

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Vinícius André Uberti**

**LÓGICA FUZZY PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA  
EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO DE  
LAVOURAS DE ARROZ**

**Santa Maria, RS  
2017**



**Vinícius André Uberti**

**LÓGICA FUZZY PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM  
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO DE LAVOURAS DE ARROZ**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Alzenira da Rosa Abaide**  
**Coorientador: Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher**

**Santa Maria, RS**  
**2017**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Uberti, Vinicius André

Lógica Fuzzy para avaliação de eficiência energética em sistemas de irrigação de lavouras de arroz / Vinicius André Uberti.- 2017.

172 p.; 30 cm

Orientadora: Alzenira da Rosa Abaide

Coorientador: Luciano Lopes Pfitscher

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2017

1. Eficiência Energética 2. Irrigação de Lavouras de Arroz 3. Lógica Fuzzy I. Abaide, Alzenira da Rosa II. Pfitscher, Luciano Lopes III. Título.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Vinicius André Uberti. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: vuberti@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**LÓGICA FUZZY PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO DE  
LAVOURAS DE ARROZ**

elaborada por  
**Vinícius André Uberti**

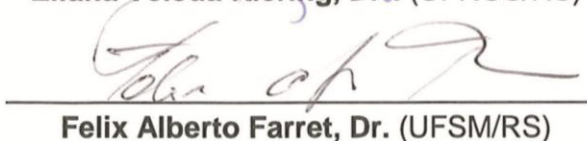
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
**Alzenira da Rosa Abaide, Dr<sup>a</sup>. (UFSM/RS)**  
(Presidente/Orientadora)

  
**Luciano Lopes Pfitscher, Dr. (UFSC/SC)**  
(Coorientador)

  
**Eliana Veleda Klering, Dr<sup>a</sup>. (UFRGS/RS)**

  
**Felix Alberto Farret, Dr. (UFSM/RS)**

Santa Maria, 24 de Março de 2017.



"É preciso estudar muito para saber um pouco."

Montesquieu





## **AGRADECIMENTOS**

Ao longo de todo o período de realização deste trabalho, pessoas especiais me ajudaram e me deram suporte para seguir em frente, e sem dúvidas seria impossível chegar ao final desta etapa na ausência delas.

Agradeço primeiramente a Deus e aos bons espíritos por terem me dado serenidade e persistência necessárias para as inúmeras horas de dedicação à elaboração desta dissertação.

Agradeço especialmente à minha orientadora, professora Alzenira, e ao meu coorientador, professor Luciano, pela confiança, pela paciência e por toda a dedicação na correção e revisão deste texto e nas orientações certeiras nos momentos de apuros. Vocês foram fundamentais para o resultado final do trabalho.

Agradeço também de forma especial à minha noiva Eduarda, que me incentivou todo o tempo, aguentou meu mau humor e me deu confiança nas horas de hesitação. Eduarda, muito obrigado por tudo, você é minha luz.

Agradeço à minha família por todo o suporte psicológico prestado. Minha mãe Claudia, meu pai Sérgio e minha irmã Adriane, vocês são muito especiais e me dão muita força para superar cada novo desafio.

Agradeço, ainda, aos colegas e amigos Maicon Evaldt, Lúcio Prade e Diego Saraiva pelas inúmeras dicas e conselhos, por me passarem tranquilidade e por me apoiarem nos momentos difíceis.

Deixo meu agradecimento aos professores Diego Berlezi, Karine Magnago e Alexandre Barin, da UFSM, e Paulo Pereira e Rodrigo Figueiredo, da Unisinos, e aos colegas Nelson Knak Neto, Leonardo Nogueira, Luciano Knevitz e Enzo Ocanha, que de forma muito cordial me auxiliaram com questões técnicas. E aos colegas Sérgio Bohrer e Angrigo Neves que sempre me passaram tranquilidade neste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos especialistas entrevistados, aos quais guardo o sigilo de nome, que foram muito atenciosos e que compraram a ideia do trabalho, prestando esclarecimentos sempre que foi solicitado.

A todos vocês e aos que indiretamente tenham contribuído de alguma forma a este trabalho, deixo meu singelo agradecimento.



## RESUMO

### LÓGICA FUZZY PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO DE LAVOURAS DE ARROZ

AUTOR: Vinícius André Uberti  
ORIENTADORA: Dra. Alzenira da Rosa Abaide  
COORIENTADOR: Dr. Luciano Lopes Pfitscher

A eficiência energética cumpre um importante papel em sistemas elétricos de potência, pois um pequeno incremento percentual pode gerar significativas economias financeira e de energia. Em países cuja economia é baseada na agricultura, a irrigação de grandes áreas representa parcela considerável no consumo de energia elétrica. Estas instalações geralmente não são automatizadas e as bombas de irrigação operam continuamente ignorando chuvas e outros fatores que poderiam permitir seu desligamento. Outros aspectos usualmente detectados nas lavouras de arroz são instalações elétricas e mecânicas precárias, vazamentos, equipamentos ultrapassados e motores mal dimensionados ou reconicionados. Todos estes elementos contribuem para a redução da eficiência energética nestas instalações e representam um custo extra ao produtor rural. Além disso, a regulamentação brasileira obriga às concessionárias de distribuição o investimento de 0,5% de sua receita operacional líquida em projetos de eficiência energética no uso final. O objetivo principal desta dissertação é desenvolver uma ferramenta de avaliação de eficiência energética de lavouras de arroz, através de um índice de eficiência correspondente à safra e a estimativa da possibilidade de economia de energia elétrica. Esta ferramenta auxiliará as companhias de distribuição a priorizar a alocação de recursos destinados à eficiência energética neste tipo de consumidor e, ainda, ajudará estes consumidores a reduzir o consumo de energia elétrica e de água. A metodologia proposta é desenvolvida através de um algoritmo Fuzzy baseado em regras. O algoritmo considera uma grande quantidade de variáveis, que incluem características da lavoura, dados meteorológicos e condições operacionais do sistema de irrigação. Além disso, a ferramenta proposta é capaz de identificar situações com possibilidade de ocorrência de perdas não técnicas. A validação da metodologia proposta foi realizada utilizando quinze conjuntos de dados de safras reais de lavouras localizadas no Rio Grande do Sul. Resultados demonstraram a operação adequada da ferramenta, que indicou quatro casos com índice de grande ineficiência, com possibilidade de redução de consumo de energia entre 33% e 42%, e cinco casos com indicação de possibilidade de ocorrência de perdas não técnicas.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética. Irrigação de Lavouras de Arroz. Lógica Fuzzy.



## ABSTRACT

### **FUZZY-BASED METHODOLOGY FOR EVALUATION OF ENERGY EFFICIENCY ON RICE CROPS' IRRIGATION SYSTEMS**

AUTHOR: Vinícius André Uberti  
ADVISER: Alzenira da Rosa Abaide, PhD.  
CO ADVISER: Luciano Lopes Pfitscher, PhD.

Energy efficiency plays an important role in electric power systems, since a small percentage increment in efficiency may lead to significant financial and energy savings. In agricultural-based economy countries, large areas of irrigation represent a meaningful parcel in electrical energy consumption. These installations are generally not automated and the pumps operate continuously regardless of rainfall and other factors that could allow their shutdown. Other aspects usually detected in rice farms are precarious facilities, water leaks, outdated equipment and wrongly dimensioned or reconditioned electric motors. All these elements contribute to the electrical efficiency reduction on this kind of installation and represent an extra cost of the crop cultivation. Furthermore, in Brazil, government regulations impose power utilities to invest 0.5% of their net earnings in end users' efficiency projects. The main objective of this work is to create a tool to evaluate electrical energy efficiency of irrigated rice crops, establishing an index of efficiency and an estimative of possible energy savings that supports the power utilities to prioritize the allocation of energy efficiency resources on this kind of consumers and also that helps the rural producers to avoid extra electricity costs and reduce water consumption. The proposed methodology is developed through a rule-based Fuzzy algorithm that translates the opinion of specialists at meteorology, soil and rice cultivation. The algorithm considers a wide number of variables, including farm characteristics, meteorological data, and operation conditions of the irrigation system. In addition, the proposed tool is capable of identify possible situations of non-technical losses occurrence. The validation of the proposed methodology was accomplished using fifteen real datasets from irrigated rice crops from Rio Grande do Sul State. Results demonstrated the tool's proper operation, indicating four cases with index of great inefficiency, along with possible energy savings between 33% and 42%, and five cases with flag of non-technical losses possibility.

**Index Terms:** Energy Efficiency. Rice's Irrigation Systems. Fuzzy Logic.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição da cultura do arroz no Brasil .....	30
Figura 2.2 – Produção média de arroz por município no RS entre 2009 e 2011 .....	30
Figura 2.3 – Arroz de sequeiro com irrigação por aspersão .....	31
Figura 2.4 – Arroz irrigado por inundação .....	32
Figura 2.5 – Bombas de levante instaladas em flutuador .....	34
Figura 2.6 – Bombas de levante submersa com transmissão por correia e polias .....	34
Figura 2.7 – Canal de irrigação separado das parcelas de arroz por taipas .....	35
Figura 2.8 – (a) Motor e (b) rotor de bomba de levante, degradados pelo uso sem manutenção .....	36
Figura 2.9 – Representação das perdas de água por percolação vertical (P), fluxo lateral (FL), evaporação (E) e transpiração (T) .....	38
Figura 2.10 – Método de classificação de oportunidades de economia de energia .....	43
Figura 2.11 – Diagrama $Q \times H$ de um sistema de bombeamento.....	48
Figura 3.1 – Fluxograma geral da metodologia proposta .....	56
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do modelo .....	57
Figura 3.3 – Variáveis de entrada consideradas nesta metodologia .....	58
Figura 3.4 – Sítio com informações agrícolas disponibilizadas pela Embrapa ...	59
Figura 3.5 – Localização das estações meteorológicas do INMET .....	61
Figura 3.6 – Fluxograma do modelo baseado em Fuzzy .....	66
Figura 3.7 – Estrutura da modelagem Fuzzy .....	67
Figura 3.8 – Funções de pertinência da variável <i>Área Irrigada</i> .....	69
Figura 3.9 – Funções de pertinência da variável <i>Altura da Lâmina d'Água</i> .....	71
Figura 3.10 – Funções de pertinência da variável <i>Permeabilidade Média do Solo</i> .....	72
Figura 3.11 – Funções de pertinência da variável <i>Evaporação</i> .....	74
Figura 3.12 – Funções de pertinência da variável <i>Precipitação</i> .....	75
Figura 3.13 – Funções de pertinência da variável <i>Velocidade Média do Vento</i> .	76
Figura 3.14 – Funções de pertinência da variável <i>Altura do Levante</i> .....	78
Figura 3.15 – Funções de pertinência da variável <i>Comprimento da Tubulação</i> .	79
Figura 3.16 – Curva característica de uma bomba centrífuga .....	80
Figura 3.17 – Funções de pertinência da variável <i>Eficiência da Bomba</i> .....	82
Figura 3.18 – Curvas características do motor de indução trifásico .....	83
Figura 3.19 – Funções de pertinência da variável <i>Eficiência do Motor</i> .....	85
Figura 3.20 – Funções de pertinência da variável <i>Área Irrigada</i> .....	87
Figura 3.21 – Estrutura controlador Lavoura .....	88
Figura 3.22 – Variável de saída <i>Indicador de necessidade de irrigação</i> .....	89
Figura 3.23 – Estrutura do controlador Meteorológico .....	90
Figura 3.24 – Estrutura do controlador Instalação de Levante .....	91

Figura 3.25 – Variável <i>Indicador de Consumo</i> – <i>Instalação de levante</i> .....	92
Figura 3.26 – Estrutura controlador <i>Consumo</i> .....	93
Figura 3.27 – Variável de saída <i>Indicador de Consumo</i> .....	94
Figura 4.1 – Lavoura LAV-01 .....	102
Figura 4.2 – Lavoura LAV-02 .....	102
Figura 4.3 – Lavoura LAV-03 .....	102
Figura 4.4 – Análise de eficiência energética da lavoura LAV-01 .....	112
Figura 4.5 – Análise de eficiência energética da lavoura LAV-02 .....	113
Figura 4.6 – Análise de eficiência energética da lavoura LAV-03 .....	113
Figura A.1 – Dicotomia característica da lógica clássica .....	134
Figura A.2 – Exemplo de conjunto Fuzzy e suas funções de pertinência .....	136
Figura A.3 – Função de pertinência triangular .....	137
Figura A.4 – Função de pertinência trapezoidal .....	138
Figura A.5 – Funções de pertinência $\Gamma$ e $L$ .....	139
Figura A.6 – Exemplo de variável linguística .....	141
Figura A.7 – Operações entre conjuntos Fuzzy .....	142
Figura A.8 – Normas triangulares utilizadas na intersecção de conjuntos Fuzzy .....	144
Figura A.9 – Conormas triangulares utilizadas na união de conjuntos Fuzzy ...	145
Figura A.10 – Arquitetura típica Fuzzy .....	146
Figura A.11 – Composição máximo dos mínimos .....	149
Figura A.12 – <i>Defuzzyficação</i> pelo método do centroide .....	151
Figura B.1 – Classificação dos solos quanto ao seu tipo de drenagem .....	161



## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Classificação dos solos quanto ao seu tipo de drenagem .....	60
Quadro 3.2 – Classificação das variáveis no cálculo de Consumo Eficiente Estimado .....	95
Quadro A.1 – Consistência entre condições e conclusões de regras Fuzzy .....	148
Quadro B.1 – Classificação dos solos quanto ao seu tipo de drenagem .....	160



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Área Irrigada</i> .....	69
Tabela 3.2 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Altura da Lâmina d'Água</i> .....	70
Tabela 3.3 – Proposta qualitativa de <i>Permeabilidade Média do Solo</i> .....	72
Tabela 3.4 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Permeabilidade Média do Solo</i> .....	72
Tabela 3.5 – Média mensal da evaporação para o Estado do Rio Grande do Sul – Período 1961-1990 .....	73
Tabela 3.6 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Evaporação</i> .....	74
Tabela 3.7 – Distribuição pluviométrica mensal para o Estado do Rio Grande do Sul – Período 1961-1990 .....	75
Tabela 3.8 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Precipitação</i> .....	75
Tabela 3.9 – Intensidade média mensal do vento para o Estado do Rio Grande do Sul – Período 1961-1990 .....	76
Tabela 3.10 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Velocidade Média do Vento</i> .....	77
Tabela 3.11 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Altura do Levante</i> .....	77
Tabela 3.12 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Comprimento da Tubulação</i> .....	78
Tabela 3.13 – Proposta de avaliação qualitativa de eficiência de bombas de levante de acordo com seu estado de conservação .....	81
Tabela 3.14 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Eficiência da Bomba</i> .....	82
Tabela 3.15 – Proposta de avaliação empírica de eficiência de motores usados no levante de acordo com seu estado de conservação ....	84
Tabela 3.16 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Eficiência do Motor</i> .....	85
Tabela 3.17 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Perdas de Água por Vazamento</i> .....	86
Tabela 3.18 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Indicador de Necessidade de Irrigação – Lavoura</i> .....	89
Tabela 3.19 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Indicador de Consumo – Instalação de Levante</i> .....	92
Tabela 3.20 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Indicador de Consumo</i> .....	94
Tabela 3.21 – Valores de referência utilizados para a modelagem do Consumo Eficiente Estimado .....	96

Tabela 3.22 – Classificação da instalação quanto ao Nível de Eficiência .....	98
Tabela 4.1 – Dados gerais das lavouras .....	103
Tabela 4.2 – Períodos observados e consumos verificados nas lavouras sob análise .....	104
Tabela 4.3 – Dados meteorológicos utilizados nos testes e validação do modelo .....	105
Tabela 4.4 – Valores arbitrados para a realização dos testes de validação .....	106
Tabela 4.5 – Resultados dos testes de validação .....	108
Tabela 4.6 – Análise de eficiência energética das safras reais .....	110
Tabela 4.7 – Valores utilizados para teste de aplicação da metodologia .....	115
Tabela 4.8 – Índices de eficiência da lavoura hipotética .....	115
Tabela 4.9 – Consumo Estimado de acordo com a variação das entradas .....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CONPET	Programa Nacional de Conservação de Petróleo e Derivados
CONSERVE	Programa de Conservação de Energia do Setor Industrial
$C_E$	Consumo Estimado
$C_{EF}$	Consumo Eficiente Estimado
$C_V$	Consumo Verificado
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i> (Análise por Envoltória de Dados)
EFA	<i>Exploratory Fatorial Analysis</i> (Análise Fatorial Exploratória)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
$E_{PE}$	Energia Passível de Economia
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura)
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IRGA	Instituto Rio-Grandense do Arroz
MT	Média Tensão
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PEE	Programa de Eficiência Energética das Empresas de Distribuição
PME	Possibilidade de Melhoria em Eficiência
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
ROL	Receita Operacional Líquida
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SOSBAI	Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado
SPE	Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética
WUE	<i>Water Use Efficiency</i> (Eficiência no Uso da Água)



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	METODOLOGIA	25
1.3	OBJETIVOS	26
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>29</b>
2.1	CARACTERIZAÇÃO DAS LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADO	29
2.1.1	Irrigação Suplementar	32
2.1.2	Impacto Biometeorológico	36
2.1.3	Características do Solo	37
2.2	CARACTERÍSTICAS DO CONSUMO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS	39
2.3	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO	40
2.3.1	Investimentos do Programa de Eficiência Energética	43
2.3.2	Eficiência energética em lavouras de arroz irrigado	45
2.3.2.1	<i>Eficiência no consumo de energia elétrica</i>	47
2.3.3	Aplicação de lógica Fuzzy em eficiência na cultura de arroz	50
2.4	PERDAS NÃO TÉCNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS	51
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO DE ARROZ - METODOLOGIA PROPOSTA</b>	<b>55</b>
3.1	DETALHAMENTO DA METODOLOGIA	55
3.2	SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E AQUISIÇÃO DE DADOS	57
3.2.1	Características da lavoura	58
3.2.2	Dados meteorológicos	60
3.2.3	Características do sistema de levante	62
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA	63
3.4	MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DA LÓGICA FUZZY	64
3.4.1	Apresentação geral	65
3.4.2	Base de dados	67
3.4.3	Fuzzyficação das variáveis de entrada	68
3.4.3.1	Área Irrigada	68
3.4.3.2	Altura da Lâmina d'Água	70
3.4.3.3	Permeabilidade Média do Solo	71
3.4.3.4	Evaporação	73
3.4.3.5	Precipitação	74
3.4.3.6	Velocidade Média do Vento	76
3.4.3.7	Altura do Levante	77
3.4.3.8	Comprimento da Tubulação	78
3.4.3.9	Eficiência da Bomba	79
3.4.3.10	Eficiência do Motor	82
3.4.3.11	Perdas de Água por Vazamentos	85
3.4.4	Inferência Fuzzy	87
3.4.4.1	Controlador Lavoura	88
3.4.4.2	Controlador Meteorológico	90

3.4.4.3 Controlador Instalação de Levante .....	90
3.4.4.4 Controlador Consumo.....	92
<b>3.4.5 Defuzzyficação e interpretação dos resultados .....</b>	<b>93</b>
3.5 CONSUMO EFICIENTE ESTIMADO.....	95
3.6 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO .....	97
<b>4 TESTES DE VALIDAÇÃO E DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>101</b>
4.1 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	101
4.1.1 Descrição do conjunto de dados para validação.....	101
4.1.2 Padrão de aceitação do modelo .....	107
4.1.3 Testes de validação e resultados .....	107
4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ÀS SAFRAS REAIS.....	109
4.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A UMA SAFRA HIPOTÉTICA .....	114
4.4 VERIFICAÇÃO DA SENSIBILIDADE ÀS VARIAÇÕES DE ENTRADA.....	116
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>119</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>
<b>APÊNDICE A – LÓGICA FUZZY .....</b>	<b>131</b>
A.1 LÓGICA FUZZY OU LÓGICA DIFUSA .....	131
A.2 APLICAÇÃO DA MODELAGEM FUZZY .....	131
A.3 TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY.....	132
A.4 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA.....	136
A.4.1 Função de pertinência triangular .....	136
A.4.2 Função de pertinência trapezoidal .....	138
A.4.3 Funções de Pertinência $\Gamma$ e L.....	139
A.5 VARIÁVEIS E TERMOS DE LINGUAGEM FUZZY .....	140
A.6 OPERAÇÕES FUZZY .....	141
A.6.1 União, intersecção e complemento .....	141
A.6.2 Normas e conormas triangulares .....	143
A.7 FUZZYFICAÇÃO.....	145
A.8 ARQUITETURA FUZZY BASEADA EM REGRAS.....	146
A.8.1 Sistema Especialista.....	147
A.8.2 Controlador Mamdani .....	148
A.9 DEFUZZYFICAÇÃO.....	150
A.10 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	151
A.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	152
<b>APÊNDICE B – ENTREVISTAS COM ESPECIALISTAS .....</b>	<b>153</b>
B.1 ENGENHEIRO AGRÔNOMO IRGA.....	153
B.2 DOUTORA EM FITOTECNICA, COM ÊNFASE EM AGROMETEOROLOGIA.....	157
B.3 MESTRE EM AGRONOMIA, COM ÊNFASE EM SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS .....	160
<b>APÊNDICE C – ALGORITMO FUZZY .....</b>	<b>163</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo energético de grande versatilidade devido a sua facilidade de transmissão e de transformação, entre outros aspectos. Também é um recurso fundamental a todos os setores industriais e à sociedade atual. Face à sua importância, é indispensável o planejamento da utilização e da expansão do sistema elétrico, de forma a garantir o contínuo atendimento à demanda.

Quando a energia elétrica produzida não é devidamente utilizada, entretanto, entende-se que o sistema é ineficiente do ponto de vista energético e que os investimentos realizados na manutenção e na ampliação da oferta de energia elétrica não são plenamente aproveitados. Apesar da ocorrência de perdas ser inerente em toda a cadeia deste recurso, a minimização das mesmas é matéria de grande interesse para todas as partes envolvidas.

O combate ao desperdício de energia elétrica na indústria e na sociedade como um todo é encorajado por meio de organismos governamentais e de ações legislatórias. Um exemplo destas ações é o Programa de Eficiência Energética das Empresas de Distribuição (PEE), que determina o investimento de 0,5% da receita operacional líquida destas empresas em programas e projetos de eficiência. Evidente que, para os órgãos ligados ao governo, o foco destas ações é o não esgotamento dos recursos naturais e o planejamento do Sistema Elétrico de Potência; entretanto, fatores econômicos sempre colaboram neste sentido, não apenas para as instituições públicas, como para as demais esferas. O setor agroindustrial não foge desta lógica.

Pelo lado do produtor rural, a utilização eficiente da energia elétrica implica na redução de custos de produção e o aumento de seu faturamento líquido. Pelo viés da concessionária de distribuição, consumidores mais eficientes possibilitam a postergação de investimentos em reforços das redes elétricas e a redução de tarifas. Normalmente, as redes rurais possuem baixo retorno financeiro para as concessionárias, pois tratam-se de redes radiais de grandes extensões, o que ocasiona elevados níveis de perdas técnicas, estão situadas em locais distantes e de difícil acesso, elevando custos com manutenções, e atendem a cargas sazonais, que operam apenas nos meses da safra. Todas estas características somadas

contribuem ainda para a ocorrência de falhas nestes circuitos em uma frequência maior que nas redes urbanas.

Apesar de uma notável modernização da agroindústria nos últimos anos, inúmeras instalações ainda utilizam equipamentos precários, obsoletos ou mal dimensionados, e é praticamente nula a utilização de sistemas automatizados. Incluem-se neste panorama as instalações de levante das lavouras de arroz irrigado.

No Brasil, a produção do arroz representa 5,61% do total do setor agrícola. O Rio Grande do Sul, por sua vez, concentra quase 70% desta produção (CONAB, 2015), onde é adotado em sua totalidade o cultivo do arroz irrigado. Os custos com energia elétrica nas instalações de levante para irrigação do arroz representam uma movimentação de cerca de R\$ 335 milhões anualmente (IRGA, 2016). Considerando a dimensão desta cifra e que muitas instalações são ineficientes, os potenciais de conservação de energia e de economia financeira nestes consumidores são representativos. Além destes, a eficiência dos sistemas de irrigação implica na preservação dos recursos hídricos, aspecto fundamental nos dias atuais.

A aplicação de recursos para atingir melhores níveis de eficiência só é possível a partir do conhecimento efetivo do estado em que se encontram estas instalações e do diagnóstico da possibilidade de conservação de energia. Muitas vezes, a utilização de modelos matemáticos e ferramentas computacionais auxiliam nesta tarefa e trazem critérios para a priorização na escolha de projetos de eficiência.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O segmento orizícola representa uma das melhores relações de custo-benefício no desenvolvimento de projetos de eficiência energética (AES SUL, 2010). Todavia, a parcela de recursos do PEE investida neste público é baixa.

Um sistema de levante para irrigação ineficiente ocasiona perdas financeiras ao produtor, pois adiciona custos extras com energia, e à concessionária, pois esta dispense montantes maiores com obras para reforço das redes e com multas pelo não atendimento dos indicadores de continuidade.

Por outro lado, a falta de um diagnóstico que aponte se uma lavoura é eficiente ou ineficiente e o quanto se poderia economizar em cada safra, impossibilita a identificação das melhores oportunidades em eficiência energética,

mantém os recursos do PEE afastados e perpetua o problema de baixa eficiência nestas instalações.

A identificação das situações com melhor potencial de aumento de eficiência seria o primeiro passo no sentido de captar mais investimentos para este público.

Esta dissertação propõe uma metodologia para a avaliação da eficiência no consumo de energia elétrica nas instalações de levante do arroz irrigado, com o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie os produtores na identificação do potencial de redução de consumo de energia e contribua à captação dos recursos do Programa de Eficiência Energética das Empresas de Distribuição.

## 1.2 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta que permita a rápida avaliação de eficiência energética dos sistemas de levante dos produtores rurais da cultura do arroz irrigado, sem a necessidade do levantamento prático individual de eficiência dos equipamentos.

A ferramenta terá seu desenvolvimento apoiado na Lógica Fuzzy, ou Lógica Difusa, com um sistema especialista baseado em regras. A Lógica Fuzzy possui a capacidade de traduzir em regras o conhecimento empírico de especialistas da área, o que possibilita a modelagem de uma lavoura de arroz irrigado e a posterior estimativa de consumo eficiente do sistema de levante. Para que a interpretação matemática represente o comportamento de uma situação real o mais próximo possível, serão consideradas na entrada do modelo tanto as informações da lavoura e da instalação de levante, quanto os dados meteorológicos da safra. No final, é realizada a comparação entre o consumo eficiente estimado pelo modelo e o consumo real verificado durante a safra. O distanciamento entre estes valores definirá o nível de eficiência da instalação e o montante de energia passível de ser evitado.

A aplicação desta metodologia em diferentes unidades consumidoras possibilitará a classificação destas lavouras quanto à eficiência, o que poderá servir de critério pelas concessionárias de distribuição para a priorização dos investimentos do PEE.

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é:

- Desenvolver uma metodologia para avaliação de eficiência energética, referente ao consumo de energia elétrica em sistemas de levante para irrigação de lavouras de arroz, a partir da comparação do consumo eficiente estimado com o consumo real verificado durante a safra, empregando a Lógica Fuzzy.

Para o atendimento do objetivo principal, o mesmo foi subdividido nos seguintes objetivos específicos:

- Construir um modelo matemático baseado em Lógica Fuzzy que seja capaz de calcular, com precisão, o consumo de energia elétrica para o levante de uma safra de arroz irrigado a partir da entrada de valores reais de características da lavoura, dados meteorológicos e informações do sistema de levante;
- Analisar as relações entre o consumo de energia elétrica, as características da lavoura e as informações meteorológicas;
- Identificar os consumidores com baixa eficiência e classificá-los em relação à possibilidade de melhoria em eficiência;
- Identificar os consumidores com consumo considerado anormal, apontando a possibilidade de ocorrência de perdas não técnicas nestes casos;
- Propor ações de melhoria para a conservação de energia no nível do consumidor.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos, conforme segue:

- Capítulo 1: capítulo introdutório para a contextualização do tema abordado, definição dos objetivos e proposta do método para alcançá-los;
- Capítulo 2: apresentação da revisão bibliográfica, abordando conceitos e tópicos sobre eficiência energética, focando em redes de distribuição rurais e em sistemas de levante de lavouras de arroz irrigado;

- Capítulo 3: apresentação da metodologia proposta para a avaliação de eficiência energética das safras de arroz irrigado;
- Capítulo 4: capítulo destinado à apresentação dos resultados dos testes de validação e de funcionamento da metodologia, a partir de dados reais de safras de lavouras do Rio Grande do Sul;
- Capítulo 5: apresentação das conclusões e das considerações finais desta dissertação, bem como sugestões de continuidade do trabalho.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No ambiente econômico altamente desafiador em que se encontram os produtores rurais do arroz irrigado, o uso racional dos insumos energéticos assume um caráter relevante. A redução das perdas e o aumento da eficiência energética nos processos produtivos tornam-se, cada vez mais, aspectos estratégicos na agroindústria. Neste cenário, um dos pontos de maior potencial de conservação de energia elétrica é o sistema de irrigação das lavouras de arroz irrigado.

Neste capítulo é apresentado um sumário da revisão bibliográfica realizada sobre eficiência energética, características das instalações elétricas rurais e características de lavouras de arroz irrigado. A abordagem adotada é a apresentação geral do assunto seguida pelo enfoque no tema principal: a eficiência energética em sistemas de irrigação de lavouras de arroz. No final do capítulo são feitas considerações que embasam a metodologia proposta nesta dissertação.

