GANGA, G. M. D. **Proposta de um modelo de simulação baseado em lógica Fuzzy e no SCOR para prever o desempenho da empresa-foco em cadeias de suprimentos**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, 2010.

GARCIA, K. C., TEIXEIRA, M. G., ALVES, C. C., and ALVES, R. N. **Concepção de um modelo matemático de avaliação de projetos de responsabilidade social empresarial (RSE)**. *Gestão de Projetos*. Vol. 14, pp. 535-544, 2007.

GEORGE, J. K., YUAN, B. **Theory and Application. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic**. New Jersey, USA, 1995.

GODOY, F. O., GODINHO, E. Z., DALTIM, R. S., CANEPPELE, F. L. **Utilização da lógica fuzzy aplicada à energia solar**. EMBRAPA - Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, 2020.

GOETSCHEL, R., VOXMAN, W. **Elementary calculus**. *Fuzzy Set System*, Vol. 18, pp. 31-43, 1986.

GOMES, K. G. A. **Um método multicritério para localização de unidades de celulares de intendência da FAB**. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009.

HARPUTLUGIL, T., PRINS, M., GÜLTEKIN, A. T., TOPÇU, Y. I. **Conceptual framework for potential implementations of multi criteria decision making (MCDM) methods for design quality assessment**, 2011.

HEERDT, T. A. **Análise de um novo modelo de contratação de energia elétrica através do conceito de sistema híbrido ou associado em parque eólico e solar visando a redução do custo de transmissão e otimização do uso do sistema elétrico**. Monografia de MBA - IBMEC, Rio de Janeiro, 2019.

HEO, E., KIM, J., and CHO, S. **Selecting hydrogen production methods using fuzzy analytic hierarchy process with opportunities, costs and risks**. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 37, pp. 17655-17662, 2012.

HOCINE, A., KOUAISSAH, N. **XOR analytic hierarchy process and its application in the renewable energy sector**. *Omega*. ELSEVIER, 2019.

IBRAHIM, A. R. M., SURESH, A., KRISHNAN, S. S., SURESH, M. **Energy Optimisation in Wind-Solar Hybrid Power System**. Kathir College of Engineering.

IEA. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables/?country=WORLD&energy=Renewables%20%26%20waste&year=2017>>. Acesso em 25 jul. 2020.

IHS Markit. **Global Renewable Levelized Cost of Electricity Outlook**. 2020.

INIBIOBONG, J., UMOREN, J. A. M., and MARKSON, I. **Development of optimal site selection method for large scale solar photovoltaic power plant**. Mathematical and Software Engineering. Vol. 2, pp. 66-75, 2016.

IRENA **10 year progress to action**. Disponível em: <https://irena.org/publications/2020/Jan/10-Years-Progress-to-Action>. Acesso em 02 mai. 2020.

JURASZ, J., CANALES, F. A., KIES, A., GUEZGOUZ, M., BELUCO A. **A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions**. Solar Energy, Vol. 195, pp. 703-724, 2020.

JONES, M. H. **Las decisiones del ejecutivo**. México, 1964.

KABLAN, M. M. **Decision support for energy conservation promotion: an analytic hierarchy process approach**. Energy Policy, Vol. 32, pp. 1151-1158, 2004.

KANDEL, M. M., FRIEDMAN, M. **Correction to "a new approach for defuzzification"**. Fuzzy Sets System. Vol. 128, pp. 128-134, 2002.

KARGER, C. R., HENNINGS, W. **Sustainability evaluation of decentralized electricity generation**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 13, pp. 583-593, 2009.

KAYA, T., KAHRAMAN, C. **Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul**. Energy, Vol. 35, pp. 2517-2527, 2010.

KEENEY, R. L. **Decision Analysis: An Overview**. Operations Research. Vol. 30, pp. 803-838, 1982.

KHAZAENI, G., KHANZADI, M., AFSAR, A. **Fuzzy adaptive decision-making model for selection balanced risk allocation**. International Journal of Project Management, Vol. 30, 2012.

KURKA, T., BLACKWOOD, D. **Selection of MCA methods to support decision making for renewable energy developments**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, pp. 225-233, 2013.

LAARHOVEN, P. J. M., PEDRYCZ, W. **A fuzzy extension of Saaty's priority theory**. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 11, pp. 229-241, 1983.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na tomada de decisões**. Rio de Janeiro, 2007.

LANGARI, J., YEN, R. **Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information**. New Jersey, 1999.