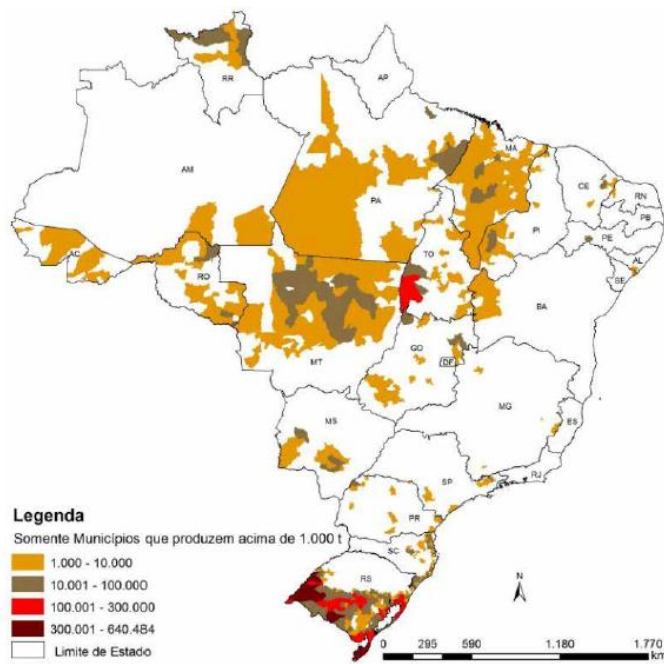
### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS LAVOURAS DE ARROZ IRRIGADO

A cultura do arroz tem grande expressão na agricultura brasileira. Na safra 2014/2015 o arroz foi cultivado em uma área total de mais de 2,13 milhões de hectares. Destes, obteve-se uma produção superior a 12,4 milhões de toneladas, o que representa aproximadamente 5,61% da produção total de grãos no país, ficando atrás apenas da soja, com 50,73%, e do milho, com 36,70% (CONAB, 2015).

O Estado do Rio Grande do Sul concentra 68,1% da produção total de arroz do Brasil. O segundo maior produtor é Santa Catarina, com 8,5% da produção nacional, seguido por Tocantins (4,8%), Mato Grosso (4,7%) e Maranhão (4,6%) (MAPA, 2016). A Figura 2.1 ilustra a distribuição da cultura do arroz no país.

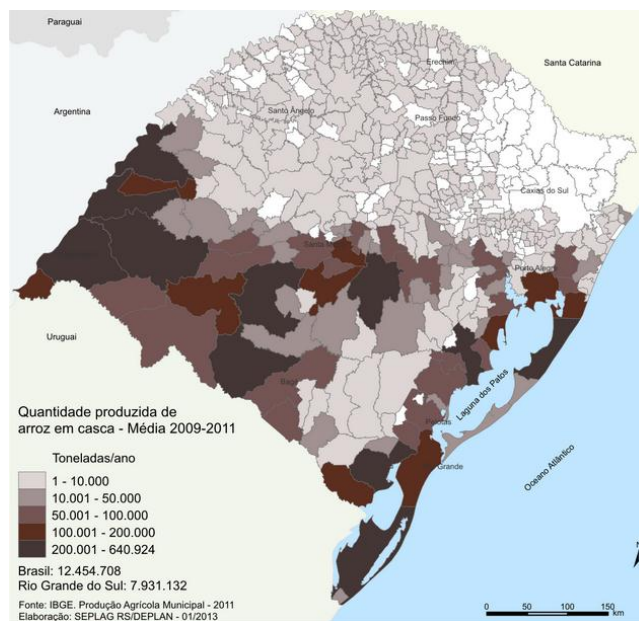
No Rio Grande do Sul, as regiões de maior produção são: Zona Sul, Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna e Planície Costeira Externa. A Figura 2.2 apresenta geograficamente a produção média de arroz no Estado.

Figura 2.1 – Distribuição da cultura do arroz no Brasil



Fonte: CONAB, 2015.

Figura 2.2 – Produção média de arroz por município no RS entre 2009 e 2011



Fonte: IBGE, 2006.



O cultivo do arroz basicamente divide-se em dois grupos: o cultivo de arroz irrigado e o cultivo de sequeiro, também conhecido como “cultivo em terras altas”.

O cultivo de sequeiro é comum na região Centro-Oeste do país, onde predomina o ecossistema do cerrado. O plantio é realizado de forma que o período de maior exigência hídrica da planta coincida com a época mais chuvosa da região. Por possuírem solos de baixa capacidade de retenção de água, os produtores destas regiões podem contar com irrigação suplementar por aspersão para compensar possíveis irregularidades na distribuição das chuvas, como ilustra a Figura 2.3. Além disso, são utilizados cultivares (tipos de grãos) específicos com maior tolerância à seca, mas que não possuem produtividade tão elevada quanto o arroz irrigado, possuindo média produtiva entre 2.000 e 3.000 kg ha<sup>-1</sup> (MARCOLAN et. al., 2008).

Figura 2.3 – Arroz de sequeiro com irrigação por aspersão



Fonte: Embrapa, 2016.

Já o arroz irrigado é responsável por cerca de 75% da produção nacional. Esta parcela normalmente é produzida em ecossistemas de várzea e possui produtividade superior a 7.000 kg ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2016; IRGA, 2016).

O arroz irrigado é considerado uma cultura temporária de verão. Seu período de safra inicia em setembro, quando da preparação do solo, o plantio é realizado

entre os meses de outubro e dezembro e a colheita entre o final de janeiro e o início de abril, variando de acordo com o cultivares plantado.

Como o nome já diz, o sistema de cultivo do arroz irrigado necessita de irrigação suplementar. Normalmente utiliza-se o método de inundação, como visualizado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Arroz irrigado por inundação



Fonte: Embrapa, 2016.

### **2.1.1 Irrigação Suplementar**

A irrigação suplementar das culturas irrigadas por inundação, tal qual o arroz irrigado, possuem demanda hídrica que seja suficiente para saturar o solo, formar a lâmina d'água, compensar a evapotranspiração, e repor as perdas por percolação vertical e as perdas laterais nos canais de irrigação (VOLTOLINI et. al., 2002).

O Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA) estima que é necessário um volume de água total entre 8.000 e 14.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para irrigação de uma safra, oriundo de levante e precipitação somados (IRGA, 2001).

No Rio Grande do Sul predomina o sistema de cultivo através de taipas com parcelas em nível e irrigação por inundação. A irrigação é realizada, primeiramente, com a captação de água da fonte disponível (rio ou lago) através das denominadas bombas de levante. Estas bombas podem recalcar a água para um reservatório em nível acima dos tabuleiros de arroz, ou diretamente para os canais de distribuição de água para os tabuleiros, o que é mais usual.

No sistema mais convencional, o controle de entrada de água e de drenagem das taipas é realizado manualmente, por um indivíduo chamado aguador. Este é o responsável pela manutenção de uma lâmina d'água contínua em todos os tabuleiros. Contudo devido às grandes extensões das lavouras, não é rara a ocorrência de excesso de água em algumas taipas, o que representa desperdício de água e energia elétrica no bombeio, ou ainda deficiência hídrica momentânea, que prejudica o desenvolvimento da planta e reduz a produtividade.

Nas situações em que o terreno apresenta maior declividade é utilizado o método de cultivo de parcelas em desnível. Nestes casos, o recalque da bomba de levante alimenta a parcela mais elevada, e as demais recebem a água da parcela anterior por gravidade.

A quantidade de água de reposição está diretamente associada com as condições climáticas no período da safra e das características do solo da lavoura.

Os sistemas de levante, por sua vez, são formados por conjunto motor-bomba e dutos de recalque. Sistemas típicos são ilustrados nas figuras 2.5 e 2.6. Estima-se que 79% das estações de bombeamento no Rio Grande do Sul sejam acionadas por motores elétricos, 6,7% por motores a combustão e 14,3% usam o desnível natural do terreno (IRGA, 2006).

Após o bombeio, a água é distribuída para as parcelas da lavoura através de canais de distribuição, conforme visualizado na Figura 2.7. Estes canais normalmente são formados por taipas.

Figura 2.5 – Bombas de levante instaladas em flutuador



Fonte: AES SUL, 2006.

Figura 2.6 – Bomba de levante submersa com transmissão por correia e polias



Fonte: Capturada pelo autor, 2016.

Figura 2.7 – Canal de irrigação separado das parcelas de arroz por taipas



Fonte: Embrapa, 2016.

Conforme AES SUL (2006), os motores elétricos utilizados nestas instalações são motores de indução trifásicos e possuem potências típicas entre 50 e 300 cv.

Durante o período de irrigação, o funcionamento dos motores é praticamente contínuo, sendo que a maior parte dos produtores preocupa-se em evitar o horário de ponta devido à tarifa de energia mais elevada. Este método utiliza um grande volume de água e apresenta baixa eficiência (CORREA, 1997).

Segundo dados do IRGA (2016), o percentual médio do custo total da safra atribuído ao uso da energia elétrica para irrigação é de cerca de 3,83%, o que representa financeiramente mais de R\$ 335 milhões, considerando a área plantada no país. O percentual de custos com energia elétrica é maior que o da semente, por exemplo, que é de 3,14%. Os maiores custos da safra são adubos (11,48%) e arrendamento (8,87%). Em algumas situações, entretanto, como na região oeste do estado do Rio Grande do Sul a parcela gasta com energia elétrica ultrapassa 10% do custo total da safra (KOPP, 2015).

Na instalação de levante, ainda, é comum a utilização de equipamentos degradados, como ilustra a Figura 2.8. É também comum equipamentos de irrigação com especificação incorreta, operação fora das condições nominais e falta de manutenção adequada (VIANA e RICARDO, 2007).

Figura 2.8 – (a) Motor e (b) rotor de bomba de levante, degradados pelo uso sem manutenção



Fonte: Capturada pelo autor, 2016.

Oportunidades de melhoria de eficiência são não só a troca destes equipamentos por outros mais eficientes, como em Arns (1995) e Moreira (2008), mas também a mudança de tecnologia, como o caso de Behrens (2014), que propõe uma metodologia de acionamento das bombas de levante em rotação variável, de acordo com a previsão meteorológica.

Os trabalhos de eficiência energética aplicados a sistemas de irrigação serão discutidos na seção 2.3.

### 2.1.2 Impacto Biometeorológico

A meteorologia é um aspecto relevante no que tange a necessidade de irrigação complementar da cultura do arroz irrigado no período de safra. Da mesma forma que a precipitação atmosférica contribui para a reposição e o acúmulo de água nas lavouras, variáveis como radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar contribuem para a aceleração da evapotranspiração da lavoura.

A evapotranspiração é definida como o movimento ascendente de água para a atmosfera, através da transpiração da superfície das plantas e da evaporação da superfície solo-água. A evapotranspiração do arroz irrigado por inundação depende da demanda evaporativa da atmosfera (relacionada com temperatura e umidade do

ar, velocidade do vento e intensidade e duração da luz solar) e é independente da fase de desenvolvimento da cultura (STONE, 2005).

Conforme a Sociedade Sul-Brasileira do Arroz Irrigado (SOSBAI), a disponibilidade de radiação solar no período reprodutivo da planta é aspecto fundamental e está diretamente relacionada com altos níveis de produtividade do arroz irrigado. A precipitação, neste período, é indesejada, apesar de representar economia no levante de irrigação (SOSBAI, 2014).

Um estudo realizado por He et. al. (2016) relaciona estatisticamente as variáveis climáticas com a produtividade do arroz na China desde 1961. Conforme os autores, as mudanças do clima são as maiores causadoras de incertezas e variabilidade de produção de arroz em nível mundial. Cerca de 90% das mudanças de produtividade podem ser explicadas devido a variações meteorológicas.

De acordo com Deng et. al. (2015), a escolha da data da semeadura conforme as características climáticas regionais é outro fator importante para os altos índices de produtividade do arroz irrigado. Os autores revelam ainda que a temperatura média no estágio de crescimento da vegetação deve ser mais elevada que no estágio de enchimento dos grãos, e o produtor deve estar atento a estas características.

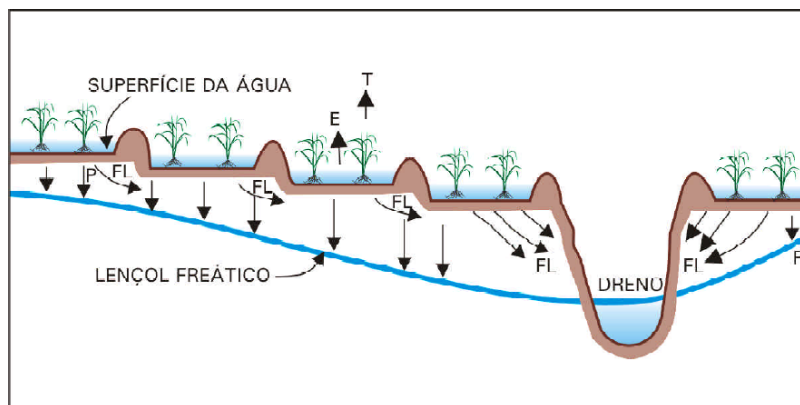
### **2.1.3 Características do Solo**

A produtividade e a eficiência no uso dos recursos energéticos e naturais no cultivo do arroz irrigado exigem o preparo especial do solo, como o correto nivelamento das células (KRUPNIK et. al, 2012), além de algumas características físicas do solo, como alta densidade, alta compactação, baixa taxa de infiltração e baixo diâmetro médio das partículas (KAZEMI et. al., 2010), e como baixa declividade do terreno, regularidade superficial e ausência de solos arenosos, pedregosos e de argila expansiva (SOSBAI, 2014). Ainda que estas características sejam atendidas pelos solos de cultivo de arroz irrigado, nos tabuleiros de arroz ocorrem perdas de água de duas maneiras: por percolação e por fluxos laterais (STONE, 2005).

A percolação é a infiltração vertical da água no solo no sentido do lençol freático. Já o fluxo lateral é a perda hídrica para drenos, o que ocorre nas últimas parcelas da lavoura, que são limítrofes com áreas não plantadas, canais de

drenagem, riachos ou rios. Este fluxo lateral será menor quanto menor for a diferença de nível entre a parcela de arroz e o dreno. Os fluxos laterais que ocorrem de uma parcela para outra de nível mais baixo não são considerados perdas do sistema de irrigação. A Figura 2.9 ilustra as drenagens por percolação e por fluxo lateral.

Figura 2.9 – Representação das perdas de água por percolação vertical (P), fluxo lateral (FL), evaporação (E) e transpiração (T)



Fonte: Stone, 2005.

Valores típicos de percolação e fluxo lateral em lavouras de arroz variam de 1 a 5 mm dia<sup>-1</sup> em solos muito argilosos e de 25 a 30 mm dia<sup>-1</sup> em solos arenosos (TABBAL et. al., 2002).

Para Singh et. al. (1993) são considerados solos com condições favoráveis ao cultivo do arroz irrigado aqueles que apresentam até 2 mm de perdas por percolação e fluxo lateral por dia. Os solos em que estas perdas excedam 10 mm dia<sup>-1</sup> têm, segundo os autores, sua aptidão ao cultivo do arroz irrigado questionada.

No Rio Grande do Sul, segundo Pinto et. al. (2004), os solos que recebem o cultivo do arroz irrigado são os chamados *solos de várzea*. Estes solos são encontrados normalmente nas planícies de rios e lagos. Caracterizam-se pelo hidromorfismo (deficiência de drenagem). Entre os solos de várzea, o que mais ocorre, com cerca de 11% de toda a superfície do Estado, é o planossolo hidromórfico.

Para Kazemi et. al. (2010) a cultura do arroz irrigado cria uma condição física pobre no solo, devido à dispersão dos agregados superficiais com a umidade. Este problema é amenizado, segundo o IRGA (2016), através da rotação de produção



com outras culturas como a soja, na proporção de três anos de arroz para um de soja.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DO CONSUMO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS

As redes elétricas de distribuição em áreas rurais possuem características peculiares em relação àquelas localizadas nos centros urbanos, onde destacam-se:

- Redes de grandes extensões;
- Baixa densidade populacional por quilômetro de rede;
- Curvas de carga sazonais e com baixo fator de carga;
- Inspeção de alguns trechos com acesso dificultado;
- Maior susceptibilidade a falhas e dificuldade de manutenção dos mesmos padrões de qualidade praticados nos centros urbanos.

O acesso dificultoso em alguns trechos da rede e as grandes distâncias a percorrer são fatores limitantes à inspeção das condições físicas da rede, o que ao longo do tempo leva a interrupções de abastecimento devido à sobreposição de vegetação nos cabos (curto-circuito entre fases) e queda de postes (curto-circuito fase-terra).

As áreas rurais apresentam grande dispersão de consumidores, segundo Ribeiro et. al. (2012), variando entre 0,1 e 5,0 consumidores por quilômetro de rede elétrica. Segundo Cavalcanti e Luciano (2001), para atender aos padrões técnicos de queda de tensão em áreas de grande dispersão, torna-se necessária a instalação de um número grande de transformadores de baixa capacidade nominal, o que leva a uma quantidade maior de perdas técnicas no sistema como um todo, principalmente perdas por magnetização e desmagnetização destes equipamentos.

Freeman et. al. (2009) apresentam algumas considerações sobre perdas e citam o baixo fator de potência como um grande contribuinte para as perdas técnicas nas redes rurais. Bortoni et. al. (2007) trazem como maiores causadores do baixo fator de potência o superdimensionamento de motores e o baixo fator de carga dos transformadores. Estas situações são encontradas frequentemente nas redes elétricas rurais.

Outro problema detectado frequentemente no meio rural é o de perdas não técnicas. Estas estão relacionadas ao processo de comercialização, e incluem erros

de medição, fraudes e, principalmente, furto da energia elétrica. Evaldt et. al. (2015) desenvolveram uma ferramenta para a identificação deste tipo de perdas em produtores rurais de arroz irrigado.

No âmbito residencial, o consumo de energia elétrica no meio rural se dá principalmente para iluminação e utilização de eletrodomésticos. Já no âmbito de produção agroindustrial destaca-se o consumo de motores elétricos para a irrigação, ventiladores para aeração em secadores, compressores de refrigeradores, esteiras de transporte de grãos, entre outros.

Quanto ao enquadramento tarifário, conforme a ANEEL (2010), as estações de bombeamento utilizadas para irrigação nas lavouras do arroz irrigado podem ser classificadas em dois grupos:

- grupo A: nas unidades consumidoras em que o fornecimento é realizado em tensão igual ou superior a 2,3 kV;
- grupo B: para os casos de fornecimento abaixo de 2,3 kV.

Os consumidores rurais do grupo A, em média tensão (MT), são os mais comumente encontrados. Estes podem enquadrar-se na modalidade tarifária horossazonal verde, que caracteriza-se pela diferenciação de tarifas de acordo com as horas do dia (horários de ponta e fora de ponta). O uso desta modalidade obriga o usuário a desligar seus equipamentos durante o horário de ponta, das 18 às 21h, e a manter o transformador de potência abrigado.

As instalações de bombeamento para a atividade de irrigação recebem, ainda, incentivo da ANEEL para operarem no horário entre 21:30 e 06:00, com desconto de 70% no valor da tarifa horossazonal verde. Desta forma, grande parte das estações de bombeamento para irrigação das lavouras de arroz opera em regime de 21 horas diárias durante o período que varia entre 80 e 100 dias, de acordo com o ciclo do cultivar, dos aspectos meteorológicos e das características físicas do solo (KOPP, 2015).

## 2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

A eficiência energética, segundo Nogueira (2006), está apoiada sob duas leis da termodinâmica: a Lei da Conservação de Energia, também conhecida como Primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece que o somatório de fluxos e estoques de um sistema é constante, conforme a Equação (2.1); e a Segunda Lei da

Termodinâmica, ou Lei da Dissipação de Energia, pela qual se estabelece que perdas térmicas são intrínsecas aos processos de conversão de energia, o que é representado pela Equação (2.2).

$$\sum E_{entra} = \sum E_{sai} + \sum E_{sistema} \quad (2.1)$$

$$E_{consumida} = E_{útil} + Perdas \quad (2.2)$$

A eficiência energética ( $\eta_{energ}$ ), por sua vez, é definida como a razão entre a energia útil, que efetivamente foi aproveitada no uso final, e a energia total consumida pelo sistema energético, conforme Equação (2.3).

$$\eta_{energ} = \frac{E_{útil}}{E_{consumida}} \quad (2.3)$$

De maneira geral, a eficiência energética aumenta quando se consegue realizar uma atividade com uma quantidade de energia inferior à consumida usualmente (HADDAD et. al., 2006). Pode-se quantificar melhorias de eficiência através da análise de indicadores de eficiência energética, entre os quais os autores destacam o Consumo Específico de Energia ( $\text{kWh kg}^{-1}$  ou  $\text{kWh m}^{-3}$ ), o Custo Médio da Energia ( $\text{R\$ kWh}^{-1}$ ) e o Fator de Carga da Instalação.

No Brasil, a atenção para a eficiência energética surgiu em meados da década de 1970, com a abrupta elevação do preço internacional do petróleo e de seus derivados. Desde então o governo brasileiro realizou diversas ações no sentido de aumento da eficiência dos setores energéticos, podendo-se citar a criação de diversos programas, entre os quais o CONSERVE (Programa de Conservação de Energia do Setor Industrial), em 1981, o PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem), em 1984, o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), em 1985, e o CONPET (Programa Nacional de Conservação de Petróleo e Derivados), em 1991, culminando na criação da lei nº 10295/2001 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, indicando níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, para equipamentos fabricados e comercializados no Brasil (SOUZA et. al., 2011).

Para se ter uma dimensão destes programas, dados do PROCEL estimam, por exemplo, um total de 11,68 bilhões de kWh de energia elétrica economizados apenas em 2015, o que representa 2,5% do consumo do país no período. No mesmo ano foi investido um total de R\$ 17,09 milhões no programa, que tem um acumulado de investimento de R\$ 2,689 bilhões desde 1985 (Bortoni e Santos, 2016).

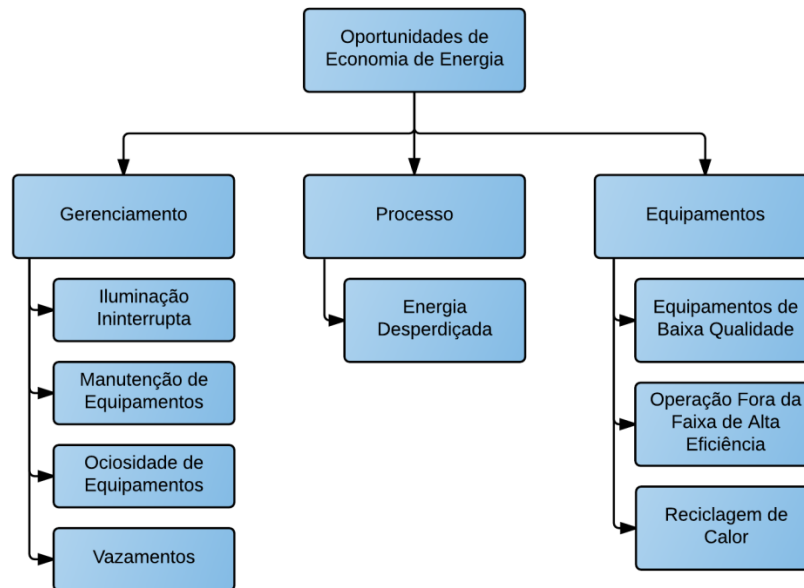
Outro importante ato em relação à eficiência energética dos sistemas elétricos no Brasil é a criação do Programa de Eficiência Energética das Empresas de Distribuição (PEE), promulgado pela lei nº 9991/2000, que dispõe sobre o investimento obrigatório em programas de eficiência energética no uso final por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor, com o mínimo de 0,5% de sua receita líquida. Este programa e seus efeitos serão ampliados na seção 2.3.1.

Segundo a EPE (2014), a energia conservada devido às ações de eficiência energética tem papel importante no atendimento à carga futura, considerando o horizonte de longo prazo. Conforme dados divulgados pela EPE no Plano Nacional de Energia 2050, ações de eficiência terão contribuição de cerca de 20% em relação à energia consumida em 2050.

Para a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*, IEA, 2010), o alcance de patamares melhores em eficiência energética não é tarefa fácil, e requer a combinação de desenvolvimento de tecnologia, mecanismos de mercado e políticas governamentais que influenciem no padrão de consumo de indústrias e residências. Uma governança efetiva em eficiência energética, que gere um desenvolvimento econômico sustentável, requer esforços conjuntos de governo, setor privado e consumidores em geral.

Wang e Chen (2012) identificam diferentes formas de aumento de eficiência energética, que os autores classificam em três eixos principais: gerenciamento, processo e equipamentos, conforme apresenta a Figura 2.10. Cada eixo, por sua vez, apresenta os principais potenciais de economia, segundo os autores. Sob o “gerenciamento”, são elencados iluminação ininterrupta, manutenção de equipamentos, equipamentos ociosos e vazamentos. No eixo “processo” é apontado o desperdício de energia. Enquanto que no eixo “equipamento” são mencionados equipamentos de baixa qualidade, equipamentos operando fora de sua zona de maior eficiência e reaproveitamento de calor.

Figura 2.10 – Método de classificação de oportunidades de economia de energia



Fonte: Adaptado de Wang e Chen, 2012.

Todo plano de eficiência energética deve ser iniciado pela identificação das oportunidades e potenciais de prevenção de desperdício de energia. As ações de maior prioridade são definidas com base em indicadores de custo/benefício e impacto esperado em economia energética.

A razoável complexidade em algumas situações sugere o desenvolvimento de técnicas utilizando inteligência artificial, em um pré-diagnóstico, para orientar e priorizar as ações de eficiência energética (NOGUEIRA, 2006).

O tema desta dissertação vem ao encontro destas situações, propondo uma metodologia para a identificação de sistemas de irrigação ineficientes e a possibilidade posterior de priorização de investimentos de acordo com o potencial de conservação de energia.

### 2.3.1 Investimentos do Programa de Eficiência Energética

Considerando os sistemas elétricos, a eficiência na manipulação da energia é um importante aspecto no atendimento da demanda, pois contribui para a segurança

energética, para a modicidade tarifária, para a competitividade da economia e para a redução das emissões de gases de efeito estufa (EPE, 2014).

As concessionárias e permissionárias de distribuição são potenciais agentes de promoção de programas de eficiência energética. Estas empresas possuem vantagens inerentes para tanto, tais como acesso ao capital, relacionamento já firmado com os clientes, grande alcance dentro de sua área de atuação e a responsabilidade pela antecipação ao crescimento de demanda de energia (IEA, 2010).

Apenas em 2013 foram investidos mais de US\$ 13 bilhões por empresas de distribuição em melhorias de eficiência energética nos usos finais, alcançando cerca de 50 TWh de economia em energia elétrica (IEA, 2015).

No Brasil, particularmente, a lei nº 9.991/2000 instituiu o Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica (PEE) determinando que as empresas concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia elétrica apliquem um percentual mínimo de sua receita operacional líquida (ROL) em programas que promovam a eficiência energética, sob a regulamentação da ANEEL (ANEEL, 2016a). Este valor tem sido alterado ao longo do tempo através legislação específica e atualmente equivale a 0,5% da ROL para eficiência energética e outros 0,5% para P&D, com vigência até o ano de 2022 (lei 13.203/2015) (ANEEL, 2016a).

Entre 2008 e 2015, segundo balanço da ANEEL, foram desenvolvidos 1570 projetos, com um investimento total de R\$ 4,45 bilhões. Estes projetos economizaram cerca de 4,09 TWh ano<sup>-1</sup> e retiraram 1,31 GW de demanda da ponta. O setor rural representa 4% do total de projetos desenvolvidos e 1% dos investimentos aplicados no período (ANEEL, 2016 b).

O objetivo do PEE é promover o uso eficiente e racional da energia elétrica em todos os setores econômicos por meio de projetos de combate ao desperdício e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais. Busca-se, com isto, o estímulo ao desenvolvimento de novas tecnologias e criação de práticas racionais de uso de energia elétrica (ANEEL, 2016 a).

Entre as ações desenvolvidas pelas concessionárias de distribuição, no âmbito do PEE, destacam-se: substituição de equipamentos por outros de maior eficiência, atividades de treinamento e capacitação dos usuários, projetos educacionais desenvolvidos na rede de ensino, entre outros.

Exemplo da aplicação destes recursos ocorre com a Companhia Energética da Borborema (CELB), em parceria com a Universidade Federal da Paraíba (UFPB), que realizou a substituição de 20 transformadores convencionais de distribuição por transformadores de núcleo amorfo em redes elétricas rurais. Os autores verificaram uma redução significativa nas perdas no núcleo (entre 42% e 82% de acordo com a potência), com retorno de investimento em pouco mais de oito anos (CAVALCANTI e LUCIANO, 2001).

Uma parceria entre a AES Sul (atualmente RGE Sul) e a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), de Alegrete, RS, propõe um sistema de gerenciamento automático do bombeamento para irrigação de lavouras de arroz na região de Uruguaiana, RS. A proposta inclui sensoriamento sem fio, controlador e supervisor para interface com o usuário. Três métodos de irrigação automática foram testados, controle de nível referenciado, controle de solo saturado e irrigação intermitente (ciclos de enchimento e esvaziamento). Em comparação com o método de irrigação convencional, houve redução no consumo de energia elétrica de 66,4% para o controle referenciado, 81,3% para o controle de solo saturado e 74,2% para o controle intermitente. Também foi verificado economia de água de 70,7%, 85,2% e 68,5%, respectivamente. Os autores concluem que o sistema proposto contribui para a melhoria do fornecimento de energia elétrica, quanto a níveis de tensão, perdas de energia e continuidade, além do impacto positivo da expansão otimizada do sistema elétrico (PFITSCHER et. al, 2011).

### **2.3.2 Eficiência energética em lavouras de arroz irrigado**

Em um sistema de bombeamento de água para alagamento de grandes áreas, como é o caso da cultura do arroz irrigado, o motor elétrico acoplado à bomba de levante é o principal consumidor de energia elétrica. A melhora de eficiência operacional deste conjunto representa redução de perdas e um menor consumo.

Porém, as ações de eficiência energética não devem ser restringidas apenas às cargas elétricas. Para Monachesi e Monteiro (2005) devem-se priorizar as ações de melhoria no uso final da água e no sistema de distribuição, nesta ordem, pois nestas áreas os ganhos se refletem de modo ampliado no bombeamento.

Para estes autores, a eficiência no bombeamento passa pelos seguintes itens:

- a. Escolha da bomba de acordo com as curvas de rendimento e de desempenho, e conforme necessidade do sistema;
- b. Seleção do tipo mais adequado de bomba à aplicação;
- c. Correto dimensionamento do motor;
- d. Redução da vazão recalçada;
- e. Evitar cavitação da bomba;
- f. Redução da pressão e setorização da rede de distribuição;
- g. Automação e controle da rede;
- h. Manutenção preventiva, com inspeções elétricas e mecânicas.

Para Kopp (2015), além dos aspectos de engenharia, a eficiência no uso de energia no processo de irrigação está atrelada a aspectos agronômicos, como a definição do cultivares e a escolha adequada da área do plantio.

Em países produtores de arroz irrigado em grande escala, como China, Índia e Brasil, é vasta a pesquisa e o desenvolvimento de projetos para melhorar a eficiência na cultura do arroz irrigado. Além da preocupação com a eficiência no consumo de energia elétrica, destacam-se trabalhos voltados para a eficiência no consumo de água, de fertilizantes e o aumento da produção de grãos sem alterar a entrada destes insumos.

Uma avaliação teórica da eficiência energética em agrossistemas modernos, incluindo o arroz irrigado, é proposto por Kazemi (2016). O autor cita que a interferência humana em processos agrícolas acarreta em um aumento de produção a patamares que não seriam atingidos naturalmente. Esta interferência ocorre pela inserção de meios energéticos suplementares. Porém, o uso irregular destas entradas de energia na busca de uma maior produtividade gera redução de eficiência, aumento de contaminantes e maior concentração de gases de efeito estufa. São apresentadas formas de cálculo para a energia líquida, produtividade energética, energia específica e eficiência energética. A eficiência energética é resultado da razão entre a energia de saída da safra e a energia total de entrada. O autor conclui que, na prática, o aumento da eficiência nas lavouras ocorrerá com a redução da energia de entrada sem impactar na diminuição da produção.

Oweis e Zang (1998) trazem ainda o conceito de eficiência no uso da água (WUE), o qual é representado pela relação entre a produção de grãos (kg) e o volume de água consumida ( $m^3$ ).



A água consumida na lavoura inclui a irrigação suplementar aplicada e a precipitação. Este indicador é utilizado em muitos outros trabalhos científicos voltados a estratégias de irrigação e eficiência de sistemas suplementares de irrigação.

Nassiri e Singh (2008) realizaram a análise da eficiência energética de produtores de arroz irrigado no estado de Punjab, Índia, através do método DEA, *Data Envelopment Analysis* (Análise por Envoltória de Dados). Foram calculadas as eficiências técnica, puramente técnica e de escala, e comparados os produtores por região e por tamanho de cultivo. Os autores colocam a eficiência técnica como a razão entre a produção de arroz (saída) e a soma ponderada de todos os insumos energéticos da mesma (humana, animal, diesel, eletricidade, sementes, fertilizantes, etc.). Já a eficiência puramente técnica trata apenas do uso da energia elétrica, enquanto que a eficiência de escala mostra os impactos que as dimensões do plantio trazem para a eficiência da produção. Os autores revelam que os insumos energéticos de eletricidade, diesel, fertilizantes e químicos somam em média 92% da entrada total de energia das lavouras, e que a energia elétrica sozinha contribui com 41,2% deste valor. Os resultados obtidos pelos autores revelam que em termos de eficiência técnica, apenas 12,5% dos pequenos produtores (até 2 ha de área plantada) têm índice de eficiência técnica acima de 80%. Este número cai para 3,4% nos médios produtores (até 10 ha) e para 1,9% nos grandes produtores (plantações acima de 10 ha). Em relação à eficiência puramente técnica, os autores concluem que 92% do total das lavouras são ineficientes. Os autores justificam que os produtores aplicam energia em excesso nas lavouras, e que grande parte desta energia se perde devido à utilização de tecnologias ineficientes.

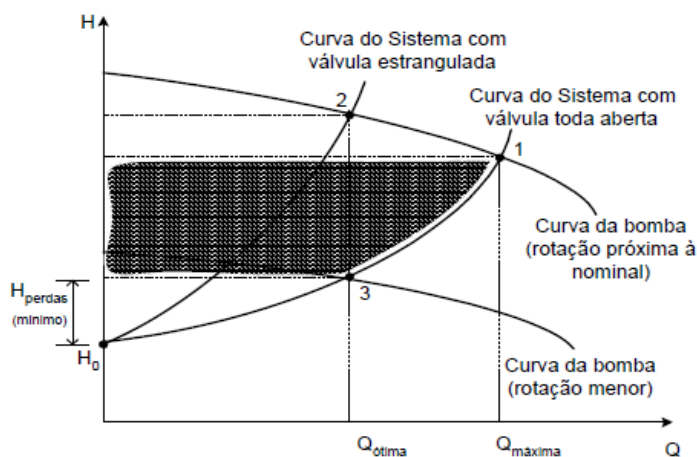
#### *2.3.2.1 Eficiência no consumo de energia elétrica*

O principal consumidor de energia elétrica nas lavouras de arroz irrigado é o motor da bomba de levante. Normalmente, o conjunto motor-bomba é ligado eixo a eixo em estações flutuantes, ou através de correias e polias com a bomba submersa e o motor instalado em um ponto fixo no solo. Para Kaya et. al. (2008), reduções de eficiência nesta etapa ocorrem devido a bombas e motores com baixa eficiência, motores sobredimensionados, falta de manutenção adequada e cavitação de bombas.

Estudos realizados em estações de levante (ARNS, 1995; OCACIA et. al., 2002; MOISÉS, 2009) indicam um rendimento global deste sistema (motor, transmissão e bomba) em torno de 45% e 50%.

Segundo Haddad et. al. (2010), a utilização de inversor de frequência no conjunto motor-bomba traz grande economia de energia elétrica. O ponto de operação destes conjuntos ocorre no ponto de intersecção entre a curva do sistema e a curva da bomba, em um diagrama  $Q \times H$  (vazão versus altura manométrica), como o da Figura 2.11.

Figura 2.11 – Diagrama  $Q \times H$  de um sistema de bombeamento



Fonte: Haddad et. al., 2010.

As perdas de carga são função da vazão ao quadrado, logo é desejável o controle da vazão para que o sistema opere continuamente (HADDAD et. al., 2010).

No ponto de operação 1, a bomba trabalha em rotação nominal e sem restrições na descarga. Esta situação é comum para a grande maioria dos sistemas de irrigação de arroz. A bomba inicia a operação a partir de um nível mínimo de água constatado na lavoura e é desligada quando ocorre seu alagamento, ficando em espera até que o nível mínimo seja atingido novamente.

As duas formas de redução de vazão são representadas pelos pontos 2 e 3. A inserção de uma válvula na descarga da bomba para a redução da vazão traz a curva do sistema para o ponto 2. Porém, neste ponto a altura manométrica do sistema é ainda maior que no ponto 1. Já o acionamento do conjunto motor-bomba em velocidade variável através de um inversor de frequência leva a operação do

sistema para o ponto 3, o que reduz as perdas de carga (área hachurada) e economiza energia elétrica.

Saffi et. al. (2010) realizaram a avaliação da economia de energia elétrica com a utilização de um variador de frequência em um sistema de bombeamento elevatório de água tratada. Este trabalho foi desenvolvido entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre (DMAE). O sistema estudado eleva a água tratada de um reservatório para outro situado 26,7 m acima. O estudo apontou uma redução no consumo de energia elétrica de 25.242,82 kWh para 19.466,49 kWh no período de 30 dias de acompanhamento, com a mesma quantidade de água bombeada. A economia apresentada foi de 22,88%. A condição deste estudo é semelhante às condições de elevação de água para irrigação das lavouras de arroz.

Em termos de trabalhos de eficiência energética desenvolvidos no segmento orizícola no Brasil, uma das empresas de maior referência é a AES Sul, atualmente RGE Sul, nas regiões da Fronteira Oeste e Campanha do Estado do Rio Grande do Sul. Em 2009, segundo dados divulgados por esta empresa, foram desenvolvidos projetos voltados à eficiência em sistemas de bombeamento de água para a irrigação de lavouras de arroz de 19 clientes, a um custo total de R\$ 4,9 milhões. Os resultados indicaram 7.011 MWh ano<sup>-1</sup> de economia de energia elétrica e redução da demanda em 3.849 kW, mesmo com incremento de 2.761 ha no plantio. Este segmento apresenta uma das melhores relações custo benefício (AES SUL, 2010).

Em 2012 um projeto ligado ao PEE da AES Sul investiu R\$ 715 mil em três sistemas de irrigação de um mesmo produtor e gerou uma economia de cerca de 508 MWh ano<sup>-1</sup>, evitando uma demanda de 272 kW. Em outra propriedade, o valor de R\$ 147 mil foi investido para eficiência de um sistema de irrigação e atingiu a economia de 256 MWh ano<sup>-1</sup> e redução de 81 kW na demanda (AES SUL, 2013).

Um levantamento conduzido por Ritter (2011) na Fronteira Oeste do RS apontou um aumento de eficiência e conseqüente redução média de 15,1% no consumo de energia elétrica e 31,7% na potência instalada em estações de bombeamento através da substituição de equipamentos, troca de tubulações e reposicionamento dos conjuntos. Os investimentos foram provenientes do PEE da AES Sul.

Estes dados corroboram que os levantes das lavouras de arroz já são conhecidos como pontos de melhoria de eficiência energética pelas concessionárias,

porém não há na literatura uma metodologia para identificação e priorização das instalações com maior potencial de eficiência, como é o objetivo da metodologia proposta nesta dissertação.

Longzhu et. al. (2009) utilizam o método estatístico chamado Análise Fatorial Exploratória (EFA) para enunciar as principais variáveis da gestão de irrigação em lavouras de arroz irrigado na localidade de Heilongjiang, China. Os autores citam a temperatura acumulada no período de safra acima de 10 °C como a principal variável, seguida da não ocorrência de geadas, da existência de uma cota contínua de irrigação, da quantidade de água infiltrada para o solo, da precipitação no período de crescimento da planta, da elevação do terreno e, por fim, da demanda de água exigida pela planta no período de crescimento. A ordem destas características pode diferir em lavouras de outras regiões, devido às grandes diferenças encontradas nas condições naturais e nos níveis de irrigação adotados. Estas características, porém, segundo os autores, descrevem completamente um sistema de irrigação do arroz.

### **2.3.3 Aplicação de lógica Fuzzy em eficiência na cultura de arroz**

A lógica Fuzzy, também conhecida como lógica Difusa ou lógica Nebulosa, emprega uma forma de raciocínio bem próxima à do ser humano e atinge aproximações melhores que modelos baseados na lógica clássica, para situações em que existam incertezas ou imprecisões (EL-HAWARY, 1998). Conceitualmente, a modelagem Fuzzy constitui uma forma intuitiva e transparente de capturar e descrever a essência de problemas do mundo real (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007), utilizando o conhecimento empírico de especialistas na área do estudo.

Na lógica difusa proposições podem assumir valores intermediários, entre verdadeiro ou falso, diferentemente da lógica clássica (lógica binária). Estes valores são conhecidos como graus de pertinência. O embasamento teórico previamente realizado para aplicação da lógica Fuzzy nesta dissertação é apresentado no Apêndice A.

É vasta a utilização da lógica Fuzzy para o desenvolvimento de ferramentas voltadas a conservação de recursos energéticos, ao aumento de produção e à previsão de variáveis meteorológicas aplicadas ao cultivo da cultura do arroz, visando o incremento de sua produtividade.

Um exemplo de trabalho correlacionado ao tema desta dissertação é a metodologia de auxílio baseada em Fuzzy para a definição do melhor período de semeadura do arroz através da previsão de precipitação pluviométrica (PRATAMA et. al., 2016).

Outro exemplo é a ferramenta desenvolvida por Jawad et. al. (2007) com vistas ao aumento de produtividade do arroz em Bangladesh. A ferramenta, que utiliza o método Neuro-Fuzzy, indica as melhores áreas de plantio do arroz, baseado nas variáveis meteorológicas de precipitação, umidade e temperatura.

Garg et. al. (2013) desenvolveram um modelo de previsão de produção de arroz baseado em um sistema Fuzzy de séries temporais. A ferramenta prevê a produção da safra seguinte de acordo com a avaliação estatística das 20 safras anteriores. Segundo os autores, o erro médio de previsão encontrado foi de 1,18%.

Além destes, relacionam-se Rad et. al. (2007) com uma avaliação do impacto da melhoria da eficiência energética no perfil de carga dos alimentadores, Sicat et. al. (2005) com um sistema de classificação de solos para a agricultura, Stathakis e Savina (2014) que utilizam um modelo Neuro-Fuzzy para a previsão de produção, baseado em condições do solo, condições climáticas e características da planta. Lobbel et. al. (2010) desenvolveram um modelo de boa precisão para estimativa dos impactos das mudanças climáticas na produção de grãos.

Apesar de toda a bibliografia encontrada no âmbito de eficiência energética no cultivo do arroz, não foi encontrada publicação semelhante a esta dissertação, o que denota seu pioneirismo.

## 2.4 PERDAS NÃO TÉCNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS

O foco da metodologia proposta por esta dissertação é a identificação das melhores oportunidades para aumento de eficiência em sistemas de irrigação de lavouras de arroz irrigado. Contudo, a identificação das possíveis situações de perdas não técnicas neste âmbito também será possível, nos casos em que o consumo real verificado pelo sistema de levante for inferior ao consumo eficiente calculado pela ferramenta proposta.

As perdas em sistemas elétricos de potência são classificadas em perdas técnicas e perdas não técnicas. As perdas técnicas são aquelas relacionadas com a operação normal da rede elétrica, entre as quais a dissipação de calor em

equipamentos e condutores, as perdas de magnetização em transformadores, etc. As perdas não técnicas, por sua vez, são aquelas relacionadas com o faturamento da energia pelo fornecedor (distribuidora). Ocorrem nos sistemas de distribuição e, na maioria das vezes, são devidas a ligações fraudulentas, adulteração dos equipamentos de medição, erros de leitura (com eventuais subornos), ou problemas com o processo de faturamento (CHAUHAN e RAJVANSHI, 2013).

A mitigação de perdas não técnicas além de contribuir com a geração de receita para as concessionárias de energia também inibe o consumo não controlado e irresponsável de energia, melhorando os padrões de qualidade globais e facilitando a previsão de demanda da concessionária para os períodos subsequentes.

Segundo a ANEEL (2010), as perdas não técnicas totalizam um prejuízo aproximado de R\$ 8,1 bilhões por ano no Brasil.

As perdas não técnicas também implicam no consumo não eficiente da energia elétrica, uma vez que o consumidor irregular não tem compromisso com a racionalidade do seu uso. Esta utilização não controlada acarreta em uma necessidade adicional deste recurso, implicando na ampliação precoce das redes elétricas e construção de novas usinas geradoras.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na revisão bibliográfica apresentada neste capítulo foi feito o levantamento das principais características da cultura do arroz irrigado, relacionando-as com trabalhos de eficiência energética realizados ou com possibilidade de aplicação para a conservação de energia em sistemas de irrigação e a melhoria de produtividade desta cultura.

Em linhas gerais, a metodologia proposta nesta dissertação tem como objetivo avaliar se o consumo de energia elétrica verificado em uma safra é justificado, ou se ocorrem desvios do patamar da melhor eficiência energética. O consumo ótimo de energia elétrica é definido pela necessidade real de água para inundação da área e reposição de perdas, o que é calculado pelo método proposto de acordo com as propriedades físicas das lavouras, as variáveis meteorológicas e as características técnicas do sistema de irrigação.

Por fim, salienta-se que, durante a pesquisa na bibliografia publicada, não foram identificados trabalhos com o enfoque semelhante ao proposto por esta dissertação, o que demonstra o caráter inovador deste trabalho.





### **3 AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO DE ARROZ - METODOLOGIA PROPOSTA**

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para avaliar a eficiência energética dos sistemas de irrigação de lavouras de arroz. O capítulo apresenta, inicialmente, uma visão geral sobre a proposta, passando pela apresentação detalhada do método de estimativa de consumo baseado em lógica Fuzzy e, finalizando, a metodologia proposta para avaliação de eficiência energética nos sistemas de irrigação de arroz.

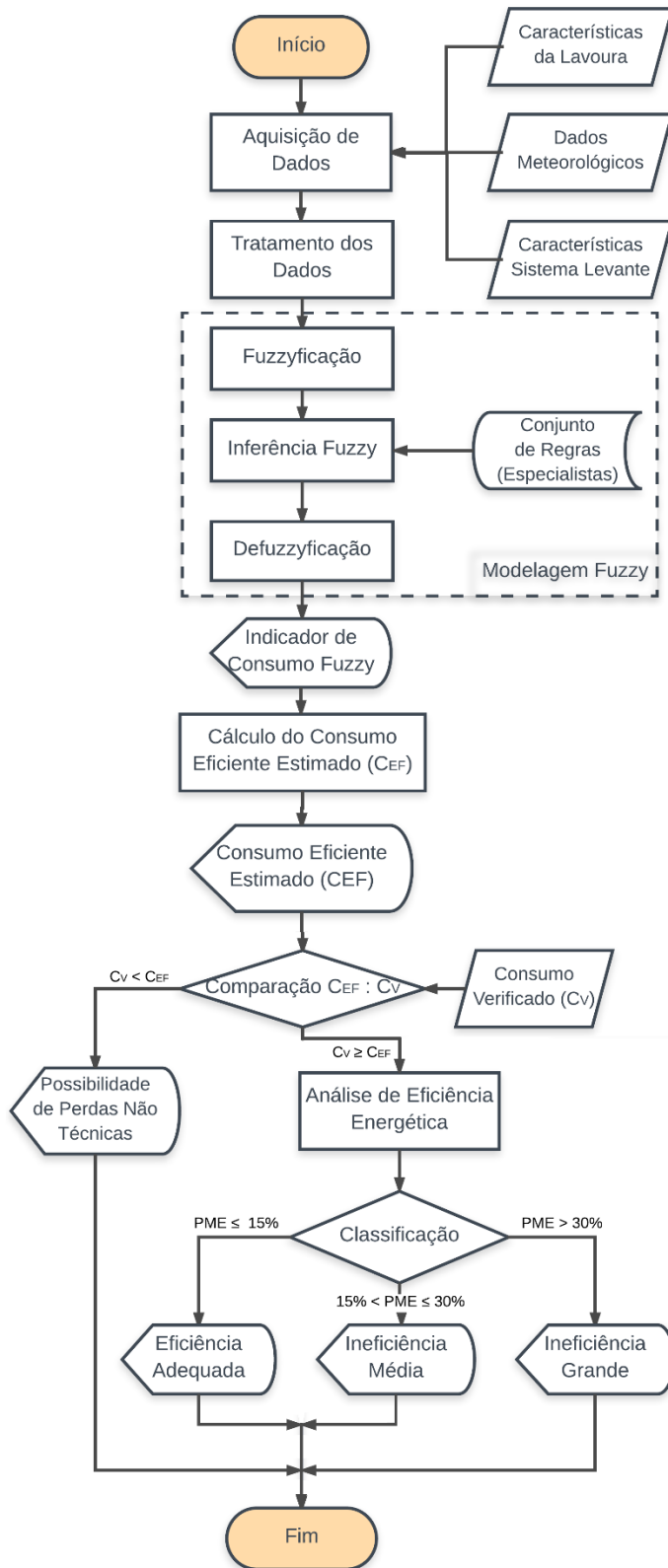
#### **3.1 DETALHAMENTO DA METODOLOGIA**

A metodologia geral para a identificação da eficiência energética em instalações de irrigação de arroz segue o fluxograma apresentado na Figura 3.1. A premissa básica desta metodologia consiste em estimar o consumo eficiente esperado de energia elétrica do sistema de levante, obtido a partir da modelagem Fuzzy, e compará-lo com o consumo real observado neste sistema.

O principal desafio da proposta é realizar a modelagem matemática do sistema de irrigação do arroz, utilizando a lógica nebulosa. A partir do modelo proposto deve-se obter uma estimativa satisfatória do consumo eficiente de energia elétrica, a partir de dados da lavoura, variáveis meteorológicas e de características do sistema de irrigação.

Inicialmente, o modelo é validado através da utilização de dados de consumo e características de produção de cinco safras de três lavouras distintas. Em seguida, a aplicação do método é abordada e a avaliação de eficiência energética destas mesmas safras é realizada. Por fim, testes de verificação de funcionamento do método são realizados em uma lavoura conhecidamente ineficiente, assim como verificado o funcionamento do método a partir de alterações das variáveis de entrada.

Figura 3.1 – Fluxograma geral da metodologia proposta

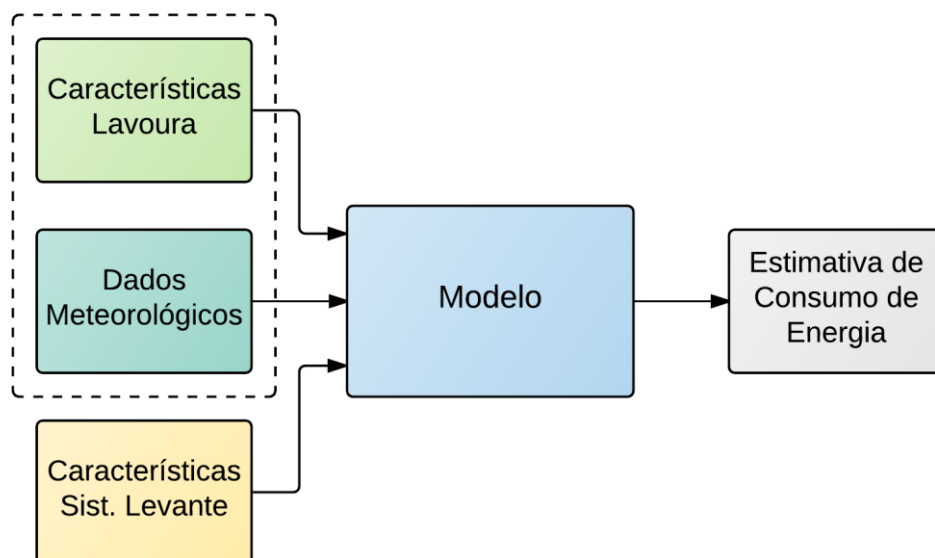


O termo “consumo eficiente estimado” refere-se ao cálculo da estimativa de consumo realizado pelo modelo para uma safra com equipamentos e técnicas de manejo de água adequados. O mesmo modelo é capaz também de calcular o consumo estimado associado à instalação existente, bastando para isto a utilização das características reais de equipamentos e técnicas de manejo d’água. Estes aspectos serão melhor explorados ao longo desta metodologia.

### 3.2 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E AQUISIÇÃO DE DADOS

A escolha do conjunto de variáveis a ser considerado como entrada do modelo é etapa de grande importância nesta metodologia. Buscou-se compreender a maior quantidade de aspectos relevantes ao consumo de energia elétrica de uma safra, de forma a representar a situação real com a maior fidelidade possível. De acordo com esta premissa, são destacadas informações da área plantada, dados meteorológicos e características do sistema de levante. A Figura 3.2 ilustra as informações de entrada e o diagrama de blocos genérico do método de previsão de consumo de energia elétrica.

Figura 3.2 – Diagrama de blocos do modelo



As *Características da Lavoura* e os *Dados Meteorológicos*, englobados pelo traçado, implicam em uma necessidade maior ou menor de irrigação, enquanto que as *Características do Sistema de Levante* impactam diretamente no consumo de energia elétrica.

Através de consulta à literatura específica, como De Datta (1981), Yoshida (1981) e SOSBAI (2014), e da opinião de especialistas das áreas de agronomia, geologia, cultivo de arroz e de agrometeorologia, obteve-se as principais variáveis de impacto na necessidade de reposição de água para o cultivo do arroz irrigado. A Figura 3.3 traz estas variáveis classificadas pela área de interesse.

Figura 3.3 – Variáveis de entrada consideradas nesta metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Todas as variáveis consideradas nesta metodologia possuem histórico temporal, ou a possibilidade de levantamento de informações junto às partes interessadas, produtor ou concessionária de distribuição.

### 3.2.1 Características da lavoura

As características da lavoura consideradas foram: *área irrigada* (ha), *permeabilidade do solo* ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e *altura de lâmina d'água* (cm) adotada.

A *área irrigada* é equivalente à área cultivada de arroz e está relacionada diretamente com o volume de água necessário à inundação total da lavoura. Em outras palavras, quanto maior a área da lavoura, maior a necessidade de água captada da fonte hídrica, e conseqüentemente, maior o consumo de energia elétrica.

A *permeabilidade do solo*   uma característica física do mesmo, que reflete na velocidade da percola o vertical. Quanto menor a permeabilidade do solo, menor o

volume drenado diariamente e menor será a necessidade de reposição, reduzindo o consumo de energia elétrica.

Já a adoção da *altura da lâmina d'água* é uma decisão do produtor. Segundo especialista Engenheiro Agrônomo do IRGA (2016), os cultivares de arroz irrigado necessitam da contínua saturação do solo com água. A adoção de lâmina d'água sobre o solo garante esta saturação e inibe o crescimento de ervas daninhas que não são adaptadas ao excesso de umidade.

Para o levantamento dos dados da lavoura, as informações de área irrigada e de altura de lâmina de água são obtidas em consulta ao produtor. A permeabilidade média do solo é informação disponibilizada pela Embrapa (2016) em domínio público, através do Sistema de Observação e Monitoramento da Agricultura no Brasil (SOMABRASIL), que mapeia os tipos de solo de todo o território nacional, em uma apresentação ilustrada na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Sítio com informações agrícolas disponibilizadas pela Embrapa



Fonte: Embrapa, 2016.

De acordo com o tipo de solo da lavoura encontrado no SOMABRASIL, é realizada a relação com a drenagem através do Quadro 3.1, que descreve a qualidade da drenagem dos solos encontrados no Brasil.

Quadro 3.1 – Classificação dos solos quanto ao seu tipo de drenagem

Tipo de Solo	Drenagem Boa	Drenagem Média	Drenagem Ruim	Drenagem Precária
Latossolos	X	X		
Cambissolos		X		
Nitossolos	X			
Neossolos	X			
Chernossolos		X		
Luvissolos			X	
Gleissolos			X	X
Hidromórficos			X	X
Plintossolos			X	
Planossolos			X	
Organossolos				X
Vertisolos			X	
Espodossolos	X	X		

Fonte: Adaptado de Rezende, 1986.

Com o tipo de solo e sua drenagem característica, procede-se a informação à entrada do sistema Fuzzy, que é detalhada na seção 3.4.3.3.

### 3.2.2 Dados meteorológicos

As informações meteorológicas pertinentes e consideradas neste trabalho são: *precipitação* pluvial ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), *evaporação* ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e *velocidade média do vento* ( $\text{m s}^{-1}$ ).

A *precipitação* contribui positivamente para a reposição das perdas hídricas por percolação e por evapotranspiração da lavoura, ou seja, possui impacto de redução no consumo do sistema de irrigação.

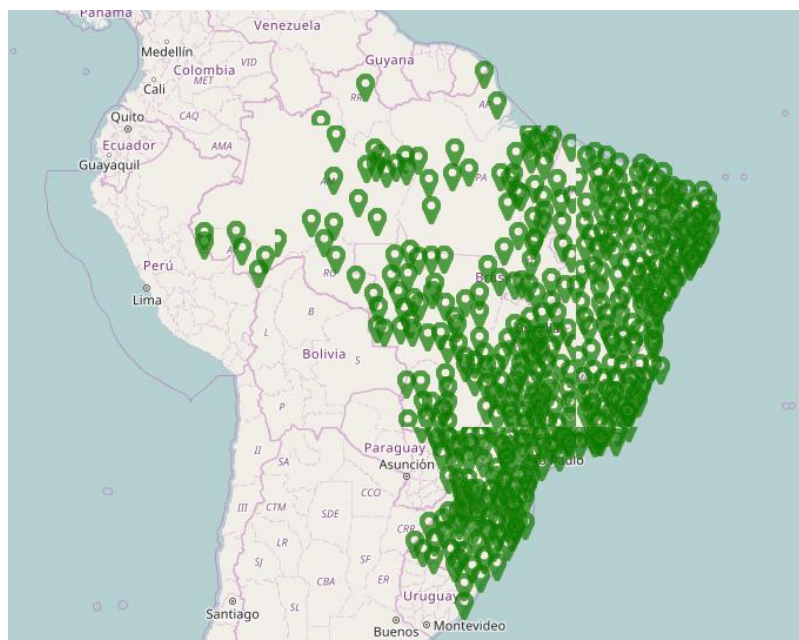
A *evaporação* representa a transferência de água de uma superfície úmida para a atmosfera. Ela acelera a necessidade de reposição de água na lavoura e, por isso, impacta na elevação do consumo de energia elétrica. Esta variável está

associada a outras variáveis meteorológicas, como radiação solar, pressão atmosférica, temperatura do ar e umidade relativa do ar. Contudo, como possui medição direta pelas estações de monitoramento, a evaporação foi considerada em detrimento das demais.

O vento é responsável por acelerar o processo de evapotranspiração da lavoura, além de contribuir para as perdas laterais de água por arraste. Desta forma, uma maior velocidade do vento impacta no aumento de necessidade de irrigação da lavoura de arroz.

Em todo o território brasileiro as informações meteorológicas são de domínio público e podem ser coletadas no sítio do INMET (2016). São cerca de 219 estações meteorológicas espalhadas por todo o Brasil, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Localização das estações meteorológicas do INMET



Fonte: Adaptado de INMET, 2016.