- LEE, S. **Application of AHP and Fuzzy AHP to decision-making problems in construction.** 52nd ASC Annual International Conference Proceedings, 2016.
- LOZANO, J. M. S., CASCALES, M. S. G., LAMATA, M. T. **Evaluation of suitable locations for the installation of solar thermoelectric power plants.** Computers & Industrial Engineering. Vol. 87, pp. 343-355, September, 2015.
- MAMDANI E. H. **Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant.** Proceedings of the IEEE, Vol. 12, pp. 1585-1588, 1973.
- MAMDANI, E. H., ASSILAN, S. A. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,** 1975.
- MARTINS, M. A. **Desenvolvimento de Funções de Lógica Difusa para PLC.** ISEP: Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal, 2014.
- McNEILL F. M., THRO, E. **Fuzzy Logic a Practical Approach.** Academic Press, INC. Chestnut Hill, USA, 1994.
- MEIRELLES, C. L. de A., GOMES, L. F. A. M. **O apoio multicritério à decisão como instrumento de gestão do conhecimento: uma aplicação à indústria de refino de petróleo.** Pesquisa Operacional. Vol. 29, pp. 451-470, Rio de Janeiro,RJ, 2009.
- MELO M. S. M. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Econômicos.** Dissertação de Mestrado - UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.
- MIKHAILOV, L. **A fuzzy programming method for deriving priorities in the analytic hierarchy process.** Journal of the Operational Research Society, Vol. 51, pp. 341-349, 2000.
- MIKHAILOV, L. **Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements.** Fuzzy Sets and Systems, Vol. 134, pp. 365-385, 2003.
- Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029.** Brasília, 2019.
- MRTS Consultoria **Análise da complementariedade entre duas ou mais Fontes de Energia constituindo Projetos Híbridos para otimização do uso dos Sistemas de Escoamento e ajustes dos Processos Regulatórios, visando a evolução sustentável da Matriz Energética Brasileira.** ABEEólica, APINE, ABSOLAR. São Paulo, 2019.
- Nancy et al., **Terawatt-Scale Photovoltaics: Trajectories and Challenges.** Science, pp. 141-143, 2017.
- NOGUEIRA, C. E. D. **A new methodology for sizing hybrid photovoltaic-wind energy using simulation and optimization tools,** 2005.
- Nunes L. F. J. **Tomada de decisão com múltiplos critérios: Pesquisa-Ação sobre o Método AHP em Pequenas Empresas.** Dissertação de Mestrado - Universidade de Taubaté, 2006.

OZDEMIR, S., SAHIN, G. **Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP**. Measurement, Vol. 129, pp. 218-226, 2018.

PETRILLO, A., FELICE, F., JANNELLI, E., AUTORINO, C., MINUTILLO, M., A LAVADERA, A. L. **Life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) analysis model for a stand-alone hybrid renewable energy system**. Renewable Energy. Vol. 95, pp. 337-355, September, 2016.

RAINER, R. K. JR., CEGIELSKI, C. G. **Introdução a Sistemas de Informação**. LTC, Rio de Janeiro, 2012.

RAJJAN, S. **Introduction to Fuzzy Logic**. PHI Learning Privated Limited, Montreal, 2013.
REN21 Renewables 2019 - Global Status Report. Paris, 2019.

REZAEI, M., MOSTAFAEIPOUR, A., QOLIPOUR, M., TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. **Investigation of the optimal location design of a hybrid wind-solar plant: A case study**. International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, pp. 100-114, 2017.

Ross, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. John Wiley & Sons, Lt. New Mexico, USA, 2004.

ROTTMANN, A. A. A. D. E., DUARTE, A. R. C. de L. M., COSTA, C. T. Jr., KAWASHIMA, M. e NETO, O. G. **Um novo enfoque na engenharia de avaliações: o método do entendimento racional**. Congresso Brasileiro de Avaliações e Perícias. - Salvador, 2007.

SAATY, T. L. **Decision making with dependence and feedback: the analytic network process**, 1996.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York, 1980.

SEMLYEN, A. I. **S-domain methodology for assessing the small signal stability of complex systems in nonsinusoidal steady state**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 1, pp. 132-137, 1999

SHAW I. S., SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo, 1999.

SHARMA, S. S., MANTHIRAM, A. **Towards more environmentally and socially responsible batteries**. Energy & Environmental Science, Vol 13, pp. 4087-4097, 2020.

SILVA, L. M. O., GONÇALVES, R. M. **Uma revisão da modelagem fuzzy da interface continente e oceano para identificar locais vulneráveis à erosão**. Memórias e Notícias de Geociências no Espaço Lusófono, Vol. 1, pp. 100-110, 2012.

SILVA L. M. **Modelagem fuzzy como subsídio para a espacialização da vulnerabilidade costeira à erosão**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SILVA L. R. M. **Comparação dos Custos de Geração de Energia Elétrica entre Tecnologias Despacháveis e Intermitentes no Brasil**. Dissertação de Mestrado - Fundação Getulio Vargas, Rio de Janeiro, 2017.

SILVA M. A. **Aplicação de Lógica Nebulosa para Previsão do Risco de Escorregamentos de Taludes em Solo Residual**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, M. A. B. **Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, M. F. **Uma Proposta de Aplicação da Lógica Fuzzy no Ensino Médio**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

SIMON, H. A. **Comportamento administrativo: estudo dos processos decisórios nas organizações administrativas**. Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 1965.

SIVANANDAM, S. N., DEEPA, S. N. and SUMATHI, S. **Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB**. Springer, Berlin, 2007.

SMETS, A., JÄGER, K., ISABELLA, O., SWAAIJ, R., ZEMAN, M. **Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems**. UIT Cambridge, England, 2016.

SOLANGI, K. H., ISLAM, M. R., SAIDUR, R., RAHIM, N.A., FAYAZ, H. **A review on global solar energy policy**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 15, pp. 2149-2163, 2011

Solargis Prospect. Disponível em:<www.solargis.com> Acesso em 21 set. 2020.

SOUZA, B. P. **Gerenciamento de energia através da lógica fuzzy em um sistema híbrido isolado de geração de energia**. Instituto Federal Santa Catarina, 2018.

SOUZA, D. M. B. S. **Abordagem Baseada em Lógica Fuzzy para Alocação de Indicadores de Faltas em Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, 2009.