O INMET disponibiliza os dados destas estações historiados a partir de 1961, através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

Os dados meteorológicos utilizados como entrada no modelo deverão ser, por sua vez, aqueles provenientes da estação meteorológica mais próxima geograficamente à lavoura sob estudo.

### 3.2.3 Características do sistema de levante

Para o sistema de levante, foram consideradas as características técnicas dos equipamentos envolvidos na captação, bombeio e condução da água até os canais de irrigação. As variáveis de entrada do modelo são a *altura do levante* (m), o *comprimento da tubulação* (m), a *eficiência da bomba* (%), a *eficiência do motor* (%) e as *perdas de água por vazamentos* (%).

A *altura do levante* e o *comprimento da tubulação* são características físicas da instalação, influenciados por sua situação geográfica em relação à fonte de recursos hídricos. Tais dados podem ser levantados através de medições em campo. Ambas variáveis apresentam relação diretamente proporcional com o consumo de energia, pois na medida em que a altura de levante e a distância entre a captação e a lavoura são maiores, a altura manométrica do sistema de levante aumenta.

A *eficiência da bomba* corresponde ao nível de eficiência associado à conservação do equipamento e à eficiência relacionada com seu ponto de operação sobre a curva  $Q \times H$  (seção 2.3.3.1). Em outras palavras, é avaliado o rendimento global da bomba, tema que é aprofundado na seção 3.4.3.9.

Para a *eficiência do motor*, segue-se a mesma lógica. Considera-se o tipo de motor (padrão ou alta eficiência), seu estado de conservação (novo, recondicionado, precário) e se está operando próximo à capacidade nominal (dimensionamento correto ou sobredimensionamento), resultando em um valor de eficiência geral deste equipamento (aprofundado na seção 3.4.3.10).

O percentual de *perdas de água por vazamentos* também contribui para a elevação do consumo de energia, pois maior será o tempo de bombeamento para transferir o mesmo volume de água para a lavoura. O percentual de vazamentos pode ser determinado pela diferença entre as vazões na descarga da bomba e na chegada aos canais de distribuição em relação à vazão bombeada. Uma metodologia de levantamento desse parâmetro é realizar a inspeção visual da linha e a medição dos vazamentos, relacionando vazão do vazamento com a vazão total do bombeio, como é apresentado na seção 3.4.3.11.



### 3.3 TRATAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA

Na metodologia usada nesta dissertação optou-se por utilizar valores médios diários para as variáveis meteorológicas. Esta escolha ocorreu devido à observação de diferentes períodos de safra, em número de dias, de uma lavoura para outra, ou ainda de uma safra para outra, para uma mesma lavoura. Utilizando as médias diárias como entradas, os valores coletados ficam independentes do período de safra do cultivar adotado.

Para o tratamento dos dados meteorológicos é realizada a média aritmética simples dos valores diários coletados do sistema do INMET, conforme a Equação (3.1).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^{i=n-1} x_i}{n} \quad (3.1)$$

onde  $x_i$  são cada um dos valores diários da variável, e  $n$  é o período observado, em dias.

Na etapa de cálculo do consumo previsto, o período da safra é levado em consideração, conforme descrito na seção 3.5.

Os dados reais de energia consumida utilizados na verificação de eficiência (explanado na seção 4.1) são coletados da memória de massa do medidor eletrônico de energia, e interpretados pelo software ELO50. Os dados de consumo são disponibilizados por este software em um formato de totalizações a cada 15 minutos. Para a utilização destes dados de energia realizou-se o somatório destes valores, inicialmente, em formatos diários, conforme a Equação (3.2).

$$E_{diária} = \sum_{i=0}^{i=95} E_{15min_i} \quad (3.2)$$

De posse dos valores diários de consumo, é realizada uma busca por possíveis valores incoerentes nestes períodos. São consideradas possibilidades de incoerência valores de consumo diários muito acima da capacidade da unidade consumidora, grandes períodos de dias sem consumo durante a safra e, ainda, alteração do consumo devido a outros equipamentos que não o motor da bomba de levante.

Os valores de consumo diário muito acima da capacidade do consumidor são identificados uma vez que se conhece a potência nominal do motor instalado no sistema de levante e, por consequência, o valor nominal que o mesmo consumiria estando 24 horas em operação. Valores muito acima deste valor nominal máximo indicam ocorrência de algum erro no sistema de medição, interpretação errônea dos valores pelo software, ou a utilização da alimentação do sistema de levante para algum outro fim.

A identificação de grandes períodos sem a utilização do sistema de levante pode estar dentro da normalidade da safra, desde que contando com condições meteorológicas favoráveis. Porém, para um período de safra entre 100 e 120 dias, a identificação de 30 dias ou mais sem a ocorrência de consumo de energia indica um possível erro no sistema de medição, um período grande de interrupção no atendimento à carga ou a utilização de outra fonte de energia para realizar o levante.

O perfil de consumo também pode ser analisado para identificação da contaminação dos dados por outras cargas, como por exemplo, para um consumo residencial, visto que o levante e o consumo residencial possuem perfis e níveis de carga distintos.

Qualquer uma das situações descritas acima impossibilita a análise de eficiência da instalação, visto que estas ocorrências impactam no consumo verificado no período da safra. Qualquer conclusão que fosse obtida a partir destes valores estaria comprometida.

Excluídos os valores de consumo “contaminados” por outras cargas, totaliza-se a energia consumida no período da safra, valor que será utilizado na comparação com o valor de referência de consumo calculado por esta metodologia. As demais variáveis de entrada são características físicas e mecânicas da lavoura e do sistema de levante e, estando na unidade de medida adotada, não necessitam nenhum tratamento prévio.

### 3.4 MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO DA LÓGICA FUZZY

Para o desenvolvimento do modelo e a implementação da lógica Fuzzy foi utilizado o *software* Matlab®, versão estudante 2013, o qual possui uma caixa de ferramentas (*toolbox*) específica para trabalhar com este método. O Apêndice A

apresenta uma revisão teórica sobre a lógica Fuzzy. A seguir são apresentadas as etapas principais da metodologia utilizada.

### 3.4.1 Apresentação geral

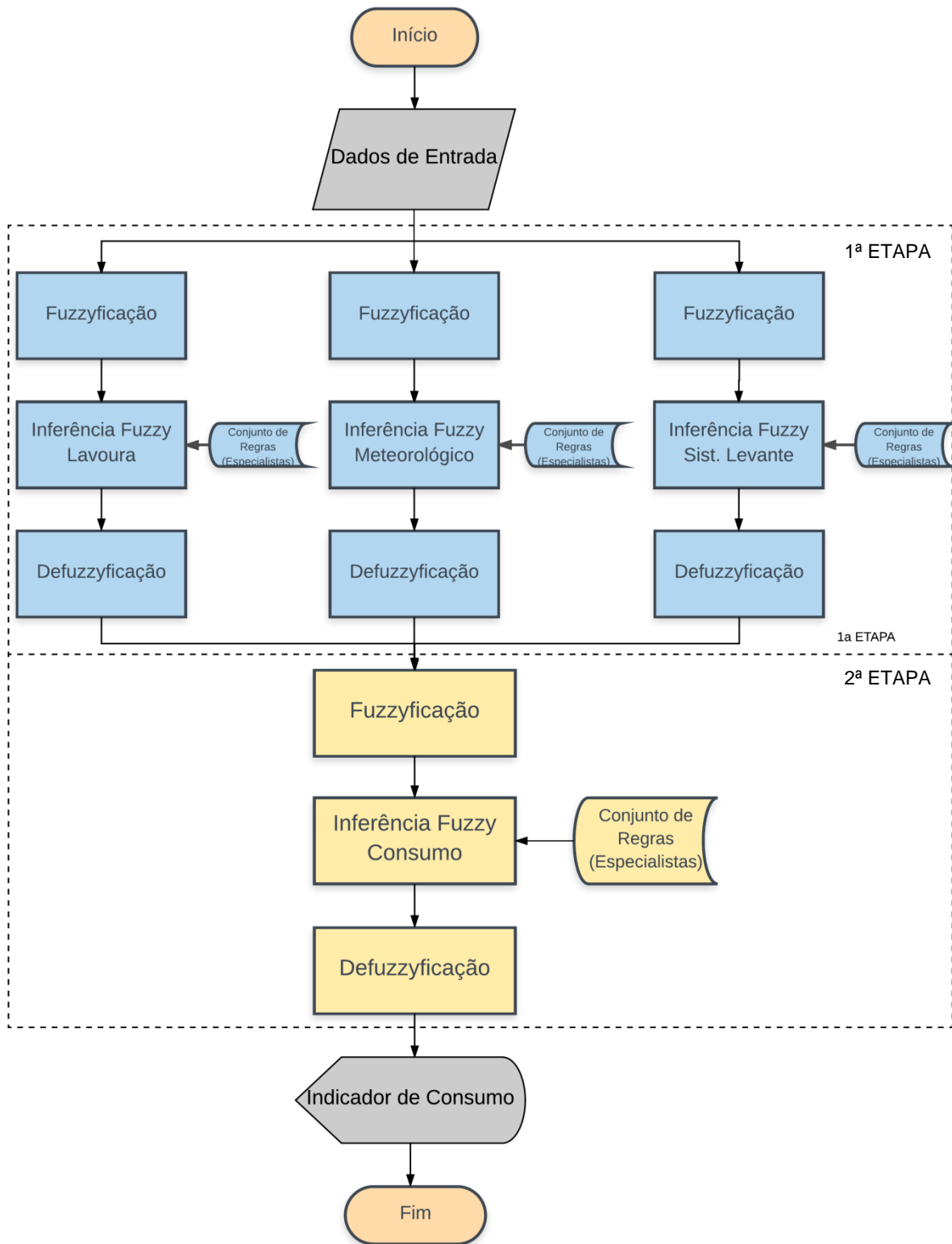
O modelo de estimativa de consumo foi desenvolvido baseado na lógica Fuzzy. É composto por duas etapas, que possuem estrutura Fuzzy completa, com *fuzzyficação*, inferência e *defuzzyficação*.

Na primeira etapa, as variáveis de entrada são tratadas por três sistemas Fuzzy distintos, divididos de acordo com sua natureza: lavoura, meteorológica e instalação de levante. Como resultado obtém-se, respectivamente, três indicadores: Indicador Lavoura – Necessidade de Irrigação, Indicador Meteorológico – Necessidade de Irrigação e Indicador Sistema de Levante – Consumo de Energia.

Os indicadores obtidos na primeira etapa são utilizados como entrada para a segunda etapa. Nesta, o indicador de consumo de energia elétrica da instalação é calculado. O fluxograma detalhado do modelo baseado em Fuzzy é apresentado na Figura 3.6.

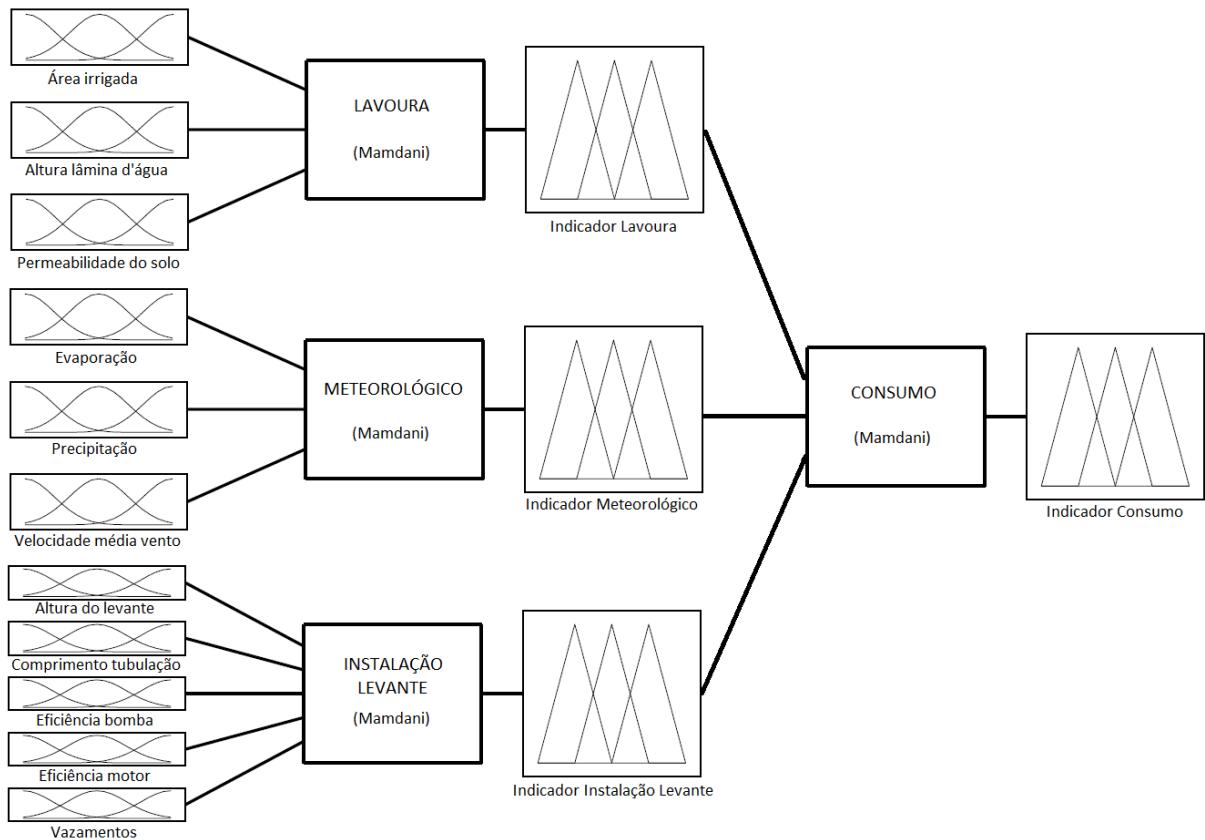
De forma geral, na primeira etapa, são implementados três sistemas Fuzzy, um para cada segmento de variáveis. A saída desta etapa alimenta um último sistema Fuzzy, que terá em sua saída a indicação de consumo de energia elétrica do sistema de irrigação. A Figura 3.7 apresenta a estrutura Fuzzy adotada.

Figura 3.6 – Fluxograma do modelo baseado em Fuzzy



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Figura 3.7 – Estrutura da modelagem Fuzzy



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

### 3.4.2 Base de dados

Cada bloco de inferência Fuzzy possui seu conjunto de regras individuais. As regras foram baseadas na opinião de especialistas entrevistados durante o ano de 2016. Foram entrevistados três especialistas que contribuíram em diferentes segmentos do modelo.

O primeiro entrevistado foi um Engenheiro Agrônomo do Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA), que esclareceu questões práticas relacionadas à lavoura do arroz, aos sistemas de irrigação e às práticas mais comuns adotadas pelos produtores.

A segunda entrevista foi realizada com uma professora colaboradora do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e também doutora em Fitotecnia com ênfase em

Agrometeorologia, que respondeu questões relacionadas à influência das variáveis meteorológicas sobre a cultura do arroz irrigado e seu impacto na necessidade de reposição da irrigação.

Outro especialista entrevistado foi um Pesquisador em Silvicultura e Especialista em Recursos Naturais e Manejo Florestal de uma multinacional do ramo da celulose e também mestre em Agronomia, com Ênfase em Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal de Viçosa, que trouxe à luz esclarecimentos sobre os tipos de solo e impactos da percolação dos mesmos sobre as culturas agrícolas irrigadas.

Os pontos relevantes das entrevistas estão transcritos no Apêndice B desta dissertação. Todas as informações levantadas nestas entrevistas, acrescidas dos dados encontrados na revisão bibliográfica formam a base de dados utilizada nesta metodologia. Estes dados são utilizados para a criação dos conjuntos de regras e para a *fuzzyficação* das variáveis de entrada.

### **3.4.3 Fuzzyficação das variáveis de entrada**

O primeiro estágio da modelagem Fuzzy, a *fuzzyficação* das variáveis pertinentes à necessidade de irrigação complementar das lavouras de arroz irrigado, é contribuição inédita desta metodologia. Esta etapa compreende a tradução dos dados numéricos das instalações para termos linguísticos, através de conjuntos de funções de pertinência.

A seguir são detalhadas as composições de *fuzzyficação* de cada uma das variáveis utilizadas no modelo.

#### **3.4.3.1 Área Irrigada**

A variável *Área Irrigada* representa a área total da lavoura cultivada com arroz e que necessita de irrigação. Foram utilizados três grupos Fuzzy denominados *Pequena*, *Média* e *Grande*, com funções de pertinência definidas na Tabela 3.1. A escala de área tradicionalmente utilizada na agricultura é o *hectare* (ha). A mesma foi mantida para este modelo.

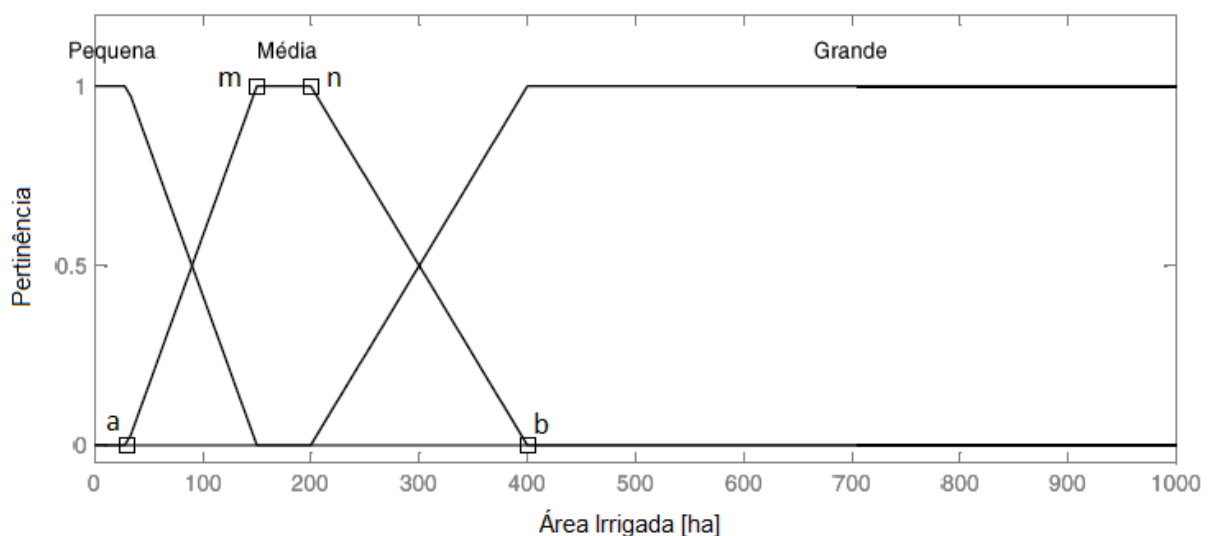
Tabela 3.1 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Área Irrigada*

Subconjunto	Função	Parâmetros (ha)			
		a	m	n	b
Pequena	Trapezoidal	0	0	30	150
Média	Trapezoidal	30	150	200	400
Grande	Trapezoidal	200	400	1000	1000

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

O parâmetro  $a$  representa o ponto onde a função de pertinência começa a ter valores diferentes de zero e o parâmetro  $b$  indica o ponto a partir do qual a função não tem mais validade. Na função trapezoidal os parâmetros  $m$  e  $n$  indicam o intervalo onde os valores de pertinência são máximos para o subconjunto.

As áreas irrigadas consideradas pequenas são aquelas de até 30 ha. Entre 30 e 150 ha são parcialmente pequenas e médias, entre 150 e 200 ha são áreas puramente médias, e entre 200 e 400 ha são parcialmente médias e grandes. Já as áreas acima de 400 ha são consideradas grandes. A Figura 3.8 apresenta graficamente a variável *Área Irrigada*.

Figura 3.8 – Funções de pertinência da variável *Área Irrigada*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A parametrização destes grupos de pertinência foi baseada na opinião do especialista Engenheiro Agrônomo do IRGA (2016), que leva em consideração o cenário de cultivo do arroz irrigado no Rio Grande do Sul.

### 3.4.3.2 *Altura da Lâmina d'Água*

A *Altura da Lâmina d'Água* representa a técnica praticada pelo produtor em termos de cota média de água acima do nível do solo. Foram utilizados três grupos para definir esta variável: *Solo Saturado*, *Altura Controlada* e *Altura Não Controlada*. As funções de pertinência destes subconjuntos são definidas na Tabela 3.2. A unidade mais utilizada para esta variável é centímetros (cm). Todos os parâmetros foram definidos nesta escala.

Tabela 3.2 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Altura da Lâmina d'Água*

Subconjunto	Função	Parâmetros (cm)			
		a	m	n	b
<b>Solo Saturado</b>	Trapezoidal	0	0	0,5	4,5
<b>Controlada</b>	Trapezoidal	0,5	4,5	5	10
<b>Não Controlada</b>	Trapezoidal	5	10	20	20

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

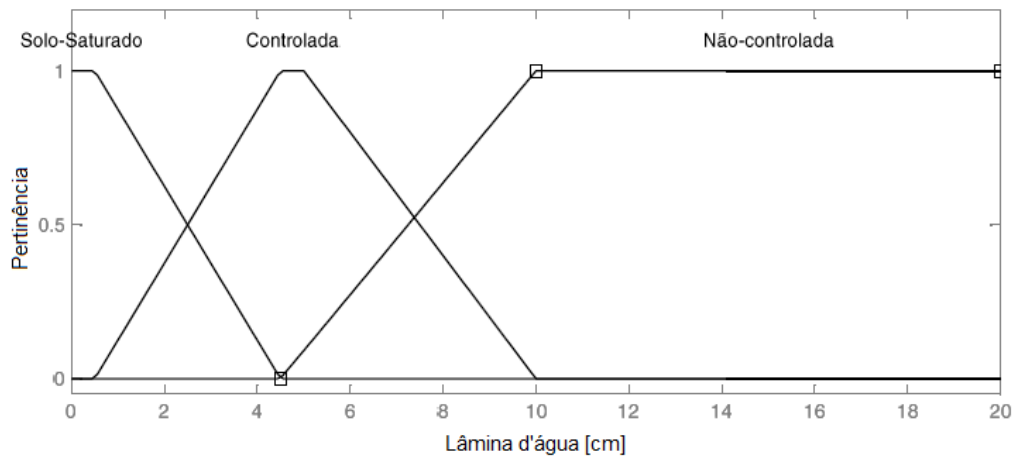
Conforme Corrêa et. al. (1997), a cultura do arroz irrigado pode ser desenvolvida sem perda de produtividade através da técnica de irrigação que mantém o solo saturado, sem a presença de lâmina d'água superficial ao solo. Esta técnica de irrigação é a que apresenta menor consumo de água e menor consumo de energia elétrica para o bombeamento (PFITSCHER et. al., 2011).

Já na técnica de irrigação com lâmina controlada, um nível de água alvo é definido e buscado por um sistema de automação ou pela observação empírica do *aguador*, pessoa responsável pela manutenção da lâmina d'água sobre a lavoura. Estudos como de Johnson (1965), Pande e Mittra (1970), Ferguson (1970) e Stone et. al. (1990) mostram que as condições mais favoráveis de produtividade do arroz e eficiência no uso da água (WUE) ocorrem com níveis de lâmina d'água de até 2,5



cm. Salvo casos em que a lâmina d'água mais espessa é utilizada para combater ervas daninhas, a adoção de lâminas maiores de 5 cm reduz fortemente a eficiência do uso da água nas lavouras. A Figura 3.9 apresenta graficamente as características da variável *Altura da Lâmina d'Água*.

Figura 3.9 – Funções de pertinência da variável *Altura da Lâmina d'Água*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### 3.4.3.3 Permeabilidade Média do Solo

A *Permeabilidade Média do Solo* corresponde à velocidade de percolação vertical de água de acordo com o tipo de solo da região em que o cultivo do arroz irrigado é realizado.

A informação do tipo de solo é coletada no sistema SOMABRASIL, (EMBRAPA, 2016), conforme apresentado na seção 3.2.1. Também nesta seção é apresentado o Quadro 3.1 (REZENDE, 1986) que apresenta qualitativamente as características de permeabilidade (drenagem) dos diferentes tipos de solo.

Por outro lado, trabalhos como o de Tabbal et. al. (2002) e Singh et. al. (1993) trazem quantitativamente, em  $\text{mm dia}^{-1}$ , os valores para drenagem considerada muito lenta, lenta ou rápida. Desta forma, esta dissertação propõe o cruzamento destas informações, que é apresentado na Tabela 3.3 e posteriormente utilizado para a parametrização dos subconjuntos na *fuzzyficação* da variável *Permeabilidade*

*Média do Solo*, apresentada na Tabela 3.4. A caracterização gráfica desta variável é apresentada na Figura 3.10.

Tabela 3.3 – Proposta qualitativa de *Permeabilidade Média do Solo*

Drenagem	Permeabilidade (mm dia <sup>-1</sup> )
Rápida	20 a 30
Lenta	5 a 10
Muito Lenta	1 a 5

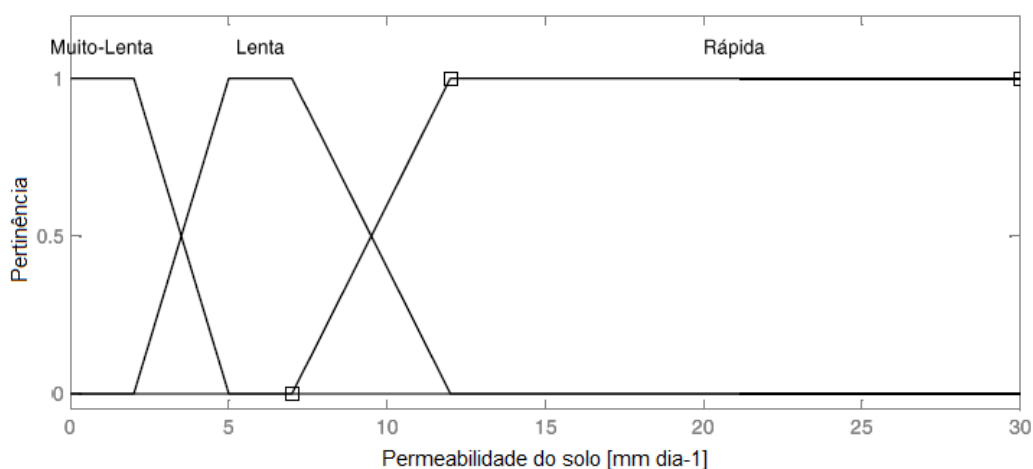
Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Tabela 3.4 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Permeabilidade Média do Solo*

Subconjunto	Função	Parâmetros (mm dia <sup>-1</sup> )			
		a	m	n	b
Muito Lenta	Trapezoidal	0	0	1	5
Lenta	Trapezoidal	1	5	7	12
Rápida	Trapezoidal	7	12	30	30

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Figura 3.10 – Funções de pertinência da variável *Permeabilidade Média do Solo*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Os solos mais propícios à cultura do arroz irrigado são aqueles que apresentam drenagem muito lenta. Os solos que apresentam permeabilidade superior a  $10 \text{ mm dia}^{-1}$  são questionados quanto a sua aptidão ao cultivo do arroz irrigado (SINGH et. al., 1993).

#### 3.4.3.4 Evaporação

A *Evaporação* representa a transferência média de água de uma superfície úmida para a atmosfera. Quanto maior a evaporação medida em uma lavoura de arroz maior será a necessidade de reposição de água e, conseqüentemente, maior será o consumo de energia elétrica.

A variável foi representada por três subconjuntos: *Baixa*, *Média* e *Alta*. Para definir a escala desta variável tomou-se como base a normal climática de evaporação do Rio Grande do Sul, que é calculada considerando a média durante três décadas, entre os anos de 1961 e 1990, e é divulgada pelo INMET (2016). Os valores médios mensais e médio anual de evaporação são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Média mensal da evaporação para o Estado do Rio Grande do Sul – Período 1961-1990

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Média (mm)	105	87	85	72	61	54	60	68	74	89	99	115	981

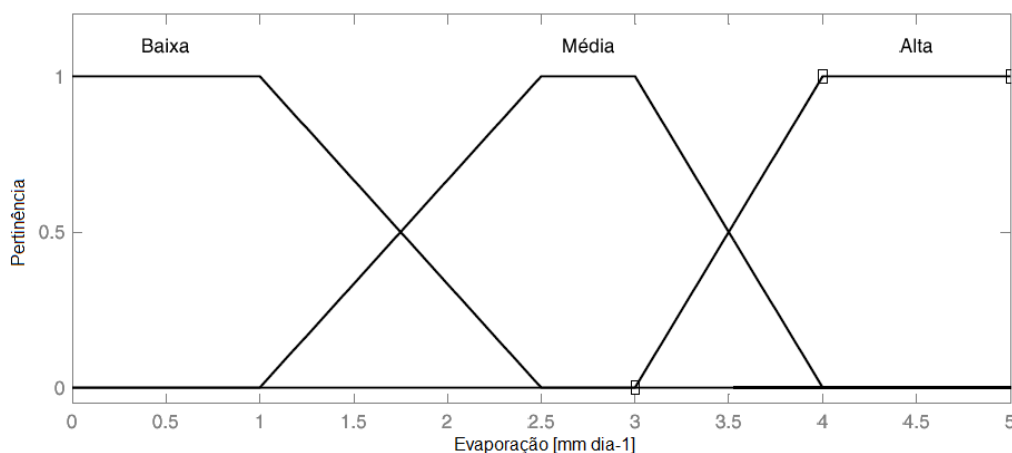
Fonte: Adaptado de INMET, 2016.

O valor médio diário desta variável totaliza aproximadamente  $2,7 \text{ mm dia}^{-1}$ , valor considerado como o meio de escala de *Evaporação*. Os parâmetros adotados para cada função de pertinência são apresentados na Tabela 3.6. A Figura 3.11 apresenta graficamente a *fuzzyficação* da variável *Evaporação*.

Tabela 3.6 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Evaporação*

Subconjunto	Função	Parâmetros (mm dia <sup>-1</sup> )			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0	0	1	2,5
Média	Trapezoidal	1	2,5	3	4
Alta	Trapezoidal	3	4	5	5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Figura 3.11 – Funções de pertinência da variável *Evaporação*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.4.3.5 Precipitação

A *Precipitação* é importante forma de irrigação natural da agricultura. Quanto maior a precipitação no período da cultura do arroz irrigado, menor a necessidade de irrigação complementar. A exemplo da *Evaporação*, a *Precipitação* também teve sua escala definida pela normal climática para o Estado do Rio Grande do sul. Os valores médios mensais e médio anual de evaporação são apresentados na Tabela 3.7 (INMET, 2016).

Tabela 3.7 – Distribuição pluviométrica mensal para o Estado do Rio Grande do Sul – Período 1961-1990

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Média (mm)	138	136	142	98	105	125	136	150	158	138	111	128	1554

Fonte: Adaptado de INMET, 2016.

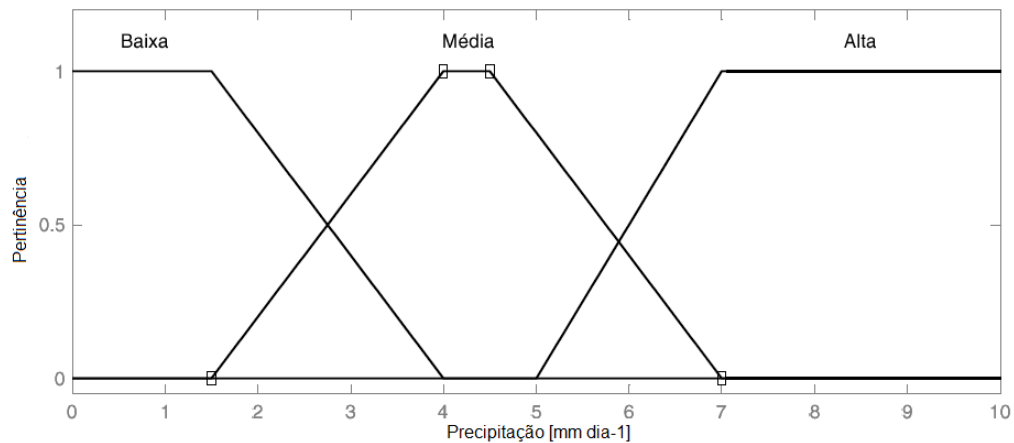
A média diária desta normal é de  $4,25 \text{ mm dia}^{-1}$ , aproximadamente, valor definido como valor central da escala de *Precipitação*. Os parâmetros dos subconjuntos que definem esta variável são apresentados na Tabela 3.8. A Figura 3.12 apresenta a *fuzzyficação* da variável de forma gráfica.

Tabela 3.8 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Precipitação*

Subconjunto	Função	Parâmetros ( $\text{mm dia}^{-1}$ )			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0	0	1,5	4
Média	Trapezoidal	1,5	4	4,5	7
Alta	Trapezoidal	4,5	7	10	10

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Figura 3.12 – Funções de pertinência da variável *Precipitação*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.4.3.6 Velocidade Média do Vento

A *Velocidade Média do Vento* influencia o processo de evapotranspiração das lavouras de arroz. Além de acelerar o processo de transpiração da planta, altas velocidades de vento contribuem para perdas laterais, devido ao arraste superficial da água para drenos. A velocidade do vento é historiada pelo INMET e possui sua normal para o Estado do Rio Grande do sul disponibilizada, conforme apresenta a Tabela 3.9.

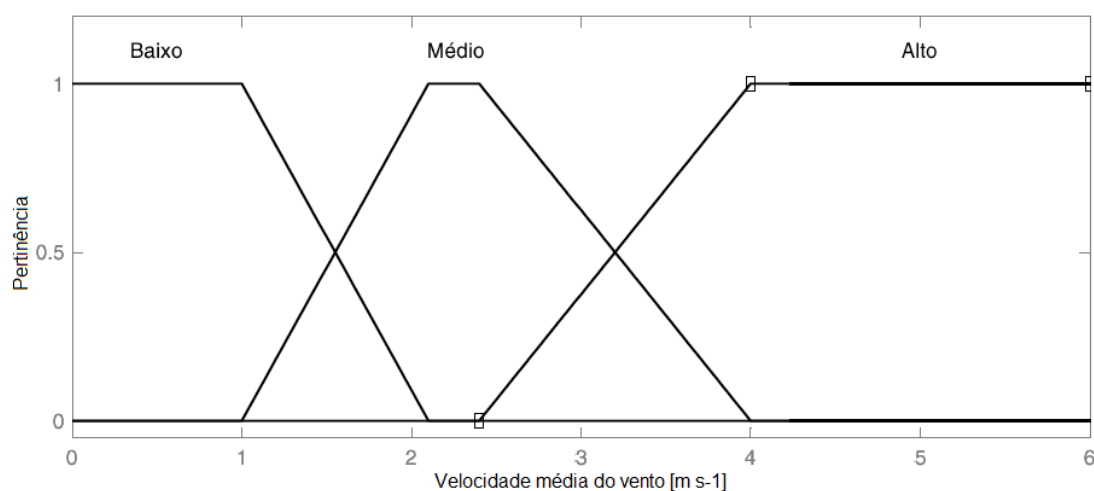
Tabela 3.9 – Intensidade média mensal do vento para o Estado do Rio Grande do Sul – Período 1961-1990

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Média (mm)	2,34	2,24	2,11	1,98	1,88	2,10	2,23	2,35	2,54	2,60	2,54	2,46	2,28

Fonte: Adaptado de INMET, 2016.

A média da velocidade do vento nestas três décadas é de  $2,28 \text{ m s}^{-1}$ , valor definido como central da escala de *Velocidade Média do Vento*. A Figura 3.13 apresenta a *fuzzyficação* da variável de forma gráfica. Os parâmetros dos subconjuntos que definem esta variável são apresentados na Tabela 3.10.

Figura 3.13 – Funções de pertinência da variável *Velocidade Média do Vento*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Tabela 3.10 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Velocidade Média do Vento*

Subconjunto	Função	Parâmetros (m s <sup>-1</sup> )			
		a	m	n	b
<b>Baixa</b>	Trapezoidal	0	0	1	2,2
<b>Média</b>	Trapezoidal	1	2,2	2,4	4
<b>Alta</b>	Trapezoidal	2,4	4	6	6

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### 3.4.3.7 *Altura do Levante*

A *Altura do Levante* representa a diferença de cotas entre o ponto de captação de água e o canal de distribuição da lavoura. Esta variável foi representada por três grupos Fuzzy denominados *Pequena*, *Média* e *Grande*, com funções de pertinência definidas na Tabela 3.11. Quanto maior a diferença entre estas cotas, maior será a potência instalada necessária, o que refletirá em um consumo de energia elétrica mais elevado.

Tabela 3.11 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Altura do Levante*

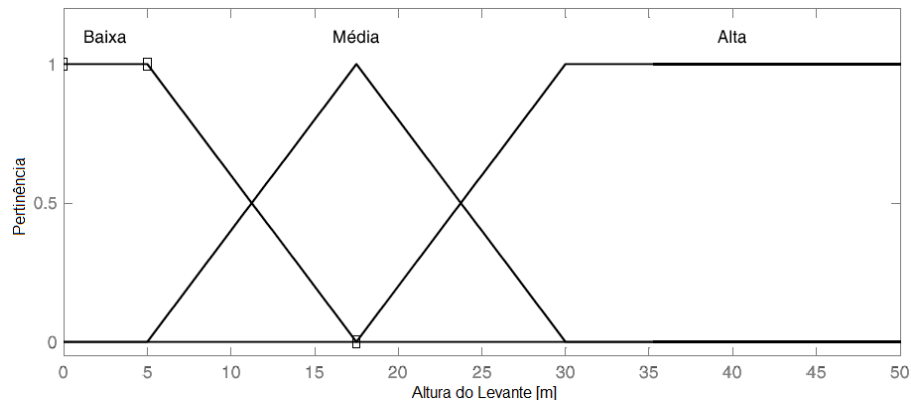
Subconjunto	Função	Parâmetros (m)			
		a	m	n	b
<b>Pequena</b>	Trapezoidal	0	0	5	17,5
<b>Média</b>	Triangular	5	17,5	-	30
<b>Grande</b>	Trapezoidal	17,5	30	50	50

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A unidade de medida mais adequada para expressar altura do levante é o metro (m). Todos os parâmetros da Tabela 3.11 estão expressos em metros. Considerou-se a altura de até 5 metros como uma altura de levante *baixa*, enquanto que alturas acima de 30 metros são consideradas no subgrupo *alta*. Para o subconjunto *média* considerou-se uma função de pertinência triangular, com pertinência máxima no ponto  $m = 17,5$  m. O fundo de escala desta variável foi

parametrizado em 50 metros. Estas características foram coletadas em entrevista com especialista do IRGA (2016). A Figura 3.14 apresenta a composição da variável de forma gráfica.

Figura 3.14 – Funções de pertinência da variável *Altura do Levante*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### 3.4.3.8 Comprimento da Tubulação

A variável *Comprimento da Tubulação* representa a medição de distância entre o ponto de captação da água até o ponto de desague na lavoura. Quanto maior o comprimento, maior a perda de carga e, portanto, maior a altura manométrica exigida da bomba e maior a energia consumida para transportar a água entre estes dois pontos. Esta variável foi traduzida em três subconjuntos: *Curta*, *Média* e *Longa*, com funções de pertinência definidas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Comprimento da Tubulação*

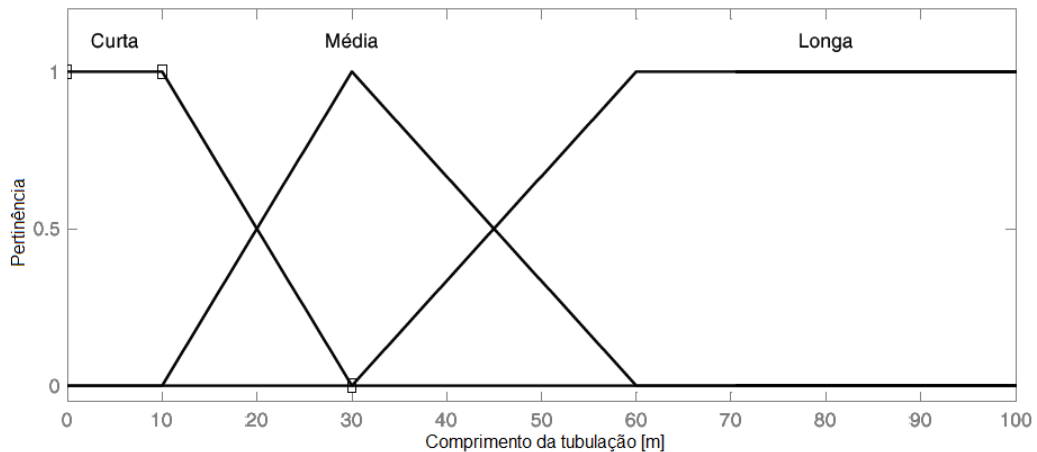
Subconjunto	Função	Parâmetros (m)			
		a	m	n	b
Pequena	Trapezoidal	0	0	10	30
Média	Triangular	10	30	-	60
Grande	Trapezoidal	30	60	100	100

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.



Foram utilizados valores entre 0 e 100 metros (m), de forma a compreender a totalidade das instalações, de acordo com a opinião do especialista do IRGA (2016). A representação gráfica desta variável é apresentada na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Funções de pertinência da variável *Comprimento da Tubulação*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### 3.4.3.9 Eficiência da Bomba

A variável *Eficiência da Bomba* refere-se ao ponto de rendimento global deste equipamento. Isto é, a eficiência da bomba está atrelada à condição de conservação do equipamento e à operação em seu ponto de máximo rendimento, considerando a curva de vazão e altura manométrica ( $Q \times H$ ).

Para a obtenção do valor de *consumo eficiente estimado* da safra, insere-se como entrada nesta variável um valor de eficiência desejado para a instalação, ou um valor de eficiência possível de ser alcançado com a implementação de projetos de eficiência. Conforme as bibliografias, valores de rendimento acima de 80% são considerados altos para bombas centrífugas.

Para a realização da validação do modelo para uma lavoura, contudo, é necessária a utilização do valor real de rendimento do equipamento. Seu levantamento prático é possível. Deve-se primeiramente identificar o ponto de rendimento da bomba na curva  $Q \times H$ , através do seu ponto de operação e,

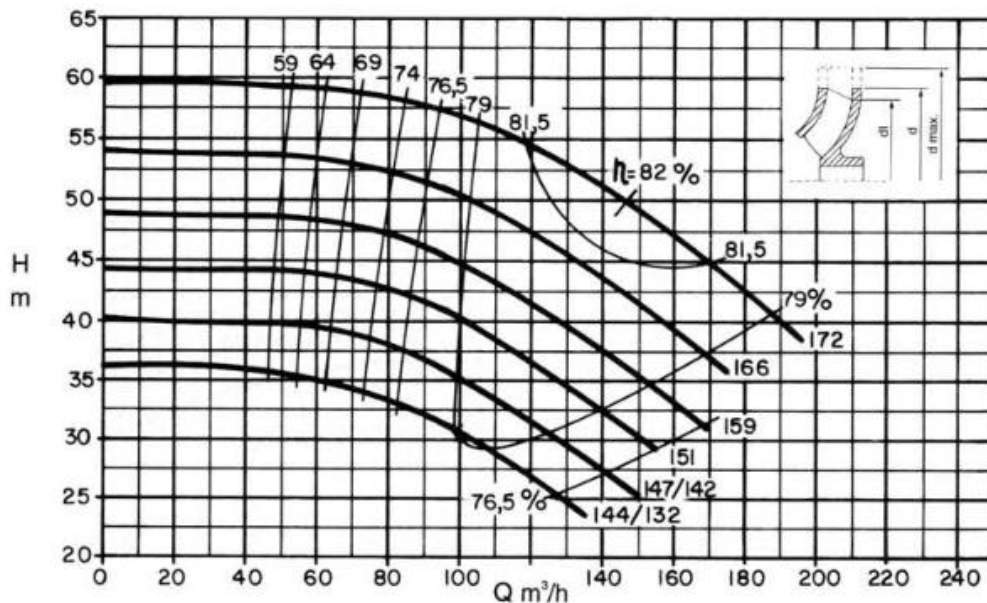
posteriormente, aplicar uma depreciação qualitativa a este rendimento, de acordo com a observação do estado de conservação do equipamento.

A identificação da eficiência operacional da bomba é realizada a partir do levantamento prático da vazão e da pressão de descarga do equipamento. O cálculo da altura manométrica (H) é realizado através da Equação (3.3). Em seguida realiza-se a leitura de eficiência na curva característica da bomba disponibilizada pelo fabricante. A Figura 3.16 apresenta um exemplo de curva de bomba.

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (3.3)$$

onde  $P$  representa a pressão de descarga medida, em kPa,  $\rho$  é a densidade do líquido, em  $\text{kg m}^{-3}$ , e  $g$  é a aceleração da gravidade, em  $\text{m s}^{-2}$ .

Figura 3.16 – Curva característica de uma bomba centrífuga



Fonte: KSB, 2016.

Para a avaliação qualitativa, esta metodologia propõe a classificação em três faixas, como apresentado na Tabela 3.13, onde valores de eficiência estão relacionados às condições encontradas dos equipamentos.

Tabela 3.13 – Proposta de avaliação qualitativa de eficiência de bombas de levante de acordo com seu estado de conservação

<b>Estado de Conservação do Equipamento</b>	<b>Bomba Nova / Bom Estado / Possui Manutenção Periódica</b>	<b>Bomba até 10 anos de uso / Estado Regular</b>	<b>Bomba acima de 10 anos de uso / Estado Precário / Apresenta Vazamentos</b>
<b>Eficiência Considerada</b>	96 a 100%	86 a 95%	70 a 85%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

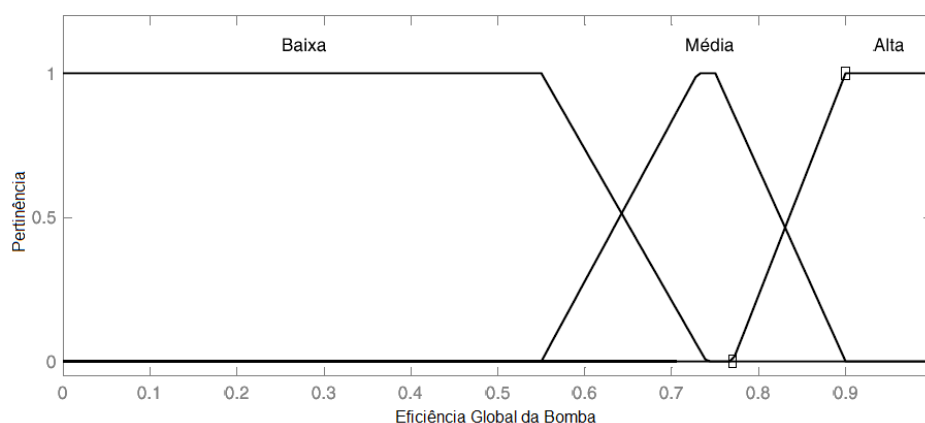
Desta forma, como exemplo, supomos que para a bomba da curva da Figura 3.16, com rotor de 166 mm de diâmetro, as leituras de pressão de descarga (P) e de vazão da bomba (Q) tenham sido 500 kPa (ou 5 bar) e  $100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , respectivamente. Aplicando a Equação (3.3), a altura manométrica H terá valor próximo a 50,98 m (considerando a densidade da água igual a 1). Logo, o rendimento operacional da bomba será lido no cruzamento do valor de Q e H, que no exemplo será próximo a 78%.

A eficiência da bomba no modelo será calculada conforme a Equação (3.4). Será a eficiência operacional da bomba acrescida da depreciação causada pelo estado de conservação da bomba (avaliado qualitativamente conforme a Tabela 3.13),

$$\textit{Eficiência Bomba} = \textit{Eficiência Conservação} \times \textit{Eficiência Operacional} \quad (3.4)$$

ou seja, o produto da eficiência observada a partir da conservação do equipamento e da eficiência operacional do equipamento.

Para a *fuzzyficação* da variável *Eficiência da Bomba* são três as funções de pertinência: *Baixa*, *Média* e *Alta*, conforme apresenta graficamente a Figura 3.17 e segundo os parâmetros da Tabela 3.14.

Figura 3.17 – Funções de pertinência da variável *Eficiência da Bomba*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Tabela 3.14 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Eficiência da Bomba*

Subconjunto	Função	Parâmetros (%)			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0	0	0,55	0,74
Média	Trapezoidal	0,55	0,74	0,77	0,90
Alta	Trapezoidal	0,77	0,90	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.4.3.10 Eficiência do Motor

A *Eficiência do Motor* apresenta o rendimento deste equipamento em termos percentuais (%) e leva em consideração seu estado de conservação, seu modelo (padrão ou alto rendimento), se seus enrolamentos são originais ou se já foi recondicionado e, ainda, seu rendimento operacional, determinado pela operação próxima à potência nominal. Nesta última consideração está implícita a condição de sobredimensionamento do motor.

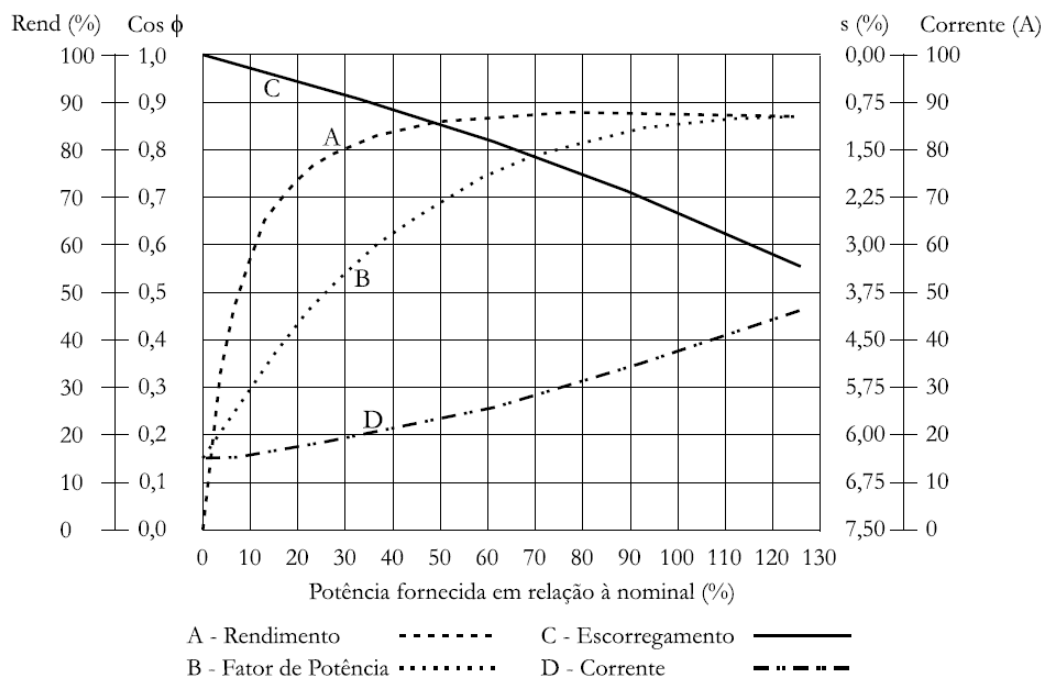
Para a avaliação de eficiência energética, através da obtenção do *consumo eficiente estimado* da safra, insere-se como entrada nesta variável o valor de eficiência de um motor novo de alto rendimento. Comercialmente, segundo os

fabricantes, motores de indução trifásicos de alto rendimento possuem eficiência próxima a 93%.

Para uma estimativa de consumo da lavoura, a identificação da eficiência do motor é análoga ao processo descrito para determinar a eficiência da bomba. Primeiramente, realiza-se a verificação do rendimento operacional sobre sua curva de carregamento disponibilizada pelo fabricante e, em seguida, aplica-se uma depreciação a partir da avaliação qualitativa do estado de conservação do motor e das condições ambientais às quais este está exposto.

O fabricante do motor de indução trifásico disponibiliza a curva de rendimento de acordo com a potência consumida em relação a sua potência nominal. Esta curva normalmente vem acompanhada de outras curvas características da máquina, como as curvas de escorregamento, corrente elétrica e fator de potência, conforme apresenta a Figura 3.18.

Figura 3.18 – Curvas características do motor de indução trifásico



Fonte: Adaptado de Bortoni e Santos, 2006.

Através da medição da potência consumida pelo motor e a comparação com a potência nominal sobre a curva A da Figura 3.18 é possível conhecer o rendimento operacional do motor. É possível visualizar, na curva, que para valores abaixo de

50% de carregamento do motor obtém-se valores de rendimentos bem menores que o rendimento máximo.

A avaliação do estado de conservação implica em um percentual de depreciação sobre o rendimento do motor elétrico. Fatores tais quais rebobinamento do estator, operação em temperatura elevada e nível inadequado de tensão impactam no rendimento do motor elétrico (COSTA et. al., 1998) e são frequentemente encontrados nas instalações de levante. Em termos médios, cada rebobinamento do estator representa uma depreciação de 1,5 a 2,5% do rendimento de um motor novo (GUIMARÃES, 2008). Esta observação empírica será traduzida para um valor de depreciação da eficiência do motor, conforme propõe a Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Proposta de avaliação empírica de eficiência de motores usados no levante de acordo com seu estado de conservação

<b>Estado de Conservação do Equipamento</b>	<b>Motor Novo / Operando Condições Adequadas</b>	<b>Boas Condições de Conservação / Possui Manutenção Periódica / Enrolamentos Originais</b>	<b>Acima de 10 anos de Uso / Rebobinado uma ou mais vezes / Condições inadequadas de operação</b>
<b>Eficiência Considerada</b>	100%	95 a 99%	85 a 94%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O valor de eficiência do motor inserido no modelo será proveniente da Equação (3.5), que considera a eficiência de operação dada pelo fabricante e o decréscimo causado pelo ambiente externo e degradação pelo tempo de uso.

$$Eficiência\ motor = Eficiência\ Conservação \times Eficiência\ Operacional \quad (3.5)$$

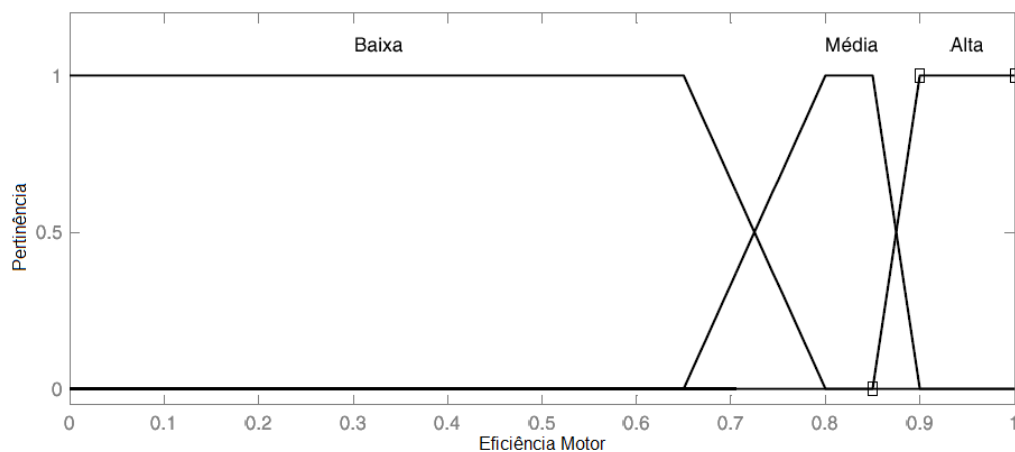
A partir dos valores colhidos na Equação (3.5), foram elaborados três funções de pertinência para representar a eficiência do motor: *Baixa*, *Média* e *Alta*, com escala entre 0 e 100%, conforme parâmetros definidos na Tabela 3.16 e apresentado graficamente na Figura 3.19.

Tabela 3.16 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Eficiência do Motor*

Subconjunto	Função	Parâmetros (%)			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0	0	0,65	0,8
Média	Trapezoidal	0,65	0,8	0,85	0,9
Alta	Trapezoidal	0,85	0,9	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Figura 3.19 – Funções de pertinência da variável *Eficiência do Motor*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### 3.4.3.11 Perdas de Água por Vazamentos

A ausência de *Perdas de Água por Vazamentos* é outro ponto que denota a eficiente utilização dos recursos, neste caso particular não apenas a energia elétrica, mas também o recurso hídrico. A existência de vazamentos nas tubulações gera uma necessidade adicional de tempo de operação dos equipamentos para que um mesmo volume útil de água seja transferido para a lavoura, ou seja, maior montante de energia elétrica consumida para atender a necessidade hídrica da lavoura.

Esta variável é expressa em termos percentuais (%) da vazão total bombeada. A avaliação desta variável é realizada a partir da observação visual,

inicialmente, de forma a constatar a presença ou ausência de vazamentos. Em seguida, de forma empírica realiza-se a medição da vazão do vazamento, comparando-a com a vazão da bomba, conforme a Equação (3.6).

$$\% \text{ Vazamentos} = \frac{\text{Vazão}_{\text{vazamento}}}{\text{Vazão}_{\text{Bomba}}} \quad (3.6)$$

Para os casos em que a grande quantidade de vazamentos ao longo da tubulação impossibilita sua medição, as vazões de saída da bomba e de chegada ao canal de irrigação podem ser relacionadas para obter o percentual de vazamentos, conforme a Equação (3.7).

$$\% \text{ Vazamentos} = \frac{\text{Vazão}_{\text{Bomba}} - \text{Vazão}_{\text{Canal}}}{\text{Vazão}_{\text{Bomba}}} \quad (3.7)$$

Para expressar esta variável utilizou-se três subconjuntos, *Inexistente/Baixa*, *Aceitável* e *Inaceitável*, que são parametrizados conforme valores apresentados na Tabela 3.17.

Tabela 3.17 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Perdas de Água por Vazamento*

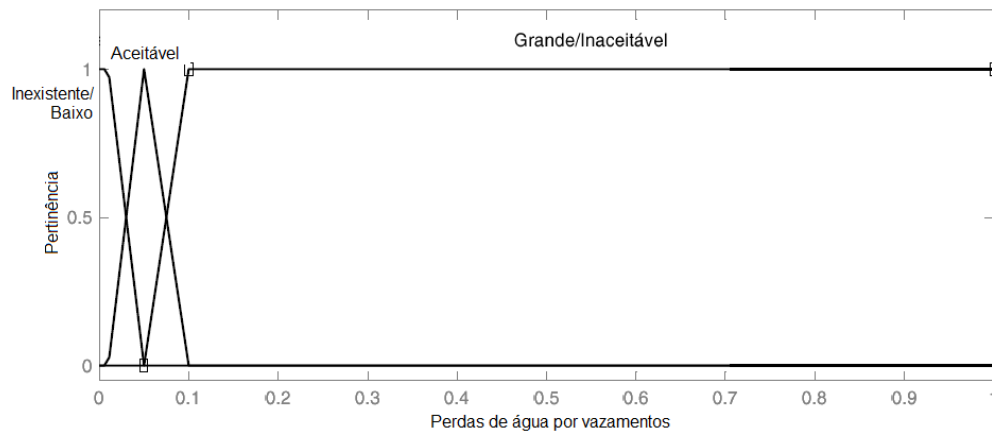
Subconjunto	Função	Parâmetros (%)			
		a	m	n	b
<b>Inexistente/Baixo</b>	Trapezoidal	0	0	0,01	0,05
<b>Aceitável</b>	Triangular	0,01	0,05	-	0,10
<b>Grande/Inaceitável</b>	Trapezoidal	0,05	0,10	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A visualização gráfica das *Perdas de Água por Vazamentos* é apresentada na Figura 3.20.