SOUZA, O. N. **Introdução à Teoria dos Conjuntos Fuzzy**, Universidade Estadual de Londrina, 2010.

STEIN, E. W. **A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 22, pp. 640-654, 2013.

STOJCETOVIC, B., NIKOLIC, D., VELINOV, V. and BOGDANOVIC, D. **Application of integrated strenghts, weaknesses, opportunities, threats and analytic hierarchy process**. Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 8, 2016.

SUBRAHMANYAM, J. B. B., ALLUVADA, P. B., BHANUPRIYA, K. and SHASHIDHAR, C. **Renewable Energy Systems: Development and Perspectives of a Hybrid Solar-Wind System**. ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 2, pp. 177-181, 2012.

SULLIVAN, W.G., CANADA, J. R. **Multiattribute evaluation of AMS**, 1989.

- TAHA, H. A. **Operations Research**. Operations Research an Introduction, Fayetteville, 2003.
- TASRI, A., SUSILAWATI, A. **Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia**. Sustainable Energy Technologies and Assessments, pp. 34-44, 2014.
- TAVANA, M., ARTEAGA, F. J. S., MOHAMMADI, S., ALIMOHAMMADI, M. **A fuzzy multi-criteria spatial decision support system for solar farm location planning**. Energy Strategy Reviews, Vol. 18, pp. 93-105, 2017.
- TAYLOR, B. W. **Introduction to Management Science**. Pearson Education Inc, 2014.
- TERVONEN, T., FIGUEIRA, J. R. **A Survey on Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis Methods**. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol. 15, pp. 1-14, 2008.
- Tsoukiàs, A. On the concept of decision aiding process: an operational perspective, pp. 3-27, 2007.
- VAFAEIPOUR, M., ZOLFANI, S. H., VARZANDEH, M. H. M., DERAKHTI, A., ESHKALAG, M. K. **Assessment of regions priority for implementation of solar projects in Iran: New application of a hybrid multi-criteria decision making approach**. Energy Conversion and Management, Vol. 86, pp. 653-663, 2014.
- VAIDYA, O. S., KUMAR, S. **Analytic hierarchy process: An overview of applications**. European Journal of Operational Research, Vol. 169, pp. 1-29, 2006.
- VALLE M. E. **Aritmética com Números Fuzzy**. Universidade Estadual de Campinas, 2015.
- VINCKE, P. **Multicriteria decision aid**, New York, 1992.
- Vortex. Disponível em:< <https://vortexfdc.com/>> Acesso em 21 set. 2020.
- VREEKER, R., NIJKAMP, P., WELLE, C.T. **A multicriteria decision support methodology for evaluating airport expansion plans**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 7, pp. 27-47, 2012.
- WANG, C. N., NGUYEN, V. T., THAI, H. T. N., DUONG, D. H. **Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approaches for Solar Power Plant Location Selection in Vietnam**. Energies. Vol. 11, p. 1504, 2018.
- WANG, J. J., JING, Y. -Y., ZHANG, C,-F, ZHAO, J.-H. **Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making**. Renewable Sustainable Energy. Vol. 13, pp. 2263-2278, 2009.
- WANG, T. T. -C., YUAN, S. **Solar Panel Supplier Selection for the Photovoltaic System Design by Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approaches**. Energies, Vol. 11, p. 1989, Taiwan, 2018.
- WANG, W. -P. **A fuzzy linguistic computing approach to supplier evaluation**. Applied Mathematical Modelling, Vol. 34, pp. 3130-3141, 2010.

WITOLD, P. **Why triangular membership functions?** Fuzzy Sets and Systems, Vol. 60, pp. 21-30, 1994.

WRIGHT, D. G., DEY, P. K., BRAMMER, J. G. **A fuzzy levelised energy cost method for renewable energy technology assessment.** Energy Policy. Vol. 62, pp. 315-323, 2013.

WU, B., et al. **A fuzzy-MADM based approach for site selection of offshore wind farm in busy waterways in China,** 2018.

YAGER, R. R. **On a general class of fuzzy connectives.** Fuzzy Sets and Systems, Vol. 4, pp. 235-242, 1980.

YANG, H., WEI, Z., CHENGZHI, L. **Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system,** 2009.

YANG, Y., BREMNER, S., MANICTAS, C. and KAY, M. **An analysis of solar and wind resources for building a hybrid PV and Wind power plant.** Asia-Pacific Solar Research Conference, Sydney, 2017.

YEH, C. H., CHANG, Y. H. **Modeling subjective evaluation for fuzzy group multicriteria decision making.** European Journal of Operational Research, pp. 464-473, 2009.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets.** Information and Control, Vol. 8, pp. 338-353, 1965.

ZHU, K. J., JING, Y., CHANG, D. Y. **A Discussion on Extent Analysis Method and Applications of Fuzzy-AHP.** European Journal of Operation Research, pp. 450-456, 1999.

ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy Set Theory and its Applications.** Academic Publishers - Boston, USA, 1996.