Figura 3.20 – Funções de pertinência da variável *Área Irrigada*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.4.4 Inferência Fuzzy

A inferência Fuzzy da primeira etapa (tratamento das variáveis de entrada) e da segunda etapa (cálculo do indicador de consumo de energia elétrica) utiliza controladores do tipo Mamdani.

Os controladores Mamdani são os mais comumente encontrados na literatura e possuem características adequadas a este trabalho, como a praticidade de implementação e a possibilidade de acompanhamento e manipulação das regras do algoritmo (LIANG e WANG, 1991). É caracterizado, também, pelo fato de as relações difusas ocorrerem tanto nos antecedentes (parte das condições) quanto nos consequentes (parte das conclusões) das regras.

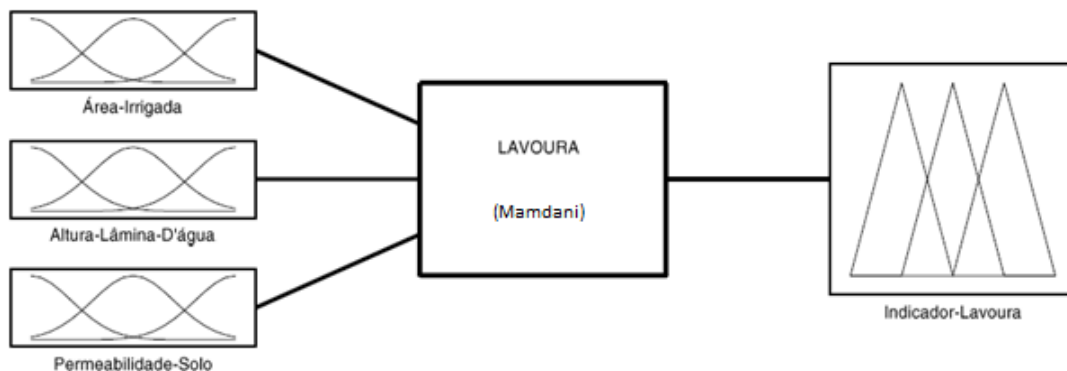
Um controlador Fuzzy, de forma geral, realiza a relação entre cada variável dentro de uma regra e também a agregação das diferentes regras. Segundo Ross (2010), o controlador Mamdani realiza esta tarefa através de uma técnica gráfica. Devido à sua versatilidade, pode ser implementado em algumas variações, de acordo com os diferentes métodos de inferência possíveis, entre os quais os mais comuns são a composição máximo dos mínimos (*max-min*) e a composição máximo dos produtos (*max-product*). Esta dissertação adotou a composição máximo dos mínimos, onde a agregação do conjunto de regras é realizada pelo operador *união* (operador lógico *or*). Já dentro de cada regra, as condições são relacionadas com o operador *intersecção* (operador lógico *and*) (BRANCALIONI, 2010).

Cada um dos controladores desenvolvidos nesta metodologia será caracterizado a seguir. Já o algoritmo da metodologia proposta, que contém a parametrização de cada etapa de inferência e as bases de regras desenvolvidas, é apresentado no Apêndice C.

#### 3.4.4.1 Controlador Lavoura

As variáveis relativas às características da lavoura de arroz irrigado são avaliadas no controlador denominado *Lavoura*. Este controlador possui três variáveis de entrada que influenciam na quantidade de água a ser bombeada pelo sistema de irrigação. O estabelecimento das relações entre estas variáveis na base de regras do controlador resulta em um indicador de necessidade de irrigação relativo às características da lavoura, que posteriormente servirá de entrada para o controlador de previsão de consumo. A Figura 3.21 apresenta a estrutura do controlador *Lavoura*.

Figura 3.21 – Estrutura controlador *Lavoura*

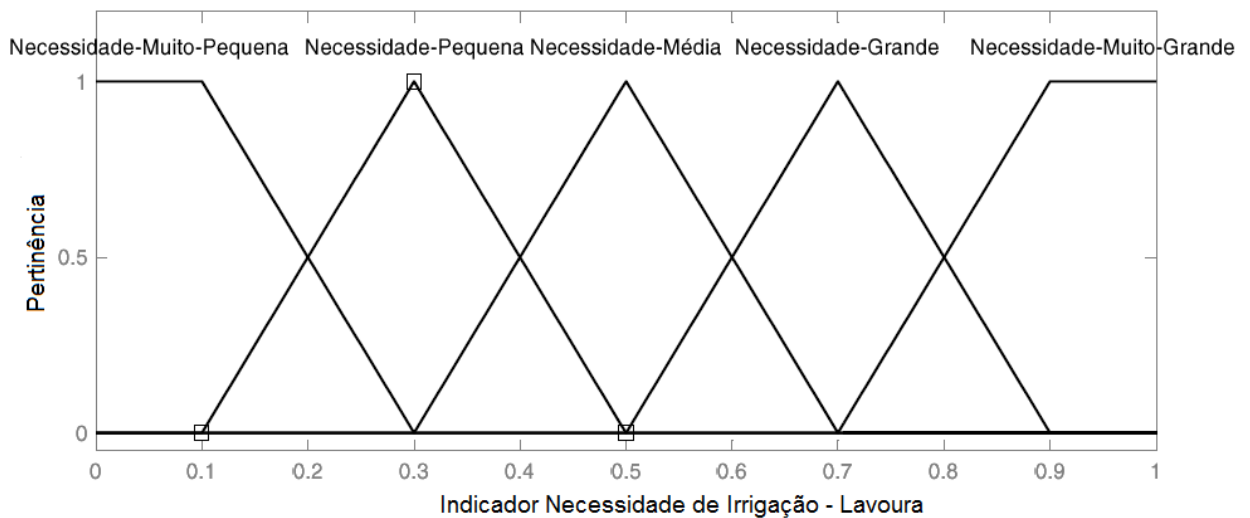


Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Ao todo, na base de regras deste controlador, foram inseridas 27 regras de relação entre as variáveis de entrada. Cada uma das regras traz como conclusão a correspondência a um dos cinco conjuntos de pertinência da variável de saída *Indicador de necessidade de irrigação – lavoura*, representada na Figura 3.21 por “Indicador Lavoura”.

A variável de saída é um indicador com escala entre 0 e 1, como é observado na Figura 3.22. Cinco conjuntos Fuzzy preenchem totalmente a escala: *necessidade muito pequena*, *necessidade pequena*, *necessidade média*, *necessidade grande* e *necessidade muito grande*.

Figura 3.22 – Variável de saída *Indicador de necessidade de irrigação*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Os parâmetros de cada função de pertinência da variável são apresentados na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Indicador de Necessidade de Irrigação – Lavoura*

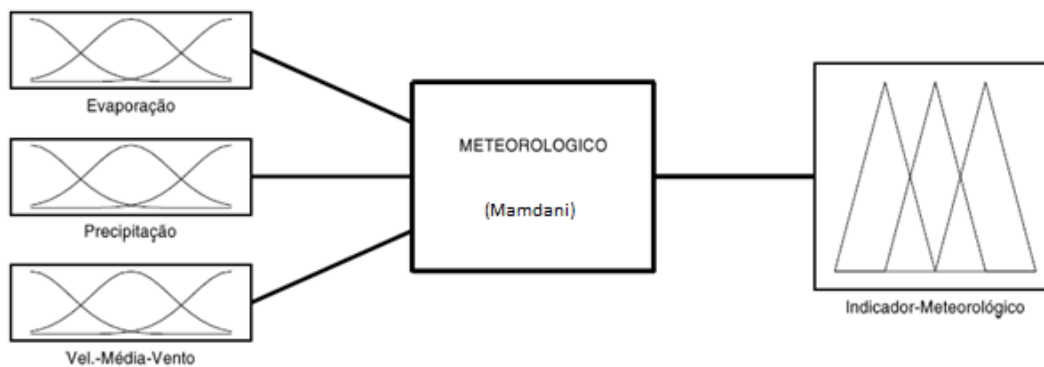
Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
<b>Muito Pequena</b>	Trapezoidal	0	0	0,1	0,3
<b>Pequena</b>	Triangular	0,1	0,3	-	0,5
<b>Média</b>	Triangular	0,3	0,5	-	0,7
<b>Grande</b>	Triangular	0,5	0,7	-	0,9
<b>Muito Grande</b>	Trapezoidal	0,7	0,9	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

### 3.4.4.2 Controlador Meteorológico

As variáveis climáticas que influenciam em uma necessidade maior ou menor de reposição de água na lavoura são interpretadas pelo controlador denominado *Meteorológico*. As três variáveis identificadas como mais impactantes são *Evaporação*, *Precipitação* e *Velocidade média do vento*. A estrutura deste controlador é apresentada na Figura 3.23.

Figura 3.23 – Estrutura do controlador *Meteorológico*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Ao todo, este controlador conta com 27 regras em sua base. Cada uma das regras traz como conclusão a correspondência a um dos cinco conjuntos de pertinência da variável de saída *Indicador de necessidade de irrigação – meteorológico*.

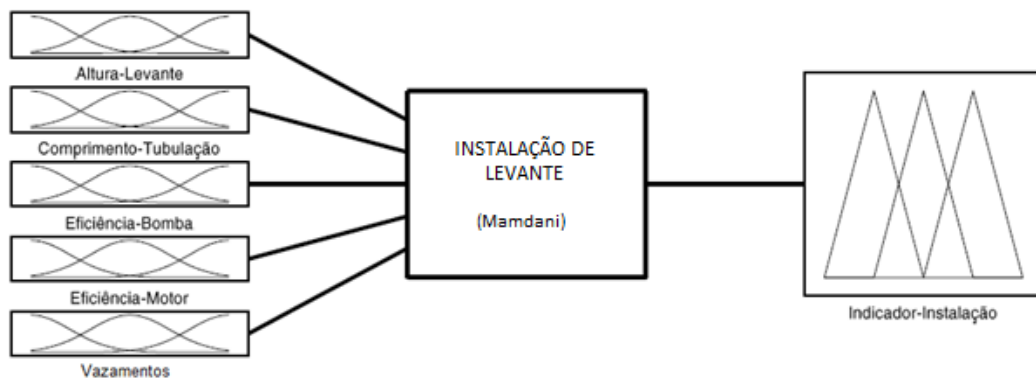
A variável de saída deste controlador também é um indicador com escala entre 0 e 1, composto de cinco conjuntos Fuzzy: *necessidade muito pequena*, *necessidade pequena*, *necessidade média*, *necessidade grande* e *necessidade muito grande*, tal qual foi apresentado na Figura 3.22 e parametrizado na Tabela 3.18.

### 3.4.4.3 Controlador Instalação de Levante

As variáveis da instalação do sistema de irrigação impactam diretamente no consumo de energia elétrica pelo conjunto motor-bomba, diferentemente das

anteriores. Neste grupo foram identificadas as cinco variáveis de maior impacto sobre o consumo, que são *Altura do levante*, *Comprimento da tubulação*, *Eficiência da bomba*, *Eficiência do motor* e *Perdas de água por vazamentos*. A Figura 3.24 apresenta o controlador *Instalação de Levante*.

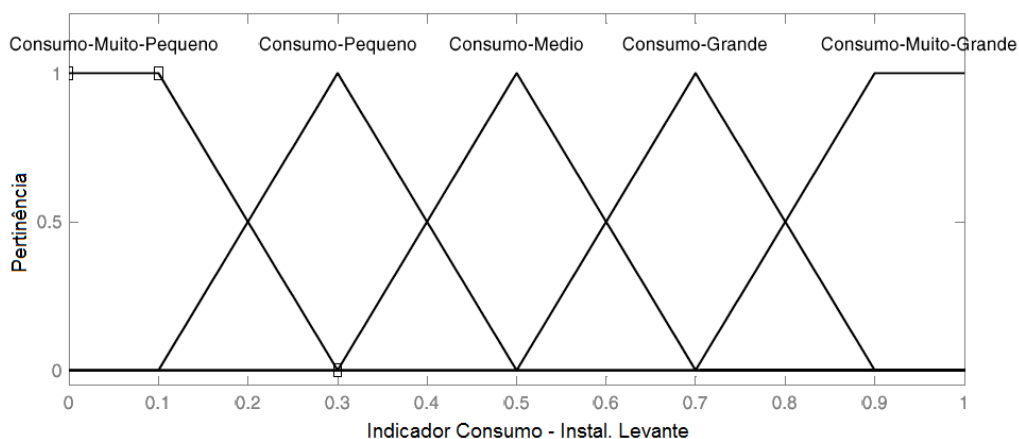
Figura 3.24 – Estrutura do controlador *Instalação de Levante*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Na base de regras deste controlador foram cadastradas 170 diferentes regras. A conclusão de cada regra corresponde a um dos cinco conjuntos de pertinência da variável de saída *Indicador de Consumo - Instalação de Levante*.

A variável de saída deste controlador também é um indicador com escala entre 0 e 1, composto de cinco conjuntos Fuzzy: *consumo muito pequeno*, *consumo pequeno*, *consumo médio*, *consumo grande* e *consumo muito grande*, como é apresentado na Figura 3.25 e parametrizado na Tabela 3.19..

Figura 3.25 – Variável *Indicador de Consumo – Instalação de levante*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Tabela 3.19 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Indicador de Consumo – Instalação de Levante*

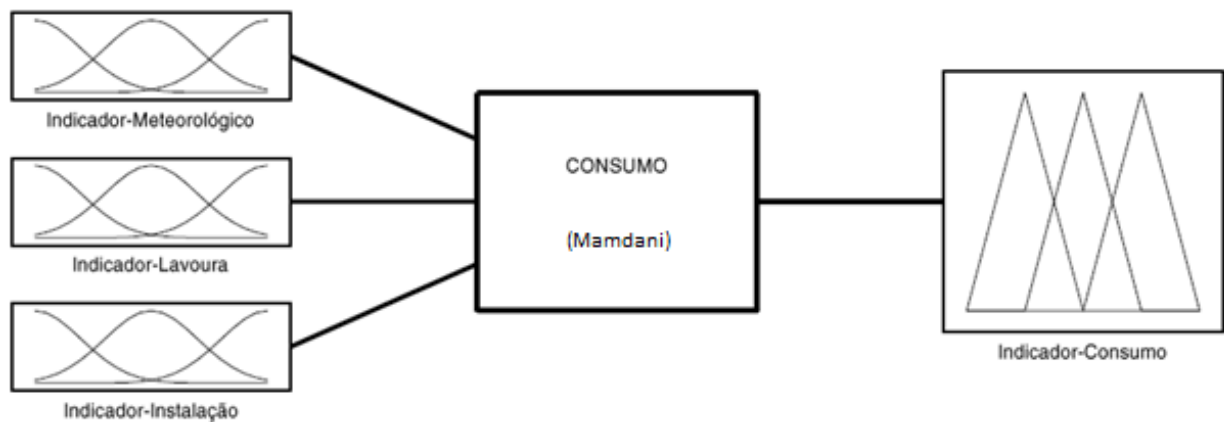
Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
<b>Muito Pequeno</b>	Trapezoidal	0	0	0,1	0,3
<b>Pequeno</b>	Triangular	0,1	0,3	-	0,5
<b>Médio</b>	Triangular	0,3	0,5	-	0,7
<b>Grande</b>	Triangular	0,5	0,7	-	0,9
<b>Muito Grande</b>	Trapezoidal	0,7	0,9	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

#### 3.4.4.4 Controlador Consumo

Esta etapa de inferência realiza o tratamento dos três indicadores parciais provenientes dos controladores *Lavoura*, *Meteorológico* e *Instalação de Levante*. As variáveis de entrada deste controlador são, portanto, as saídas dos três controladores descritos anteriormente. O estabelecimento das relações entre estes gera na saída uma indicação de consumo do sistema de irrigação. A Figura 3.26 ilustra a estrutura do controlador *Consumo*.

Figura 3.26 – Estrutura controlador *Consumo*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A base de regras deste controlador possui 125 regras cadastradas, prevendo todas as possibilidades combinatórias das entradas. A variável *Indicador de consumo* possui escala entre 0 e 1, coberta por sete conjuntos de pertinência. Foram utilizados sete conjuntos com o objetivo de aumentar a precisão dos resultados (SIMÕES e SHAW, 1999). A apresentação detalhada da variável de saída, bem como o método de *defuzzyficação*, são apresentados na seção a seguir.

### 3.4.5 Defuzzyficação e interpretação dos resultados

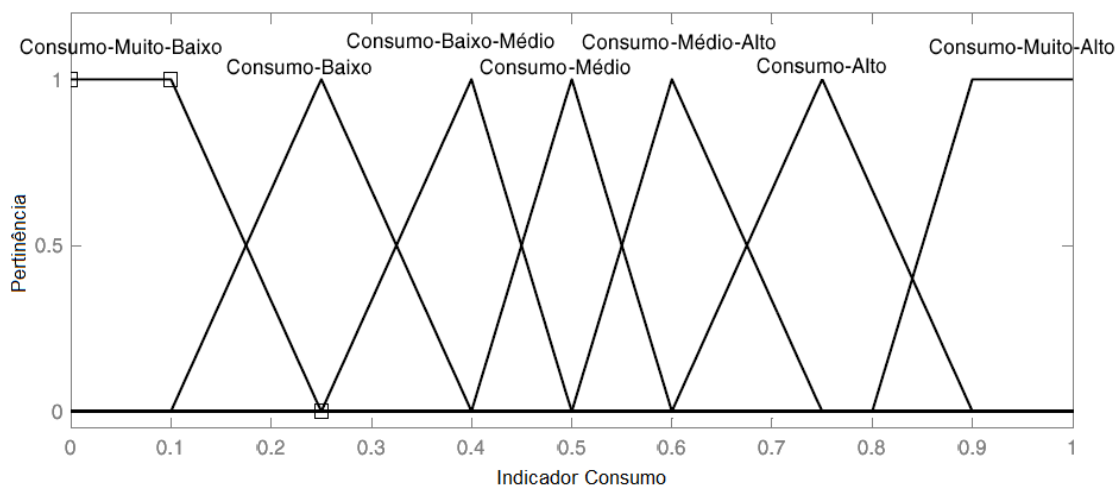
A última etapa da implementação da lógica Fuzzy é a *defuzzyficação* da variável *Indicador de Consumo* proveniente da saída da 2ª etapa de inferência. Nela é realizada a interpretação e a distribuição de possibilidades de saída do modelo linguístico Fuzzy de forma quantitativa. Em outras palavras, este processo transforma as variáveis nebulosas trabalhadas pelo método até então em um único valor numérico.

Dentre as alternativas de métodos de *defuzzyficação* possíveis, o selecionado foi o método do centro de gravidade, ou centroide, que considera a união das conclusões de todas as regras ativas solucionando a integral de toda a área de saída (ROSS, 2010).

A *defuzzyficação* é realizada sobre a variável de saída *Indicador de consumo*, que é ilustrada na Figura 3.27. Esta variável possui sete funções de pertinência:

*Consumo muito baixo, Consumo baixo, Consumo baixo-médio, Consumo médio, Consumo médio-alto, Consumo alto e Consumo muito alto.* As funções dos sete subconjuntos que descrevem esta variável foram parametrizadas conforme apresentado na Tabela 3.20.

Figura 3.27 – Variável de saída *Indicador de Consumo*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Tabela 3.20 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Indicador de Consumo*

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
<b>Muito Baixo</b>	Trapezoidal	0	0	0,1	0,25
<b>Baixo</b>	Triangular	0,1	0,25	-	0,4
<b>Baixo-Médio</b>	Triangular	0,25	0,4	-	0,5
<b>Médio</b>	Triangular	0,4	0,5	-	0,6
<b>Médio-Alto</b>	Triangular	0,5	0,6	-	0,75
<b>Alto</b>	Triangular	0,6	0,75	-	0,9
<b>Muito Alto</b>	Trapezoidal	0,75	0,9	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.



A partir do resultado do indicativo de consumo originado pela variável de saída do modelo Fuzzy é realizada a etapa de Estimativa de Consumo, que considera o período de observação e a potência nominal do motor, e é apresentada na próxima seção.

### 3.5 CONSUMO EFICIENTE ESTIMADO

O cálculo de Consumo Eficiente Estimado ( $C_{EF}$ ) de energia elétrica é o passo seguinte desta metodologia. Seu valor representa uma estimativa de consumo para uma instalação de levante em suas melhores características de eficiência. Para realizar seu cálculo é utilizado o Indicador de Consumo Fuzzy, que é gerado previamente pelo modelo Fuzzy, a partir da inserção dos seguintes dados nas entradas:

- dados reais da lavoura;
- informações meteorológicas reais;
- dados eficientes de equipamentos e técnicas de manejo de água.

São utilizados dados reais para as ocorrências meteorológicas e para as características físicas e geológicas imutáveis da lavoura. Nos pontos em que há a possibilidade de atuação humana para a melhoria de eficiência no consumo de energia elétrica, como na eficiência individual dos equipamentos, são considerados valores “eficientes”. O quadro 3.2 apresenta as variáveis de entrada que são intrínsecas de cada lavoura e, portanto, imutáveis, e aquelas que são passíveis de ajuste para aumento da eficiência energética.

Quadro 3.2 – Classificação das variáveis no cálculo de Consumo Eficiente Estimado

<b>Variáveis Não Ajustáveis</b>	<b>Variáveis Passíveis de Ajuste</b>
Evaporação; Precipitação; Velocidade Média do Vento; Área Irrigada; Permeabilidade Média do Solo; Altura do Levante; Comprimento da Tubulação.	Altura da Lâmina d'Água; Eficiência da Bomba; Eficiência do Motor; Perdas de Água por Vazamentos.

Para as variáveis que podem ser ajustadas através de projetos de aumento em eficiência são considerados valores de referência de alto rendimento. Esta metodologia propõe a utilização dos valores apresentados na Tabela 3.21, que segundo a revisão bibliográfica representam valores eficientes e não utópicos para as variáveis ajustáveis.

Tabela 3.21 – Valores de Referência utilizados para a modelagem do Consumo Eficiente Estimado

Variável	Altura Lâmina d'Água	Eficiência Bomba	Eficiência Motor	Vazamentos Tubulação
<b>Valor de Alto Rendimento</b>	1 cm	82%	93%	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O cálculo do Consumo Eficiente Estimado propriamente dito é realizado, conforme a Equação (3.8), que considera o período da safra (ou o período de observação dos dados) e a potência nominal do motor de levante.

$$C_{EF} = \text{Indicativo Consumo Fuzzy} \times (\text{Período} \times 24 \text{ h}) \times \text{Potência Motor} \quad (3.8)$$

onde a *Potência do Motor* é dada em kW, o *Período* em dias e o  $C_{EF}$  em kWh.

A variável de saída do modelo Fuzzy, *Indicador de Consumo*, equivale a uma medição percentual da energia total consumível pela instalação. Sua grandeza variará de acordo com a necessidade de irrigação demonstrada pelas condições de entrada e apontará uma referência para o consumo eficiente da instalação.

O cálculo do  $C_{EF}$  é realizado como complemento à *defuzzyficação*. Este cálculo poderia ser inserido na *defuzzyficação* através da escala da variável *Indicador de Consumo*. Entretanto, neste caso, seria necessária uma nova parametrização desta variável para cada safra, uma vez que, de uma lavoura a outra, observa-se grandes variações tanto nos períodos de observação dos dados quanto da potência instalada nos motores. Ao utilizar uma escala percentual (de 0 a 1) na *defuzzyficação* e realizar a etapa de cálculo do Consumo Eficiente Estimado

externamente à modelagem Fuzzy, não há a necessidade de realizar alterações ao modelo durante a utilização da Metodologia.

### 3.6 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

A análise de eficiência energética passa pelo princípio da comparação do valor real de consumo verificado ( $C_V$ ) pelo sistema de levante durante a safra com o valor de consumo eficiente estimado ( $C_{EF}$ ) calculado conforme proposto na seção 3.5 desta dissertação.

Quanto mais próximo o consumo verificado se apresentar da estimativa de consumo eficiente, conclui-se maior será a eficiência da instalação. Por outro lado, quanto maior o montante real de energia consumida em relação ao  $C_{EF}$ , pior foi o nível de eficiência da safra.

Para possibilitar uma análise comparativa entre safras, propõe-se o cálculo de dois índices de eficiência, a *Energia Passível de Economia* ( $E_{PE}$ ) e *Possibilidade de Melhoria em Eficiência* (PME). O  $E_{PE}$  representa o montante de energia possível de economizar na hipótese de a lavoura adotar os padrões de eficiência da Tabela 3.21. Já a PME representa um percentual da economia de energia frente ao consumo verificado no período. Estes índices são calculados pelas equações (3.9) e (3.10), respectivamente.

$$E_{PE} = C_V - C_{EF} \quad (3.9)$$

$$PME = \frac{E_{PE}}{C_V} \quad (3.10)$$

Este último permite a classificação da instalação de levante da lavoura de arroz irrigado em níveis de eficiência no uso da energia elétrica, conforme proposto na Tabela 3.22.

Tabela 3.22 – Classificação da Instalação quanto ao Nível de Eficiência

	Nível de Eficiência
<b>PME<sup>1</sup> ≤ 15%</b>	Instalação Eficiente
<b>15% &lt; PME ≤ 30%</b>	Ineficiência Média
<b>PME &gt; 30%</b>	Ineficiência Grande

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

<sup>1</sup> PME: Possibilidade de Melhoria em Eficiência.

A situação prevista como *Ineficiência Grande* merece prioridade na seleção para auditoria energética e é indicada por esta metodologia como prioritária para receber projetos incentivados de eficiência energética. As instalações classificadas como *Ineficiência Média* demonstram possibilidades de aumento da eficiência energética e, eventualmente, podem ser trabalhadas neste sentido. Estes casos denotam a presença de equipamentos com baixa eficiência e/ou manejo ineficiente da água, que estão entre as situações indicadas a seguir:

- Motor elétrico reconicionado ou obsoleto, operando em temperatura elevada, ou operando fora da zona de melhor rendimento (sobredimensionado);
- Bomba com o eixo danificado, com incrustações internas, com vazamentos, ou não adequada à instalação;
- Acoplamento motor – bomba inadequado;
- Vazamento de água nas tubulações;
- Adoção de nível elevado de lâmina d'água;
- Perda de água por transbordamento da lavoura;
- Drenagem deliberada realizada pelo produtor;
- Utilização da instalação de levante para irrigação de outra área não prevista;
- Consumo de energia por outra carga elétrica.

As lavouras com classificação *Instalação Adequada* apresentam níveis bom ou excelente em eficiência no uso da energia elétrica, de forma que não é indicada a implementação de projetos de efficientização, bastando o acompanhamento da evolução destes indicadores nas próximas safras.

Em algumas situações, contudo, há a possibilidade do consumo verificado ser inferior ao valor estimado pelo modelo. Estes casos refletem a ocorrência de uma ou mais situações não previstas pelo modelo, entre as quais podem ser citados:

- Desabastecimento de energia durante um período significativo, com instalação de sistema de levante provisório;
- Utilização de outra fonte de energia para o bombeamento (bomba diesel, por exemplo) em paralelo com a bomba elétrica;
- Perdas Não Técnicas (roubos, fraudes, erros de faturamento, etc.).

Estas ocorrências inviabilizam uma análise efetiva de eficiência no consumo de energia elétrica, visto que energia não contabilizada pelo medidor da instalação é convertida em trabalho no levante de água para a lavoura. Entretanto, um indicativo de inspeção devido à possibilidade de existência de perdas não técnicas é sinalizado por esta metodologia.



## **4 TESTES DE VALIDAÇÃO E DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Este capítulo apresenta os testes de validação, de aplicação da metodologia e de funcionamento do modelo e discute os resultados obtidos a partir de dados reais de lavouras de arroz irrigado localizadas no Estado do Rio Grande do Sul.

### **4.1 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA**

O modelo proposto nesta metodologia é capaz de realizar a estimativa de consumo real de energia elétrica de uma safra, a partir da inserção dos valores reais de eficiência dos equipamentos ao invés daqueles eficientes propostos na Tabela 3.22.

A validação deste modelo ocorre com a aplicação de dados reais de lavouras de arroz irrigado. Para tal, o consumo estimado, baseado nas informações reais, deverá se aproximar do consumo verificado para as safras observadas. Esta seção descreve os dados utilizados para a realização destes testes e também os resultados obtidos.

#### **4.1.1 Descrição do conjunto de dados para validação**

Os dados utilizados para a validação da metodologia apresentada compreendem um conjunto de cinco safras de três lavouras distintas, formando um total de quinze blocos de dados. Os blocos de dados compreendem tanto informações das lavouras, como dados meteorológicos, características da instalação e dados de consumo verificado nestas instalações.

As lavouras possuem características semelhantes entre si em relação às técnicas de irrigação e são localizadas na região metropolitana de Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul. As unidades consumidoras são identificadas pelas siglas LAV-01, LAV-02 e LAV-03. As figuras 4.1 a 4.3 apresentam imagens de satélite, obtidas através do Google Earth®, que mostram as três lavouras utilizadas nos testes.

Figura 4.1 – Lavoura LAV-01



Fonte: Adaptado de Google Earth®, 2016.

Figura 4.2 – Lavoura LAV-02



Fonte: Adaptado de Google Earth®, 2016.

Figura 4.3 – Lavoura LAV-03



Fonte: Adaptado de Google Earth®, 2016.



Os dados de área da lavoura e potência instalada foram obtidos junto à empresa de distribuição de energia local. As potências nominais dos motores dos sistemas de levante de cada lavoura são utilizadas na etapa final da metodologia, para o cálculo de previsão do consumo.

O solo destas lavouras é do tipo Planossolos, caracterizado por ter drenagem ruim, conforme a seção 3.2.1. Para estes, adotou-se a velocidade de percolação vertical de 3 mm dia<sup>-1</sup>, conforme proposto na seção 3.4.3.3. Na Tabela 4.1 são apresentadas as características principais consideradas para estas lavouras.