APÊNDICE 1 – REGRAS LÓGICAS

Regras		Irradiação Solar		Complementaridade		Área do Terreno		Comprimento Circuito MT		Topografia		Atratividade
1	SE	Baixa									ENTÃO	Baixa
2	SE	Média									ENTÃO	Moderada
3	SE	Alta									ENTÃO	Alta
4	SE	Muito Alta									ENTÃO	Alta
5	SE			Muito Baixa							ENTÃO	Baixa
6	SE			Baixa							ENTÃO	Moderada
7	SE			Média							ENTÃO	Alta
8	SE			Alta							ENTÃO	Baixa
9	SE					Pequena					ENTÃO	Moderada
10	SE					Média					ENTÃO	Baixa
11	SE					Grande					ENTÃO	Moderada
12	SE							Pequeno			ENTÃO	Alta
13	SE							Médio			ENTÃO	Moderada
14	SE							Grande			ENTÃO	Baixa
15	SE									Plana	ENTÃO	Alta
16	SE									Moderada	ENTÃO	Moderada
17	SE									Montanhosa	ENTÃO	Baixa
18	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
19	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
20	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
21	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
22	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa

23	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
24	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
25	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
26	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
27	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
28	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
29	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
30	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
31	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
32	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
33	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
34	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
35	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
36	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
37	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
38	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
39	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
40	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
41	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
42	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
43	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
44	SE	Baixa	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
45	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
46	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
47	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
48	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
49	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
50	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa

51	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
52	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
53	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
54	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
55	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
56	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
57	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
58	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
59	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
60	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
61	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
62	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
63	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
64	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
65	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
66	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
67	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
68	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
69	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
70	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
71	SE	Baixa	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
72	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
73	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
74	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
75	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
76	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
77	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
78	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa

79	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
80	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
81	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
82	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
83	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
84	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
85	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
86	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
87	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
88	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
89	SE	Baixa	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
90	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
91	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
92	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
93	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
94	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
95	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
96	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
97	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
98	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
99	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
100	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
101	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
102	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
103	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
104	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
105	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
106	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa

107	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
108	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
109	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
110	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
111	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
112	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
113	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
114	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
115	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
116	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
117	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
118	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
119	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
120	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
121	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
122	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
123	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
124	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
125	SE	Baixa	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
126	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
127	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
128	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
129	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
130	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
131	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
132	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
133	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
134	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa

135	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
136	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
137	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
138	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
139	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
140	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
141	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
142	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
143	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
144	SE	Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
145		Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
146		Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
147		Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
148		Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
149		Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
150		Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
151		Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
152		Média	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
153		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
154		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
155		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
156		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
157		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
158		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
159		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
160		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
161		Média	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
162		Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa

163	Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
164	Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
165	Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
166	Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
167	Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
168	Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
169	Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
170	Média	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
171	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
172	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
173	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
174	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
175	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
176	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
177	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
178	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
179	Média	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
180	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
181	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
182	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
183	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
184	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
185	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
186	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
187	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
188	Média	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
189	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
190	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa

191	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
192	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
193	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
194	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
195	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
196	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
197	Média	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
198	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
199	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
200	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
201	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
202	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Baixa
203	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
204	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Baixa
205	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
206	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
207	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
208	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
209	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
210	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
211	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
212	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
213	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
214	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
215	Média	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
216	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
217	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
218	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa

219	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
220	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
221	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
222	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
223	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
224	Média	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
225	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
226	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
227	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
228	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
229	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
230	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
231	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
232	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
233	Média	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
234	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
235	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
236	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
237	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
238	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
239	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
240	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
241	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
242	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
243	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
244	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
245	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
246	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada

247	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
248	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
249	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
250	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
251	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
252	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
253	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
254	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
255	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
256	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
257	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
258	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
259	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
260	Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
261	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
262	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
263	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
264	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
265	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
266	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
267	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
268	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
269	Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
270	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
271	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
272	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
273	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
274	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada

275	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
276	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
277	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
278	Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
279	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
280	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
281	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
282	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
283	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
284	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
285	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
286	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
287	Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
288	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
289	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
290	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
291	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
292	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
293	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
294	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
295	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
296	Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
297	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
298	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
299	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
300	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
301	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
302	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa

303	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
304	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
305	Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
306	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
307	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
308	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
309	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
310	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
311	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
312	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
313	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
314	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
315	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
316	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
317	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
318	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
319	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
320	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
321	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
322	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
323	Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
324	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
325	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
326	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
327	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
328	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
329	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
330	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta

331	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
332	Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
333	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
334	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
335	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
336	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
337	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
338	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
339	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
340	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
341	Alta	SE	Alta	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
342	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
343	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
344	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
345	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
346	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
347	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
348	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
349	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
350	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
351	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
352	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
353	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
354	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
355	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
356	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
357	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
358	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada

359	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
360	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
361	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
362	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
363	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
364	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
365	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
366	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Moderada
367	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Moderada
368	Muito Alta	SE	Muito Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
369	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
370	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
371	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
372	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
373	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
374	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
375	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
376	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
377	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
378	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
379	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
380	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
381	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
382	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
383	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
384	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
385	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
386	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa

387	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
388	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
389	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
390	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
391	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
392	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
393	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
394	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
395	Muito Alta	SE	Baixa	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
396	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
397	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
398	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
399	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
400	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
401	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
402	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
403	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
404	Muito Alta	SE	Média	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
405	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
406	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
407	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
408	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
409	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
410	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
411	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
412	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
413	Muito Alta	SE	Média	SE	Média	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
414	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta

415	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
416	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
417	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
418	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
419	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
420	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
421	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
422	Muito Alta	SE	Média	SE	Grande	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
423	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta
424	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
425	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Pequeno	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
426	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Plana	ENTÃO	Alta
427	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
428	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Médio	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
429	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Plana	ENTÃO	Alta
430	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Moderada	ENTÃO	Alta
431	Muito Alta	SE	Alta	SE	Pequena	SE	Grande	SE	Montanhosa	ENTÃO	Baixa
432	Muito Alta	SE	Alta	SE	Média	SE	Pequeno	SE	Plana	ENTÃO	Alta