Tabela 4.1 – Dados gerais das lavouras

<b>Lavoura</b>	<b>Área Irrigada aproximada (ha)</b>	<b>Permeabilidade Média do Solo (mm dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Potência Motor (kW)</b>
<b>LAV-01</b>	90	3	44,1
<b>LAV-02</b>	300	3	147,1
<b>LAV-03</b>	50	3	36,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Quanto ao período de observação das lavouras, as safras ocorreram entre os anos de 2009/2010 e 2013/2014. No sul do Brasil, a cultura do arroz irrigado geralmente se desenvolve no período compreendido entre os meses de setembro e março.

A coleta dos dados de consumo das unidades consumidoras também foi realizada junto à companhia de distribuição, que disponibilizou os dados da memória de massa dos medidores eletrônicos das unidades para os períodos descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Períodos observados e consumos verificados nas lavouras sob análise

<b>Consumidor</b>	<b>Safra</b>	<b>Início dos dados</b>	<b>Fim dos dados</b>	<b>Número de dias</b>	<b>Consumo Verificado (kWh)</b>
<b>LAV-01</b>	2009/10	02/09	16/03	196	56.471,60
	2010/11	07/09	24/03	199	66.609,80
	2011/12	24/10	26/01	95	27.220,96
	2012/13	13/08	24/12	134	40.153,95
	2013/14	14/11	24/02	103	41.524,30
<b>LAV-02</b>	2009/10	1/10	19/03	170	141.070,51
	2010/11	17/09	23/03	188	42.221,43
	2011/12	28/10	26/01	92	81.748,09
	2012/13	28/08	22/10	56	68.514,86
	2013/14	15/08	18/03	216	278.677,11
<b>LAV-03</b>	2009/10	8/10	17/03	161	52.929,30
	2010/11	20/09	20/02	154	21.405,27
	2011/12	24/10	26/01	95	22.226,05
	2012/13	15/10	21/12	68	21.952,19
	2013/14	13/11	22/02	102	46.441,58

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

As lavouras possuem medidores eletrônicos dedicados à instalação de levante, instalados em média tensão (MT). Estes dados são registrados em intervalos de 15 minutos em arquivos que, posteriormente, são interpretados por um software chamado ELO50. Os valores coletados foram integralizados em consumos diários e em um valor de consumo total do período, tal qual é apresentado na Tabela 4.2.

Os dados meteorológicos foram coletados a partir do banco de dados do INMET (2016) para os mesmos períodos de observação de consumo. Foi utilizada como referência a estação climatológica de Porto Alegre, situada cerca de 40 km de distância das lavouras, localização mais aproximada disponível.

Os dados de clima foram coletados no formato de totalização diária para precipitação e evaporação, e média diária para a velocidade média do vento. Com

estes dados, foram calculadas as médias diárias de cada uma das variáveis para cada safra de cada lavoura. Os valores de média calculados para as variáveis meteorológicas são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Dados Meteorológicos utilizados nos testes e validação do modelo

<b>Consumidor</b>	<b>Safra</b>	<b>Evaporação Média (mm dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Precipitação Média (mm dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>Vento Médio (m s<sup>-1</sup>)</b>
<b>LAV-01</b>	2009/10	2,01	7,47	2,22
	2010/11	2,26	3,01	2,75
	2011/12	3,10	3,17	3,49
	2012/13	2,93	4,49	2,66
	2013/14	3,13	2,82	2,82
<b>LAV-02</b>	2009/10	2,16	5,12	2,21
	2010/11	2,29	2,88	2,75
	2011/12	3,15	2,57	3,49
	2012/13	2,18	6,51	2,76
	2013/14	2,61	4,75	2,76
<b>LAV-03</b>	2009/10	2,16	5,1	2,22
	2010/11	2,31	3,25	2,71
	2011/12	3,10	3,17	3,49
	2012/13	3,60	2,52	2,65
	2013/14	3,19	2,78	2,83

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Contudo, algumas das variáveis consideradas neste modelo não possuem registro ou histórico, tais quais comprimento da tubulação, altura do levante, eficiência dos equipamentos e lâmina d'água adotada, sendo que estas foram inferidas de acordo com informações obtidas junto ao especialista do IRGA (entrevista, 2016), características geográficas da região e valores típicos observados neste tipo de instalação.

Após uma primeira aproximação, foram realizados pequenos ajustes nas variáveis de forma que o modelo expressasse o consumo das safras o mais corretamente possível.

Quanto às variáveis inferidas, a altura do levante foi definida em **5 m**, enquanto que o comprimento da tubulação utilizado foi **10 m** e perdas de água foi de **1%**, para todas as lavouras. Os demais valores variam de safra para safra e são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Valores arbitrados para a realização dos testes de validação

Consumidor	Safra	Lâmina d'Água (cm)	Eficiência Bomba	Eficiência Motor
<b>LAV-01</b>	2009/10	10	0,8	0,9
	2010/11	4		
	2011/12	1		
	2012/13	1		
	2013/14	6		
<b>LAV-02</b>	2009/10	1	0,84	0,91
	2010/11	5	0,82	0,9
	2011/12	5	0,82	0,9
	2012/13	6	0,82	0,9
	2013/14	4	0,82	0,9
<b>LAV-03</b>	2009/10	9	0,69	0,84
	2010/11	5		
	2011/12	5		
	2012/13	1		
	2013/14	10		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A aplicação da metodologia proposta nesta dissertação como ferramenta de identificação de eficiência energética nas lavouras de arroz irrigado pela concessionária de energia e/ou pelo produtor possibilitará a utilização de todos os

dados fidedignos ao que foi praticado pela safra, trazendo uma resposta ainda melhor nesta etapa.

Na próxima seção são apresentados a modelagem e os resultados dos métodos empregados nessa dissertação, que foram desenvolvidos com base no conjunto de dados apresentados nesta seção.

#### 4.1.2 Padrão de aceitação do modelo

O modelo proposto para estimativa do consumo de energia elétrica da instalação de levante será considerado validado caso cumpra um padrão de aceitação, que foi definido como um erro máximo de **10%** na comparação entre os valores de consumo verificado ( $C_V$ ) e consumo estimado ( $C_E$ ) para os 15 blocos de dados de safras de arroz irrigado disponíveis. O erro, nestes casos, é calculado a partir da Equação (4.1).

$$Erro (\%) = \frac{C_V - C_E}{C_V} \times 100 \quad (4.1)$$

O cálculo do erro entre  $C_V$  e  $C_E$  visa aferir a qualidade da modelagem em refletir o cenário de uma safra de arroz irrigado. Uma vez que passe pelo padrão de aceitação, o modelo proposto nesta dissertação será considerado validado como ferramenta de auxílio para a avaliação de eficiência energética em lavouras de arroz irrigado.

#### 4.1.3 Testes de validação e resultados

A validação ocorre com a inserção dos dados de entrada descritos na seção 4.1.1, sendo realizada a análise comparativa entre o consumo estimado ( $C_E$ ) e o consumo verificado ( $C_V$ ) para cada uma das 15 situações observadas. O  $C_E$  é calculado da mesma forma que o *Consumo Eficiente Estimado* ( $C_{EF}$ ) na Equação (3.8), e representa o produto da variável *Indicativo de Consumo Fuzzy* com o período da safra, em dias, e a potência do motor elétrico, em kW. O difere  $C_E$  e  $C_{EF}$  é que para o primeiro são utilizados os valores reais de eficiência dos equipamentos e de altura da lâmina d'água, enquanto que para o segundo é utilizado o padrão de

eficiência da Tabela 3.21. O modelo Fuzzy é validado com o cumprimento do padrão estabelecido na seção 4.1.2. Os resultados e conclusões da avaliação são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados dos testes de validação

Consumidor	Safra	Período (dias)	Consumo Verificado – $C_V$ (kWh)	Indicativo Consumo Fuzzy	Consumo Estimado – $C_E$ (kWh)	Erro (%)	Conclusão
LAV-01	2009/10	196	56.471,60	0,271	56.504,80	0,06	Estimativa Adequada
	2010/11	199	66.609,80	0,324	68.241,40	2,45	Estimativa Adequada
	2011/12	95	27.220,96	0,344	34.558,51	27,07	$C_V < C_E$
	2012/13	134	40.153,95	0,306	43.398,63	8,08	Estimativa Adequada
	2013/14	103	41.524,30	0,378	41.207,75	-0,76	Estimativa Adequada
LAV-02	2009/10	170	141.070,51	0,255	153.042,84	8,49	Estimativa Adequada
	2010/11	188	42.221,43	0,415	275.441,81	552,38	$C_V < C_E$
	2011/12	92	81.748,09	0,493	158.384,34	93,75	$C_V < C_E$
	2012/13	56	68.514,86	0,339	67.021,11	-2,18	Estimativa Adequada
	2013/14	216	278.677,11	0,364	277.574,17	-0,40	Estimativa Adequada
LAV-03	2009/10	161	52.929,30	0,362	51.474,66	-2,75	Estimativa Adequada
	2010/11	154	21.405,27	0,419	56.989,36	166,24	$C_V < C_E$
	2011/12	95	22.226,05	0,485	40.693,44	83,09	$C_V < C_E$
	2012/13	68	21.952,19	0,476	28.587,42	30,23	$C_V < C_E$
	2013/14	102	46.441,58	0,522	47.025,10	1,26	Estimativa Adequada

Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

A Tabela 4.5 apresenta o resultado de previsão de consumo indicado pelo modelo Fuzzy representado pela variável *Indicativo de Consumo Fuzzy*, o valor de *Consumo Estimado* calculado a partir da Equação (3.8), o *Erro* calculado a partir da Equação (4.1) e a conclusão do teste de validação baseado na descrição da seção 4.1.2.

Algumas situações apresentam consumo estimado muito acima do consumo verificado. Na análise dos dados de consumo destas safras, verificou-se períodos representativos sem consumo de energia elétrica nestas instalações. Na safra 2009/10 da LAV-02, por exemplo, foram 151 dias sem medição de faturamento. Na safra 2010/2011 foram 58 dias de um total de 92 dias sem verificação diária de consumo. O mesmo ocorre nas safras 2009/10 e 2010/11 da LAV-03, com 64 e 33 dias sem verificação de consumo, respectivamente. Como este não é o padrão de consumo deste tipo de instalação, para estas situações a conclusão é de que, provavelmente, houve uma falha no sistema de faturamento ou uma interrupção do atendimento pela concessionária.

Nas safras 2011/12 da LAV-01 e 2012/13 da LAV-03 não foram identificados problemas de medição de consumo. Entretanto, o valor verificado ficou abaixo da expectativa de consumo calculado pelo método. Nestes casos, o período dos dados de consumo cedidos não abrange uma safra completa, o que restringe a análise, pois a lavoura pode estar inundada e com nível alto no início do período observado ou, ainda, ter ocorrido uma grande reposição de água logo após o fim da observação.

Outra explicação possível, nestes casos, é de que uma outra fonte de energia foi utilizada para o atendimento de uma parcela hídrica da lavoura, ou ainda, pode ter ocorrido alguma ligação fraudulenta ou clandestina.

Todavia, na maioria das safras foi verificada a estimativa de consumo muito próxima ao valor real consumido, com erro médio de 2,94%. Conclui-se que o modelo apresentado possui boa capacidade de estimar o valor de consumo real destas safras.

## 4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ÀS SAFRAS REAIS

Com o método baseado na lógica Fuzzy considerado validado, realizou-se a aplicação da metodologia para as mesmas lavouras e os conjuntos de dados já descritos na seção 4.1.1.

Para a avaliação de eficiência energética das safras utilizou-se a comparação do consumo verificado ( $C_V$ ) com o consumo eficiente ( $C_{EF}$ ) calculado a partir da Equação (3.8) com a inserção dos parâmetros eficientes da Tabela 3.21. Desta comparação é possível mensurar a energia passível de economia ( $E_{PE}$ ), a partir da

Equação (3.9), a possibilidade de melhoria em eficiência (PME), através da Equação (3.10), o Nível de Eficiência considerado para a safra (Instalação Eficiente, Ineficiência Média ou Ineficiência Grande) e a possibilidade de ocorrência de perdas não técnicas (Possibilidade PNT). A análise de eficiência das safras observadas é apresentada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Análise de eficiência energética das safras reais

	Safra	Ind. Con. Fuzzy	$C_V$ (kWh)	$C_{EF}$ (kWh)	$E_{PE}$ (kWh)	PME (%)	Nível Eficiência
L	2009/10	0,180	56.471,60	37.530,86	18.940,74	33,54	Ineficiência Grande
A	2010/11	0,306	66.609,80	64.450,21	2.159,59	3,24	Instalação Eficiente
V	2011/12	0,334	27.220,96	33.583,03	-	-	Possibilidade PNT
-	2012/13	0,280	40.153,95	39.711,17	442,78	1,10	Instalação Eficiente
0	2013/14	0,322	41.524,30	35.102,89	6.421,41	15,46	Ineficiência Média
L	2009/10	0,249	141.070,51	149.441,83	-	-	Instalação Eficiente
A	2010/11	0,339	42.221,43*	224.999,45	-	-	Possibilidade PNT
V	2011/12	0,380	81.748,09*	122.081,23	-	-	Possibilidade PNT
-	2012/13	0,219	68.514,86	43.296,83	25.218,04	36,81	Ineficiência Grande
0	2013/14	0,309	278.677,11	235.633,02	43.044,10	15,45	Ineficiência Média
L	2009/10	0,215	52.929,30	30.571,97	22.357,34	42,24	Ineficiência Grande
A	2010/11	0,299	21.405,27*	40.667,83	-	-	Possibilidade PNT
V	2011/12	0,330	22.226,05*	27.688,32	-	-	Possibilidade PNT
-	2012/13	0,338	21.952,19	20.299,47	1.652,72	7,53	Instalação Eficiente
0	2013/14	0,316	46.441,58	28.467,30	17.974,28	38,70	Ineficiência Grande
3							

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

O consumo eficiente estimado é calculado de acordo com a Equação (3.8) e utiliza os valores de Indicativo de Consumo Fuzzy presentes na Tabela 4.6. O distanciamento entre consumo verificado ( $C_V$ ) e o consumo eficiente estimado ( $C_{EF}$ ) indicam a possibilidade de economia de energia para as distintas safras avaliadas e definem o nível de eficiência da safra, conforme padrão definido na Tabela 3.22.



Merecem atenção especial as safras que apresentaram elevado grau de ineficiência, sendo classificadas como “Ineficiência Grande”, como os casos da safra 2009/10 da LAV-01, safra 2012/13 da LAV-02 e safras 2009/10 e 2013/14 da LAV-03.

No caso da LAV-01, em particular, a safra de 2009/10 apresentou consumo elevado em relação à necessidade estimada para a lavoura. Foram quase 19.000 kWh desperdiçados, ou 33,54% do total consumido que poderiam ser economizados, conforme estimativa. Na safra 2012/13 da LAV-02 foram mais de 25.000 kWh de desperdício, representando 36,81% do total consumido. Na LAV-03, ocorreram grandes ineficiências em dois momentos, nas safras de 2009/10 e 2013/14, com valores próximos a 40% em ambos os casos.

Todas as situações citadas merecem uma investigação prioritária para determinar os motivos que ocasionaram estes consumos elevados. Uma grande possibilidade é a adoção de níveis elevados de lâmina d’água, com uso indiscriminado do bombeamento mesmo com a lavoura cheia. Nestes casos cabe a proposta de substituição dos equipamentos do sistema de levante e a adoção de um sistema de automação da irrigação.

Para as safras 2013/14 de LAV-01 e LAV-02 foram verificados patamares médios de ineficiência, com montantes de 6.421,41 kWh e 43.044,10 kWh, respectivamente, ou pouco mais de 15% sobre o total consumido pelas lavouras. Estas safras são classificadas como “Ineficiência Média” e também merecem uma investigação de causa deste consumo acima do esperado, porém com prioridade secundária em comparação com as safras anteriores.

Para as safras de 2010/11 e 2012/13 da LAV-01 e 2012/13 de LAV-03 foram verificados patamares menores de desperdício de energia elétrica, com 3,24%, 1,10% e 7,53%, respectivamente. Estes são considerados valores aceitáveis e dentro da margem de imprecisão do modelo. Não justificam, portanto, um investimento em eficiência, aconselhando-se a observância e continuidade das práticas de manejo da água.

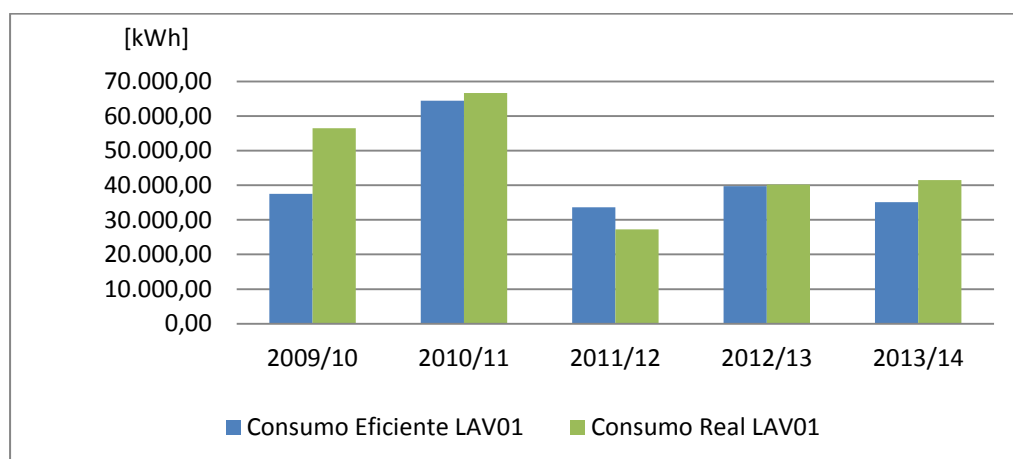
O mesmo se dá para a safra 2009/10 da LAV-02, que apresentou consumo verificado um pouco abaixo do consumo eficiente, cerca de 5,93%. Visto que este é um percentual dentro da faixa de imprecisão do método, conclui-se que esta safra foi eficiente.

Nas safras 2010/11 e 2011/12 de LAV-02 e LAV-03, já destacadas com problemas na medição do consumo, a aplicação do método prevê o consumo verificado ( $C_V$ ) abaixo do consumo eficiente ( $C_{EF}$ ). Logo, aplicando a metodologia proposta, estas safras são indicadas com Possibilidade de Perdas Não Técnicas. O mesmo se conclui para a safra 2011/12 de LAV-01, que mesmo não apresentando problemas aparentes no faturamento, registrou  $C_V$  abaixo do  $C_{EF}$ .

Na safra 2012/13 de LAV-03, onde inicialmente foi verificado um  $C_V$  inferior a estimativa de consumo, na avaliação de eficiência energética não houve o indício de perda não técnica, pois o consumo eficiente mostrou-se inferior ao consumo verificado no período. Desta forma, concluiu-se que esta safra apresenta nível satisfatório de eficiência, pois o consumo ainda poderia ser reduzido em 7,53%. Ressalva-se que para este caso particular houve um período de observação inferior ao período característico de uma safra, o que pode ter contribuído para o distanciamento inicial dos valores de consumo na etapa de validação.

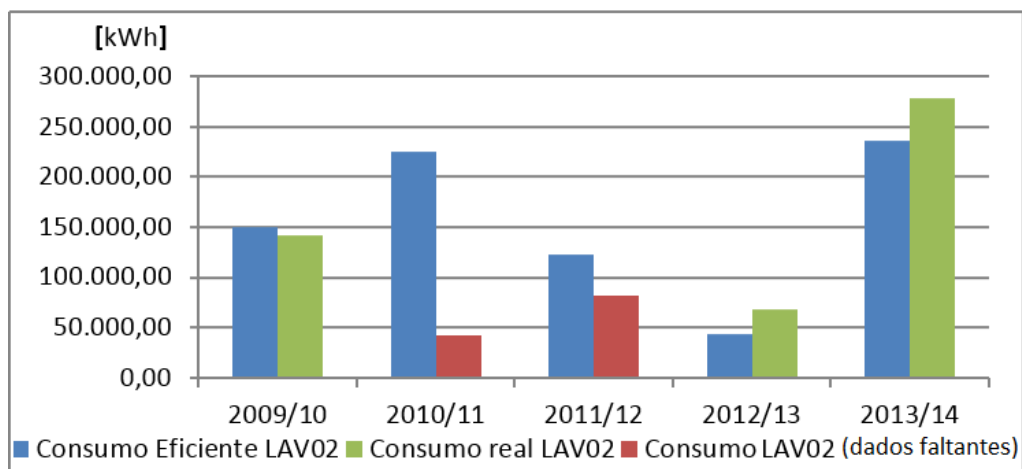
Os gráficos das Figuras 4.4 a 4.6 apresentam uma comparação visual da análise de eficiência realizada nesta seção. As safras verificadas com problemas de faturamento foram destacadas em vermelho.

Figura 4.4 – Análise de eficiência energética da lavoura LAV-01



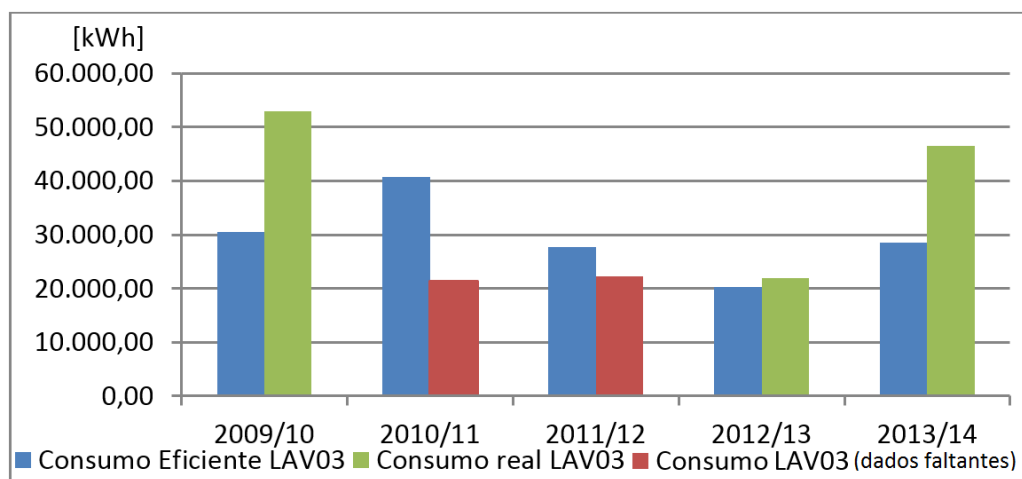
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 4.5 – Análise de eficiência energética da lavoura LAV-02



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 4.6 – Análise de eficiência energética da lavoura LAV-03



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Pode-se afirmar, de forma geral, que a possibilidade de melhoria em eficiência depende das instalações e dos rendimentos individuais dos equipamentos. Contudo, nestes casos, são as práticas de irrigação adotadas pelos produtores que têm maior influência no consumo de energia elétrica. Isto fica demonstrado pela variação de eficiência apresentado de safra para safra dentro de cada lavoura.

A partir da análise realizada, conclui-se que uma parte fixa da baixa eficiência no consumo da energia elétrica vem das ineficiências dos equipamentos, e uma outra carga de ineficiência é acrescentada pela forma de manejo da água pelo produtor, sendo nestes casos uma técnica manual e variável.

É indicado, portanto, para as situações de ineficiência grande e média constatadas, a realização de uma auditoria de eficiência energética, com a atenção aos seguintes pontos:

- Inspeção da bomba para verificar a ocorrência de incrustações e depósitos de lodo, com lubrificação e limpeza quando aplicável;
- Inspeção da bomba, com substituição em caso de rotor danificado;
- Inspeção do motor, limpeza e lubrificação para redução da temperatura de operação;
- Inspeção do motor, com substituição em caso de motor reconicionado, obsoleto ou sobredimensionado;
- Inspeção das tubulações, com reparo de possíveis pontos de vazamento;
- Estudo para automatização do controle de nível da lavoura.

Dentre estes, a automatização do nível da lavoura apresenta a alternativa que traria melhores retornos em eficiência energética, pois a maior parte das perdas de energia ocorreu devido a fatores humanos de acordo com os resultados obtidos. Em uma lavoura automatizada, o sistema de levante opera apenas quando há a real necessidade hídrica na lavoura.

#### 4.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA A UMA SAFRA HIPOTÉTICA

Esta seção pretende demonstrar a aplicação da metodologia e o funcionamento do método Fuzzy proposto. Para isto, são utilizados valores de uma lavoura hipotética e realizadas variações das variáveis de entrada de forma a ser possível perceber as variações de consumo estimado na saída. O critério para escolha dos valores iniciais para esta simulação, apresentados na Tabela 4.7, é de utilizar valores típicos de uma lavoura de arroz irrigado, mas distintos daqueles das lavouras reais, de forma a variar os conjuntos de dados testados pelo método.

Tabela 4.7 – Valores utilizados para teste de aplicação da metodologia

<b>Variável de Entrada</b>	<b>Valor</b>
Evaporação	2,50 mm dia <sup>-1</sup>
Precipitação	4,25 mm dia <sup>-1</sup>
Vel. Média do Vento	2,75 m s <sup>-1</sup>
Área Irrigada	100 ha
Altura Lâmina d'Água	5 cm
Permeabilidade Média do Solo	4 mm dia <sup>-1</sup>
Altura do Levante	20 m
Comprimento da Tubulação	30 m
Eficiência da Bomba	65%
Eficiência do Motor	85%
Vazamentos Tubulação	3%
Período da Safra	120 dias
Potência Nominal Motor	44,1 kW

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para este cenário, verificou-se uma estimativa de consumo de 70.870,46 kWh durante o período. Na comparação com o consumo “eficiente” utilizando o mesmo padrão de variáveis eficientes descritas na Tabela 3.21, verifica-se os índices de eficiência apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Índices de eficiência da lavoura hipotética

<b>Índice</b>	<b>Valor</b>
Consumo Previsto	70.870,46 kWh
Consumo Eficiente Previsto	43.563,74 kWh
Energia Passível de Economia	27.306,72 kWh
Possibilidade de Melhoria em Eficiência	38,53%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Desta forma, a lavoura hipotética é classificada como *Ineficiência Grande*, com 38,53% de ineficiência e cerca de 27.306,72 kWh passíveis de serem economizados através da melhoria das condições da instalação de levante e das práticas de manejo da água.

#### 4.4 VERIFICAÇÃO DA SENSIBILIDADE ÀS VARIAÇÕES DE ENTRADA

Para a verificação da coerência de funcionamento, todas as variáveis foram alteradas para patamares de +10%, +50%, -10% e -50% em relação aos valores da Tabela 4.7, mantendo-se as demais inalteradas. A expectativa nestes casos é de que o modelo identifique estas variações e que se percebam alterações no consumo estimado. Os valores de consumo estimado verificados neste teste são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Consumo Estimado de acordo com a variação das entradas

Variável Alterada	Consumo Estimado (kWh)			
	-50%	-10%	+10%	+50%
Evaporação	50.168,16	65.155,10	73.918,66	83.190,24
Precipitação	84.206,30	72.267,55	68.711,33	57.788,64
Vel. Média do Vento	53.724,38	67.060,22	70.870,46	82.936,22
Área Irrigada	66.933,22	69.981,41	72.013,54	78.236,93
Altura Lâmina d'Água	67.441,25	68.838,34	74.045,66	79.125,98
Permeabilidade Média do Solo	64.139,04	69.219,36	74.426,69	78.236,93
Altura do Levante	69.727,39	70.870,46	70.870,46	71.759,52
Comprimento da Tubulação	69.727,39	70.870,46	70.870,46	71.759,52
Eficiência da Bomba	77.601,89	71.632,51	69.727,39	63.504,00
Eficiência do Motor	77.601,89	71.759,52	68.965,34	63.504,00
Vazamentos Tubulação	68.711,33	70.870,46	70.870,46	71.632,51

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os valores verificados neste teste comprovaram uma coerência no funcionamento do método, mesmo que não comprovem sua precisão. De modo

geral, verifica-se que variações de 10% no valor da variável são capazes de provocar alterações na estimativa de consumo, exceto nas variáveis *velocidade média do vento*, *altura do levante*, *comprimento da tubulação* e *perdas de água por vazamentos*. Isto demonstra a sensibilidade do modelo desenvolvido frente a pequenas variações das variáveis de entrada.

Verifica-se que as variáveis meteorológicas provocam grande impacto na estimativa de consumo. O conjunto de regras foi criado com este intuito, visto que na prática estas variáveis influenciam fortemente a demanda hídrica da lavoura.

Outras variáveis como *permeabilidade média do solo*, *área irrigada* e *altura da lâmina d'água* também demonstraram forte relação com a necessidade de irrigação da lavoura, sendo refletido em grandes variações no consumo calculado. Já as variáveis que expressam os rendimentos dos equipamentos, *eficiência da bomba* e *eficiência do motor*, possuem relação direta com o consumo de energia e também tiveram valores impactantes na estimativa de consumo final da safra.

Uma vez que as variáveis meteorológicas não são manipuláveis, destaca-se a altura da lâmina d'água e os rendimentos da bomba e do motor como principais pontos de ação para melhoria de eficiência no consumo da energia elétrica do sistema de levante.

Quanto às variáveis menos sensíveis, *altura do levante*, *comprimento da tubulação* e *perdas de água por vazamentos*, conclui-se que estas influenciam no consumo de energia elétrica em uma escala mais branda que as demais, segundo este modelo.

Com a realização da aplicação da metodologia e a avaliação da capacidade de percepção do modelo proposto frente às variações das entradas, considera-se satisfatória a resposta verificada nestes testes. A seguir são realizadas as considerações finais desta dissertação.