APÊNDICE 2 – RESULTADOS LÓGICA FUZZY 432 REGRAS

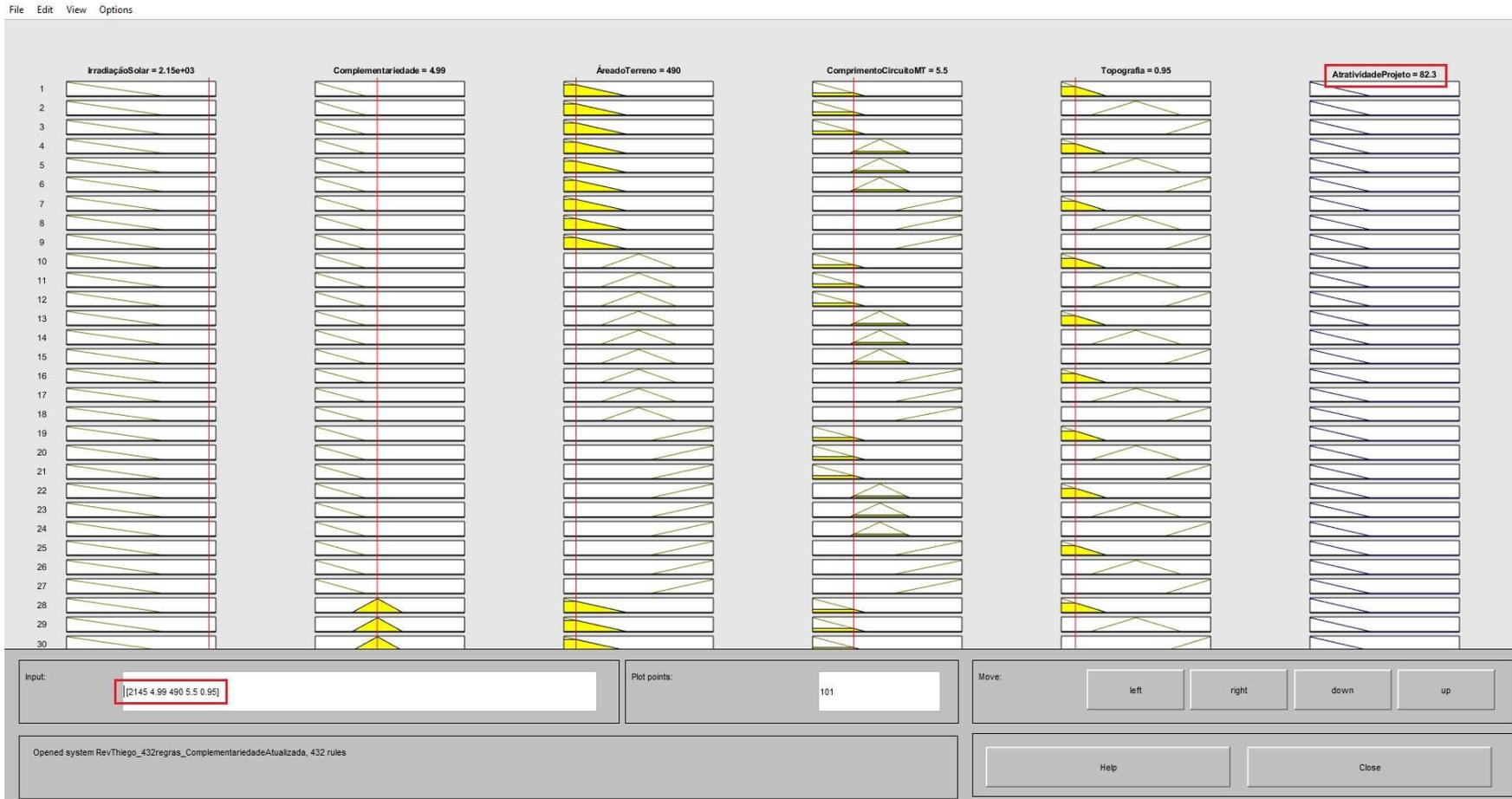


Figura 54- Resultado Projeto A – Lógica Fuzzy (Elaborado pelo autor, 2020)

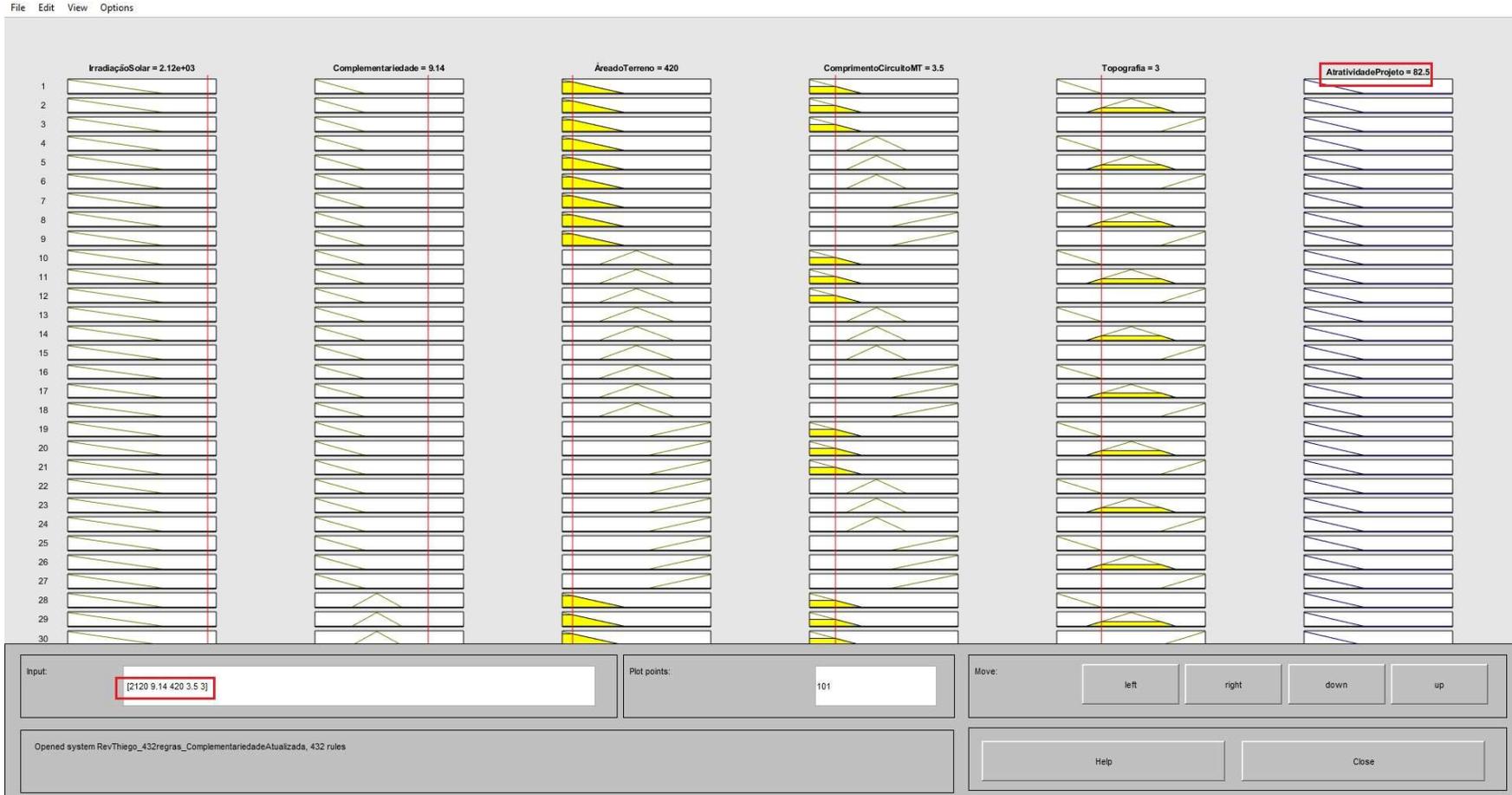


Figura 55- Resultado Projeto B – Lógica Fuzzy (Elaborado pelo autor, 2020)

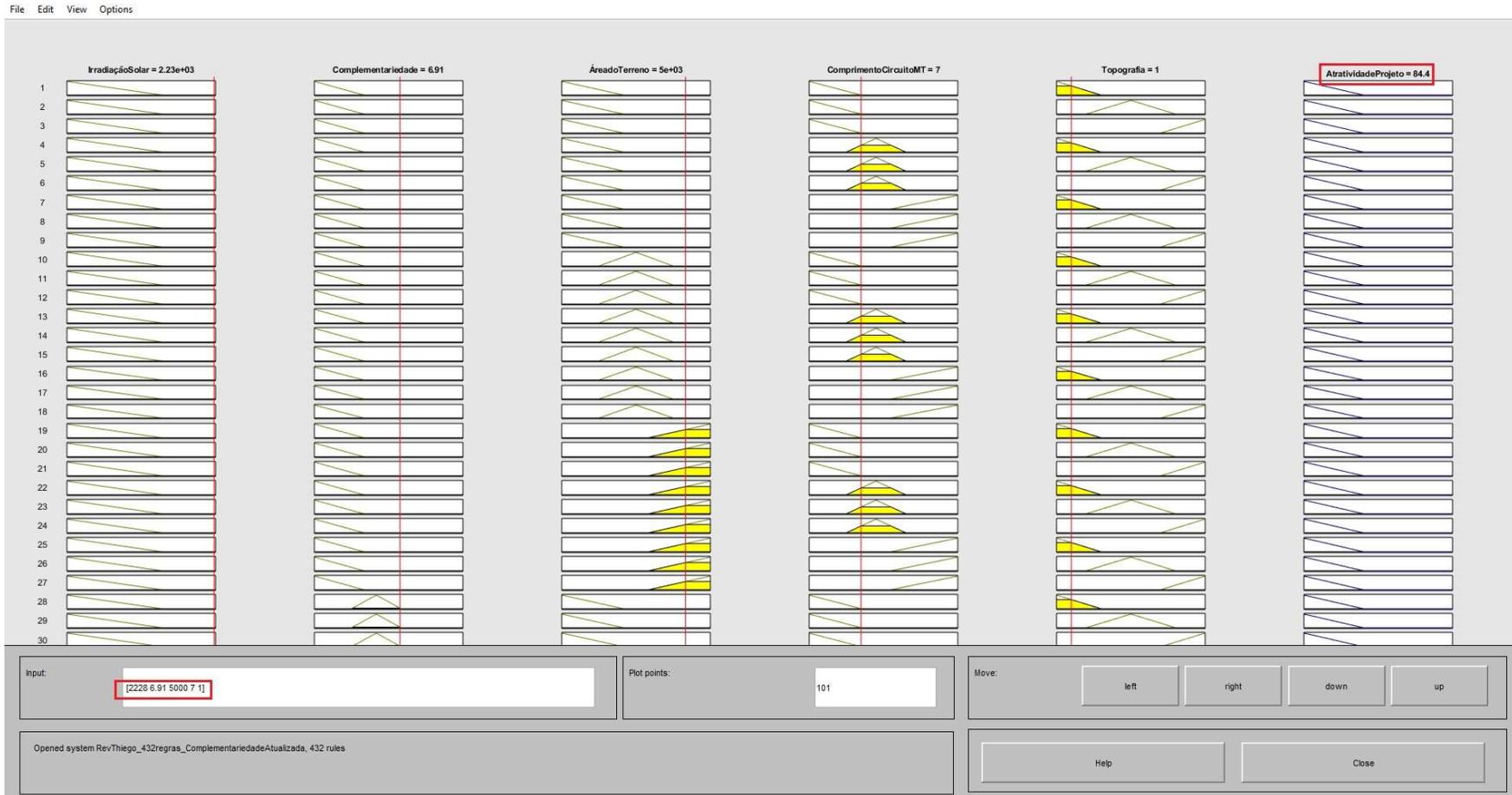


Figura 56- Resultado Projeto C – Lógica Fuzzy (Elaborado pelo autor, 2020)

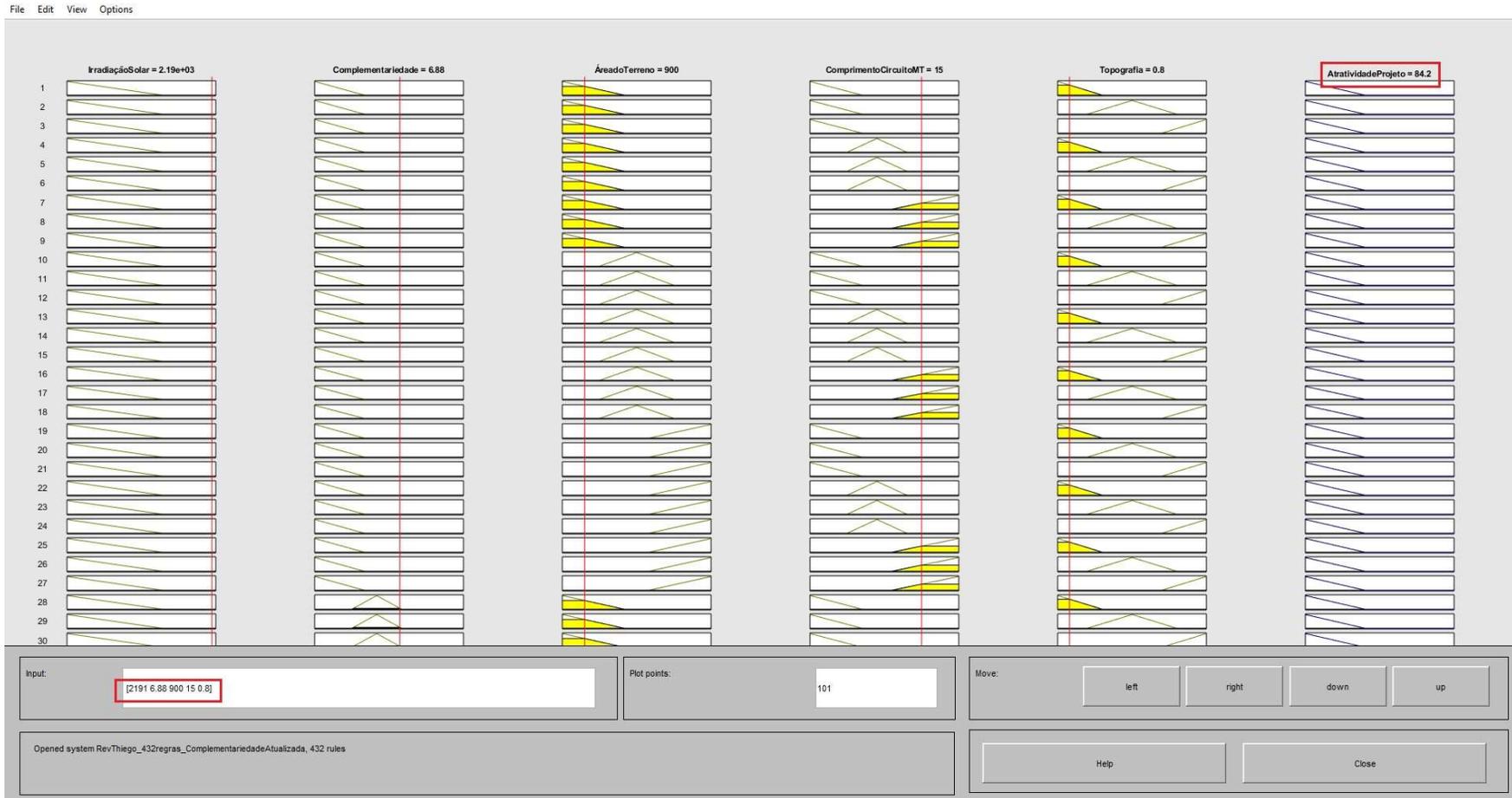


Figura 57- Resultado Projeto D – Lógica Fuzzy (Elaborado pelo autor, 2020)

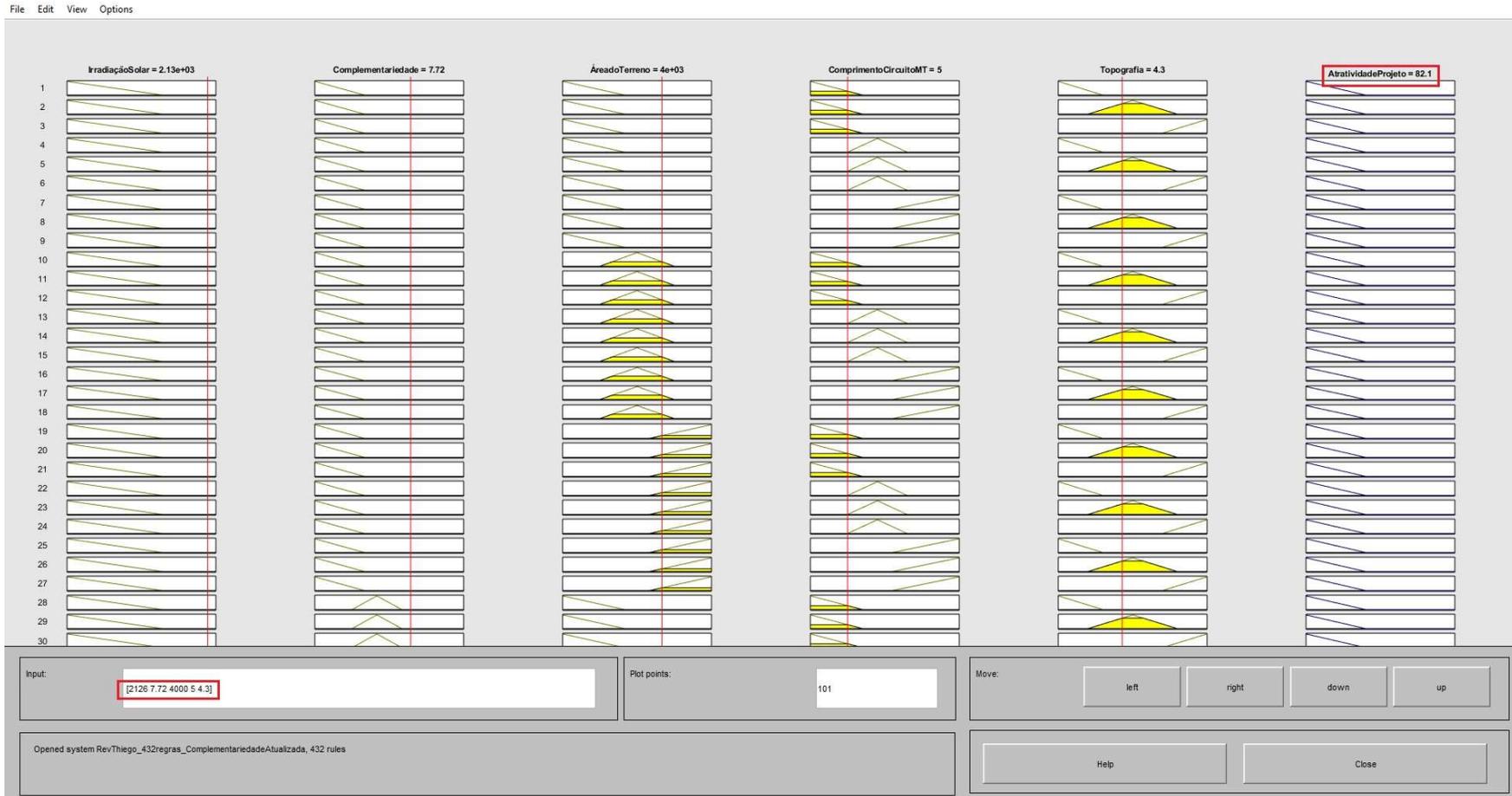


Figura 58- Resultado Projeto E – Lógica *Fuzzy* (Elaborado pelo autor, 2020)

APÊNDICE 3 – TABELA NOTAS DE JULGAMENTO MÉTODO AHP

Pergunta exemplo: A IRRADIAÇÃO SOLAR é X mais importante que a COMPLEMENTARIEDADE. Ou, A COMPLEMENTARIEDADE é X mais importante que a IRRADIAÇÃO SOLAR.

		COMPARATIVO ENTRE CRITÉRIOS																			
1	Irradiação Solar	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Complementariedade
2	Irradiação Solar	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Área do Terreno
3	Irradiação Solar	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Comprimento Circuito Média Tensão
4	Irradiação Solar	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Topografia
5	Complementariedade	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Área do Terreno
6	Complementariedade	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Comprimento Circuito Média Tensão
7	Complementariedade	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Topografia
8	Área do Terreno	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Comprimento Circuito Média Tensão
9	Área do Terreno	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Topografia
10	Comprimento Circuito Média Tensão	>=9,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9,5	Topografia

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2020