## 5 CONCLUSÕES

Esta dissertação abordou a eficiência energética no consumo de energia elétrica para sistemas de levante de água para o cultivo do arroz irrigado. Esta dissertação foi motivada por dois principais aspectos: a baixa eficiência característica deste tipo de consumo, pesando no lado financeiro, e a falta de ferramentas para diagnóstico destas situações, originadas principalmente pela utilização de equipamentos precários, obsoletos e mal dimensionados e de técnicas antiquadas de manejo da água.

O objetivo geral da dissertação foi desenvolver uma metodologia que possibilitasse a avaliação da eficiência energética nas instalações de irrigação de lavouras de arroz, baseada em informações da lavoura, dados meteorológicos e características do sistema de levante.

Para atingir o objetivo geral, a metodologia proposta foi baseada em Lógica Fuzzy, utilizando dois níveis de inferência. Esta escolha possibilitou a compreensão de onze variáveis de entrada – área irrigada, nível de lâmina d'água, permeabilidade do solo, precipitação, evaporação, velocidade do vento, altura do levante, comprimento da tubulação, eficiência da bomba, eficiência do motor e perdas de água por vazamentos –, de forma que a modelagem da lavoura pôde ser abordada de uma maneira mais completa. A escolha e a interpretação destas variáveis pela lógica Fuzzy (*fuzzyficação*) são parte da contribuição pioneira desta metodologia.

A escolha da lógica Fuzzy para modelar o sistema ocorreu, fundamentalmente, devido a sua ampla e documentada aplicação nas mais diversas áreas, ao seu poder de traduzir o conhecimento empírico, característico neste tema, para um formato computacional e à possibilidade de se trabalhar com variáveis de diversas unidades e grandezas em um mesmo nível de análise. Todas estas características agregadas à realização de inferência Fuzzy em dois níveis simplificaram o problema, permitindo a análise simultânea de uma grande quantidade de entradas.

A metodologia proposta nesta dissertação traz como fim uma avaliação da eficiência do sistema de irrigação, baseado em uma expectativa de consumo eficiente calculada a partir do modelo Fuzzy proposto. Com o emprego da Lógica Fuzzy foi possível obter uma modelagem que apresentou boa resposta em relação

aos valores de consumo de energia elétrica verificados e os valores estimados durante os ensaios de validação realizados com dados de lavouras reais localizadas no Rio Grande do Sul.

Nos testes executados com os mesmos conjuntos de dados das lavouras reais, foi possível aplicar a metodologia integralmente e identificar aquelas safras que tiveram problemas de abastecimento ou de faturamento de energia elétrica, aquelas que tiveram bons níveis de eficiência e aquelas em que ocorreram condições ineficientes que levaram a um consumo superior ao necessário pela lavoura.

De acordo com a análise de eficiência energética realizada, conclui-se que o ponto de maior desperdício de energia elétrica foi o controle precário do nível da lâmina d'água. Na observação de cinco safras consecutivas, não foi verificado um padrão de eficiência energética para cada lavoura, mesmo com a utilização dos mesmos equipamentos para o levante em ambas safras. As safras 2010/11 e 2012/13 da LAV-01, 2009/10 da LAV-02 e 2012/13 da LAV-03, por exemplo, apresentaram resultados de consumo verificado próximos ao padrão de eficiência testado. As safras 2009/10 da LAV-01, 2012/13 da LAV-02 e 2009/10 e 2013/14 da LAV-03, por sua vez, demonstraram grandes possibilidades de economia de energia elétrica. Atribui-se, portanto, a grande variabilidade observada no nível de eficiência das lavouras aos diferentes níveis de lâmina d'água adotados de uma safra a outra, e às possíveis perdas laterais provenientes desta prática.

A aplicação da metodologia proposta nesta dissertação também ocorreu com um conjunto de dados de uma safra hipotética e conhecidamente ineficiente. O método foi capaz de identificar sua ineficiência, calculando inclusive a possibilidade de melhoria em relação a um padrão de lavoura eficiente. O modelo também apresentou capacidade de perceber variações das entradas, indicando alterações de consumo estimado com pequenas alterações provocadas nestas variáveis.

Cabe ressaltar que foram utilizadas as normais do Estado do Rio Grande do Sul como base para a parametrização das entradas meteorológicas e que para análise de lavouras localizadas em outras regiões uma adequação dos parâmetros de *fuzzyficação* destas variáveis se faz necessária. Além disto, algumas variáveis não foram consideradas na modelagem, como perdas por transbordamento, eficiência do acoplamento motor–bomba e desnível do terreno, entre outras, as quais podem justificar variações encontradas entre consumo estimado e consumo

verificado na etapa de validação. Estas apresentam-se como pontos de melhoria em trabalhos futuros.

A metodologia proposta pode ser utilizada como ferramenta de apoio a decisão da priorização de investimentos dos recursos do Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Distribuição (PEE). Isto porque traz a vantagem de não ser necessário profundo conhecimento da instalação, nem a necessidade de inspeção de todas as propriedades rurais, para a realização de um primeiro cálculo de eficiência das lavouras candidatas a receber o investimento, e classificação destas quanto aos critérios da companhia (seja priorizando as de maior retorno financeiro, as de maior redução de consumo, ou as mais ineficientes). Também pode ser utilizada como ferramenta de avaliação de eficiência energética em uma auditoria de eficiência a partir do interesse do proprietário, com a possibilidade de diagnóstico tanto no nível de eficiência da lavoura quanto na possibilidade de retorno dos pontos de melhoria levantados.

Embora não tenha sido dada ênfase nesta dissertação, a metodologia proposta pode ser empregada como ferramenta de identificação de Perdas Não Técnicas nas unidades consumidoras pela companhia de distribuição. Nos casos em que o consumo faturado é inferior ao consumo eficiente para o padrão de lavoura analisado, um indicativo de possibilidade de perdas não técnicas é gerado. Nestas situações, é aconselhada uma avaliação mais aprofundada, que vai desde a verificação de ocorrências de falhas no sistema de medição e faturamento, até o deslocamento de uma equipe para a inspeção local da unidade consumidora e para correção de eventuais fraudes ou ligações elétricas não previstas.

Destaca-se, por fim, que essa dissertação apresenta pioneirismo no estudo de eficiência energética em consumidores com sistemas de levante para irrigação de lavouras de arroz. Isso é constatado pela ausência de publicações técnicas sobre o tema. Nesse sentido, a metodologia aqui proposta pode ser considerada promissora, e com possibilidade de ser melhorada, considerando as sugestões de continuidade apresentadas a seguir.

## **Sugestões de continuidade**

Com o objetivo de melhorar o desempenho da metodologia proposta, são sugeridas as seguintes possibilidades de continuidade do trabalho:

- Utilizar um método estatístico de correlação para seleção das variáveis meteorológicas, de acordo com aquelas disponibilizadas pelo INMET;
- Considerar variáveis meteorológicas não utilizadas neste primeiro momento, inclusive desmembrando a variável evaporação em pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar;
- Considerar pesos diferentes para as variáveis meteorológicas conforma o estágio fenológico da safra;
- Ampliar o conjunto de variáveis de entrada com características da lavoura e da instalação de levante não consideradas neste primeiro modelo, como eficiência do acoplamento motor-bomba, perdas laterais e por transbordamentos, desníveis encontrados na lavoura;
- Ampliar os testes de validação, buscando conjuntos completos de dados de lavouras de outras regiões;
- Melhorar a sintonia do modelo Fuzzy através da manipulação dos conjuntos de regras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AES SUL; **Experiência da AES Sul nos Projetos de Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**; Seminário: Diretrizes para Comissões de Conservação de Água e Energia; ABAE: Associação Brasileira de Água e Energia; Porto Alegre, 2006.

AES SUL, **Projetos de Eficiência Energética 2009**, Web: [https://www.aessul.com.br/site/uploads/Audiencia\\_Publica\\_Internet\\_EE\\_Marco\\_2010.pdf](https://www.aessul.com.br/site/uploads/Audiencia_Publica_Internet_EE_Marco_2010.pdf), Divulgação: 2010, Acesso em 22/07/2016.

AES SUL, **Projetos de Eficiência Energética 2012**, Web: [https://www.aessul.com.br/site/uploads/audiencia\\_publica\\_2013-eficiencia-energetica.pdf](https://www.aessul.com.br/site/uploads/audiencia_publica_2013-eficiencia-energetica.pdf), Divulgação: 2013, Acesso em 22/07/2016.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Resolução Normativa 414/2010**; Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>; Acesso em: 22/07/2016; Brasília: 2010.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE**, Web: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/zip/propeev1.zip>. Acesso em 22/07/2016. a.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Principais Informações Sobre o Programa de Eficiência Energética**, Web: <http://www.aneel.gov.br/documents/656831/14930475/Principais+informa%C3%A7%C3%B5es+sobre+o+programa+de+Efici%C3%Aancia+Ener%C3%A9tica/e07ab5a6-57d2-4f37-ae53-8112a096fd50>. Acesso em 22/07/2016. b.

ARNS, R; **Racionalização do Uso de Energia Elétrica em Bombeamentos de Arrozais na Fronteira-Oeste do Rio Grande do Sul**; Revista Lavoura Arrozeira; vol. 48, n. 418, p. 14-17, Porto Alegre: 1995.

BEHRENS, J; **Automação da Irrigação de Lavouras de Arroz para Melhoria da Eficiência Energética**; XXIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia; Alegrete: 2014.

BELOHLAVEK, R.; KLIR, G. J.; LEWIS III, H. W.; WAY, E. C. **Concepts and Fuzzy Sets: Misunderstandings, Misconceptions and Oversights**. International Journal of Approximate Reasoning, v. 51, p. 23 – 34, 2009.

BORTONI, E. C.; HADDAD, J; YAMACHITA, R. A.; et. Al.; **Eficiência Energética: Teoria e Prática**, Fupai, Unifei, PROCEL/Eletronbras, Itajubá: 2007.

BORTONI, E. C.; SANTOS, A. H.; Acionamentos com Motores de Indução Trifásicos; In: **Conservação de Energia – Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**; 3ª Ed.; Itajubá: 2016.ELETROBRAS, **Resultados PROCEL 2016 – Ano Base 2015**. Web: [http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2016/docs/rel\\_procel2016\\_web.pdf](http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2016/docs/rel_procel2016_web.pdf). Disponível em 2016; Acesso em 19/11/2016.

BRANCALIONI, A. R. **Proposta de Classificação da Gravidade do Desvio Fonológico por Meio da Modelagem Fuzzy Segundo o Modelo Implicacional de Complexidade de Traços**. dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2010.

CAVALCANTI, L. F.; LUCIANO, B. A.; **Análise da Viabilidade Técnica/Econômica da Utilização de Transformadores com Núcleo Amorfo em Redes Rurais de Distribuição de Energia, Classe 15 kV**; I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica: Anais, Brasília: 2001.

CHAUHAN, A.; RAJVANSHI, S.; **Non-Technical Losses in power system: A review**; 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), Dindigul: 2013.

CHEN, G.; PHAM, T. T. **Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001. 316 p.

CIRSTEA, M. N.; DINU, A.; KHOR, J. G.; McCORMICK, M. **Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems**. Oxford: Newnes, 2002. 400 p.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento; **A Cultura do Arroz**; Brasília: CONAB, 2015. 180 p.

CORREA, N. I.; **Consumo de Água na Irrigação de Arroz por Inundação**; Revista Lavoura Arrozeira; v. 50; n. 432; p. 3-8; Porto Alegre: 1997.

COSTA, J. M.; OLIVEIRA FILHO, D.; TEIXEIRA, C. A.; **Adequação de Força Motriz – Estudo de Caso na Fabricação de Papel Reciclado**; In Congresso Latino-Americano de Distribuição de Energia Elétrica CONCLADIS; 3ª ed.; São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998. p. 561-564.

COX, E. **The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems**. Londres: Academic, 1999. 176 p.

DE DATTA, S. K.; **Principles and Practices of Rice Production**. Los Baños, Filipinas: John Wiley & Sons, 1981. 619 p.

DENG, N.; et. al.; **Influence of Temperature and Solar Radiation on Grain Yield and Quality in Irrigated Rice System**; European Journal of Agronomy; n. 64; p. 37-46; 2015.

EL-HAWARY, M. E. **Electric Power Applications of Fuzzy Systems**. Piscataway: IEEE Press, 1998. 341 p.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; **Cultivo do Arroz Irrigado no Brasil, Manejo da Água em Arroz Irrigado**; Disponível em <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Arroz/ArrozIrrigadoBrasil/cap10.htm#drenagem>; Divulgação: 2005; Acesso em 22/07/2016.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; **Sistemas de Cultivo do Arroz**; Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000g1wcnzza02wx5ok0ha2lipwbeel46.html>; Acesso em 30/07/2016.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética; **Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2014 – 2023)** - Nota Técnica; Rio de Janeiro: 2014.

EVALDT, M. C.; UBERTI, V. A.; ABAIDE, A. R.; PFITSCHER, L. L.; BERNARDON, D. P.; FIGUEIREDO, R. M.; **Detecting of Non-Technical Losses in Rural Feeders Using Artificial Neural Networks**; 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2015); Stoke-on-trent: 2015.

FREEMAN, L.; MARSHALL, M.; WALLING R.; WEISS, J.; **Loss Characteristics of Local Delivery Distribution Systems**; 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Praga: 2009.

GARG, B.; BEG, M. M.; ANSARI, A. Q.; **Fuzzy Time Series Model to Forecast Rice Production**; IEEE International Conference on Fuzzy Systems; 2013.

GUIMARÃES, R; **Comportamento Elétrico, Mecânico e Hidráulico de um Sistema de Bombeamento Sob o Enfoque da Eficiência Energética**; dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia; Uberlândia: 2008.

HADDAD, J.; GAMA, P. H.; GUARDIA, E. C.; **Tarifação de Energia Elétrica**; In: Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações, 3ª Ed., Fupai, Unifei, PROCEL/Eletrobras, Itajubá: 2006.

HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A.; GUARDIA, E. C.; PORTO, L.; LEONELLI, P.; CRUZ, P.; **Caso Prático de Eficiência Energética em uma Edificação Pública: Projeto, Implementação e Análise do Resultado**; In: GOMES, H. P.; Sistema de Saneamento: Eficiência Energética; João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2010; pg. 325-332.

HE, Y.; ZHOU, Z.; et. al.; **Statistical Relationship Between Climatic Factors Changes and Rice Production at Agro-Subzone and Nationwide Levels Based on Remote Sensing and GIS**; Fifth International Conference on Agro-Geoinformatics; Tianjin, 2016.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; **Censo Agropecuário 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação**; Brasil: IBGE, 2006.

IEA, International Energy Agency; **Energy Efficiency Governance – Handbook**, 2ª Ed., Paris: OECD/IEA, 2010.

IEA, International Energy Agency; **Energy Efficiency Market Report 2015: Market Trends and Medium-Term Prospects**; Paris: OECD/IEA, 2015.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia; **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**; Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa>; Acesso em: 01/07/2016.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia; **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**; Disp.: [www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas); Acesso em: 23/10/2016.

IRGA Instituto Rio Grandense do Arroz; **Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa Para o Sul do Brasil**. Porto Alegre: 2011. 128 p.

IRGA, Instituto Rio Grandense do Arroz; **Censo da Lavoura de arroz irrigado do Rio Grande do Sul - Safra 2004/05**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/index.php?principal=1&secao=999&id=124&menu=124&key=3>. Divulgação: 2006; Acesso em 10/09/2016.

IRGA, Instituto Rio Grandense do Arroz; **Custo de Produção Médio Ponderado Arroz Irrigado Rio Grande do Sul Safra 2015/16 Projeção**; Instituto Rio Grandense do Arroz; Governo do Estado do Rio Grande do Sul: 2016.

JAWAD, F.; et. al.; **Analysis of Optimum Crop Cultivation Using Fuzzy System**; IEEE Lausanne Power Tech, 2007.

JOHNSON, L. M.; **More Farm Power for More Days of Farm Production per Year**; In: National Convention of Pump Irrigators; Manila: 1965.

KAYA, D; et. al.; **Energy Efficiency in Pumps**; Energy Conversion and Management, n. 49, pg. 1662-1673, 2008.

KAZEMI, H.; **Energy Balance in Modern Agroecosystems - Why and How**; Agricultural Research & Technology; Vol. 1; Issue 5; 2016.

KOPP, L. M.; **Índices de Desempenho para Estações de Bombeamento em Lavouras de Arroz Irrigado**; Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola; Universidade Federal de Santa Maria; 2015.

KRUPNIK, T. J.; et. al.; **Productivity and Farmers' Perceptions of Rice-Maize System Performance Under Conservation Agriculture, Mixed and Full Tillage, and Farmers' Practices in Rainfed and Water-Limited Environments of Southern Bangladesh**; 6th World Congress on Conservation Agriculture, Winnipeg: 2014.

KSB; **Folheto de Curvas Características Bomba Padronizada Para Uso Geral**; Frankenthal: KSB Aktiengesellschaft, 2013.



LIANG, G.; WANG, M. **A Fuzzy Multi-Criteria Decision Method for Facility Selection**. International Journal of Production Research, v. 29, nº11, p. 1313 – 1330, 1991.

LOBELL, D.; BURKE, M.; **On the Use of Statistical Models to Predict Crop Yield Responses to Climate Change**; Agricultural and Forest Meteorology; v. 150; n. 11; p. 1443-1452; 2010.

LONGZHU, G.; SHENGMIN, P.; ZHENGXUN, J.; **Exploratory Factor Analysis on Characteristic Indexes of Rice-irrigated Management Zones**; Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery; Tianjin: 2009.

MARCOLAN, A. L.; et. al.; **Sistema de Produção de Arroz de Terras Altas**; 4ª Ed.; Porto Velho: Embrapa, 2008.

MOISES, N. D.; **Energia Elétrica para Irrigação do Arroz na Área da CELETRO**; dissertação de Mestrado em Energia, Ambiente e Materiais; 96 fls.; Universidade Luterana do Brasil; Canoas: 2009;

MONACHESI, M. G.; MONTEIRO, M. A. G.; **Eficiência Energética de Sistemas de Bombeamento: Manual Prático**; Brasília: Eletrobrás/Procel, 2005.

MOREIRA, S. G. **Estratégias de simulação para análise da eficiência energética em sistema de bombeamento monitorado via supervisor**. dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica; Universidade Federal do Mato Grosso do Sul; Campo Grande: 2008.

NASSIRI, S. M.; SINGH, S.; **Study on Energy Use Efficiency for Paddy Crop Using Data Envelopment Analysis (DEA) Technique**; Applied Energy Journal; nº 86; pg 1320-1325; 2009.

NOGUEIRA, L. A. H., **Energia: Conceitos e Fundamentos**; In: Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações; 3ª Ed.; Fupai, Unifei, PROCEL/Eletobras; Itajubá: 2006.

OCÁCIA, G.; DUARTE, H.; MARTINS, F.; HERMANO, L.; BIANCHI, A.; **Uso Racional de Energia em Estações de Bombeamento de Água para Irrigação de Arroz**; 4º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – AGRENER; Campinas: 2002.

ORTEGA, N. R.; **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina**; Tese de Doutorado; São Paulo: 2001.

OWEIS, T.; ZHANG, H.; **Water-use Efficiency: Index for Optimising Supplemental Irrigation of Wheat In Water Scarce Areas**; Journal of Applied Irrigation Science; Ed. 33, Vol. 2; pg 321-336; 1998.

PANDE, H. K.; MITTRA, B. N.; **Response of Lowland Rice to Varying Levels of Soil, Water, and Fertility Management in Different Seasons**; Agronomy Journal; v. 62; n. 2; p. 197-200; Madison: 1970.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. - IEEE Press Series of Engineering, 2007. 526 p.

PFITSCHER, L. L.; BERNARDON, D. P.; KOPP, L. M.; FERREIRA, A. A.; HECKLER, M. V.; RITTER, J. G.; THOMÉ, B. A.; MONTANI, P. D.; FAGUNDES, D. R.; **Energy Saving Technology on Irrigation System for Rice Cropping**; 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC); Soest: 2011.

PINTO, L. F. S.; NETO, J. A. L.; PAULETTO, E. A.; **Solos de Várzea do Sul do Brasil Cultivados com Arroz Irrigado**. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M., ed. **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.75-95.

POSSELT, E. L.; **INFUZZY – Ferramenta para Desenvolvimento de Aplicações de Sistemas Difusos**. dissertação de Mestrado. Santa Cruz do Sul, 2011.

PRATAMA, S. W.; NHITA, F.; ADIWIJAYA; **Implementation of Local Regression Smoothing and Fuzzy-Grammatical Evolution on Rainfall Forecasting for Rice Planting Calendar**; 4<sup>TH</sup> International Conference on Information and Communication Technologies; 2016.

RAD, M. B.; MOGHADAM, M. P.; SHEIKH-EL-ESLAMI, M. K.; **Fuzzy Evaluation of Energy Efficiency Improvement Impact on Load Shape**; IEEE Lausanne Power Tech, 2007.

REZENDE, S. B.; **Levantamento de Solo e Uso Atual, Erosão e Cobertura Vegetal de Três Microbacias no Vale do Rio Turvo Sujo com a Utilização de Aerofotos Não-Convencionais**; Viçosa: UFV, 1986. 13 p.

RIBEIRO, S. S.; CAZES, T.; MANO, R. F.; MAIA, D.; **Investment Optimization Methodology Applied to Investments on Non-Technical Losses Reduction Actions**; IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC); Capadócia: 2012.

RITTER, J.; **Eficientização de Estações de Bombeamento em Lavouras de Arroz na Fronteira-Oeste do Rio Grande do Sul**; Trabalho de Conclusão de Curso de Agronomia, Campus Itaquí, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA); 2011.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic, With Engeneering Applications**. 3<sup>a</sup> ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 607 p.

SAFFI, L. A.; WARTCHOW, D.; ANTONINI, N. A.; **Redução do Consumo de Energia Elétrica em um Sistema de Abastecimento de Água Mediante a Utilização de Variador de Frequência em Sistemas de Bombeamento**; In: GOMES, H. P.; **Sistema de Saneamento: Eficiência Energética**; João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2010; pg. 165-177.

SANDRI, S.; CORREA, C. **Lógica Nebulosa**. V Escola de Redes Neurais. São José dos Campos, 1999. p. 73 – 90.

SICAT, R. S.; CARRANZA, E. J.; NIDUMOLU, U. B.; **Fuzzy Modeling of Farmers' Knowledge for Land Suitability Classification**; *Agricultural Systems*; n. 83; pg. 49-75; 2005.

SIMÕES, M. G; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blüchter, 1999. 165 p.

SINGH, A. K.; SRIVASTAVA, L. K.; JAGGI, I. K.; DAS, R. O. **Water Percolation Dynamics as Influenced by Submergence Levels and Depth of Puddling in Rice Fields**; *Journal of the Indian Society of Soil Science*; v. 41; n. 2; p. 213-217; New Delhi: 1993.

SOSBAI, Sociedade Sul Brasileira do Arroz Irrigado; **Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil**; Sociedade Sul Brasileira do Arroz Irrigado: XXX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado; Bento Gonçalves: 2014. 192 pg.

SOUZA, A.; GUERRA, J. C. C.; KRUGER, E. L.; **Os Programas Brasileiros em Eficiência Energética como Agentes de Reposicionamento do Setor Elétrico**; *Revista Tecnologia e Sociedade*; 1ª Ed.; ISSN: 1984-3526 (versão online); 2011.

STATHAKIS, D.; SAVINA, I.; **Neuro-Fuzzy Modeling for Crop Yield Prediction**; *The International Archives of the Photogrammetry*, v. 34; n. 2; 2014.

STONE, L. F. **Eficiência do Uso da Água na Cultura do Arroz Irrigado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644; 176), 48 p., 2005.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; SILVEIRA FILHO, A.; **Manejo de água na Cultura do Arroz: Consumo, Ocorrência de Plantas Daninhas, Absorção de Nutrientes e Características Produtivas**; *Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira*; v. 25; n. 3; p. 323-337; Brasília: 1990.

TABBAL, D. F.; BOUMAN, B. A. M.; BHUIYAN, S. I.; SIBAYAN, E. B.; SATTAR, M. A.; **On-Farm Strategies For Reducing Water Input in Irrigated Rice: Case Studies in the Philippines**; *Agricultural Water Management*; v. 56; n. 2; p. 93-112; Amsterdam: 2002.

VIANA, A.; RICARDO, M.; **Possibilidades de Conservação e Eficientização Hidroenergética em Sistemas de Irrigação**; 7º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – AGRENER; Fortaleza: 2008.

VOLTOLINI, J.; ALTHOFF, D. A.; BACK, A. J.; **Água de Irrigação para a Cultura do Arroz Irrigado no Sistema Pré-Germinado**. In: EPAGRI; *A Cultura do Arroz Irrigado Pré-Germinado*; Florianópolis: 2002. p. 101-112.

WANG, F; CHEN, A.; **Energy Management Handbook**; Hong Kong: BSR, 2012.

YOSHIDA, S.; **Fundamentals of Rice Crop Science**. Los Baños, Filipinas: The International Rice Research Institute, 1981. 279 p.



## APÊNDICE A – LÓGICA FUZZY

Com base na Revisão Bibliográfica apresentada no Capítulo 2, dentre as possíveis técnicas para o desenvolvimento da metodologia proposta nessa dissertação, adotou-se a Lógica Fuzzy, ou Lógica Difusa, baseada em regras de um Sistema Especialista. Neste apêndice é realizada uma revisão teórica deste método, apresentando seus principais conceitos e forma de aplicação.

### A.1 LÓGICA FUZZY OU LÓGICA DIFUSA

A Lógica Fuzzy, também conhecida como Lógica Difusa ou Lógica Nebulosa, foi introduzida inicialmente por Zadeh na década de 1960, inaugurando uma área de pesquisa conhecida como *soft computing*, ou computação flexível. Empregando uma forma de raciocínio bem próxima à do ser humano, a Lógica Fuzzy atinge aproximações melhores que modelos baseados na lógica clássica, para situações em que existam incertezas ou imprecisões (EL-HAWARY, 1998). Conceitualmente, a modelagem Fuzzy constitui uma forma intuitiva e transparente de capturar e descrever a essência de problemas do mundo real (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

Devido a estas características, e por se tratar de uma situação com grande quantidade de variáveis, onde algumas delas são linguísticas, a lógica Fuzzy apresentou-se como método possível para o desenvolvimento deste trabalho. A seguir são abordados os pontos considerados principais para o entendimento desta ferramenta e utilizados para o desenvolvimento prático.

### A.2 APLICAÇÃO DA MODELAGEM FUZZY

A teoria dos conjuntos Fuzzy é uma excelente ferramenta para modelagem de problemas associados a incertezas, imprecisões e/ou à falta de informações sobre um determinado elemento do problema em questão (EL-HAWARY, 1998). Mas também é utilizada em aplicações onde a complexidade desempenha um papel essencial (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

A modelagem Fuzzy é encontrada nas mais variadas áreas de aplicação, possuindo um longo histórico de desenvolvimento, de diversificação de conceitos e aprimoramento de algoritmos. Os conjuntos Fuzzy baseados em regras são vistos,

ao lado de redes neurais e computação evolucionária, como o centro dos sistemas baseados em conhecimento e o núcleo da inteligência computacional.

El-Hawary (1998) cita que sempre que ocorre a necessidade evidente de precisão, há algoritmos que oferecem uma tradução mais eficiente do problema que os algoritmos Fuzzy. Todavia, alta precisão implica em alto custo financeiro, alto tempo de desenvolvimento e engessamento do modelo. Segundo o autor, a lógica Nebulosa pode ser utilizada em problemas com informações imprecisas ou ambíguas, tais quais:

- I. Processos que envolvam interação humana;
- II. Quando há disponibilidade de um especialista que possa traduzir o comportamento do sistema e que possa representar as características de cada variável em conjuntos Fuzzy;
- III. Quando não há modelo matemático para o processo, ou quando este é muito difícil de ser codificado, ou quando é muito complexo para ser implementado em operações em tempo real, ou ainda em situações que necessitem muita memória;
- IV. Em processos relacionados em fenômenos contínuos, que não são facilmente divididos em segmentos discretos;
- V. Quando é necessário lidar com níveis elevados de ruído, ou com processadores de baixa precisão.

As vantagens da utilização de um modelo Difuso incluem maior generalidade, maior poder expressivo, uma maior capacidade para modelar problemas do mundo real, e uma metodologia para explorar a tolerância para imprecisão (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007). A modelagem Fuzzy pode ainda ajudar a alcançar *tratabilidade*, robustez e uma solução de baixo custo (EL-HAWARY, 1998).

O uso de sistemas Fuzzy na engenharia já é consagrado, conforme observado em Pratama et. al. (2016), Garg et. al. (2013), Rad et. al. (2007) e Lobbel et. al. (2010), inclusive em muitos casos em substituição às tecnologias convencionais. Seu emprego na área de sistemas elétricos de potência, apesar de relativamente recente, é destinado a tomadas de decisão de expansão do sistema, previsão de carga e programação de manutenções fundamentada na opinião de especialistas (EL-HAWARY, 1998).

### A.3 TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY

A lógica clássica, também conhecida como *booleana*, é a base da linguagem matemática empregada nos cálculos computacionais nos dias atuais. Apresentada pela primeira vez por Aristóteles no século IV a.C., introduziu a ideia de bivalência, alegando que uma certa afirmação pode ser classificada como *verdadeira* ou *falsa* (POSSELT, 2011). Mais tarde, no século XIX, o britânico George Boole associou números a este raciocínio, onde “0” corresponde a *falso* e “1” a *verdadeiro*, marcando então o início da *álgebra booleana* (SIMÕES e SHAW, 1999).

Entretanto, à visão humana do mundo real há situações com diversos níveis de veracidade e onde a aplicação simples do conceito de verdadeiro ou falso apresenta restrição ou perda de precisão (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007). Para estes casos, a lógica Fuzzy, ou lógica difusa, possui maior aplicabilidade, pois sua abordagem transcende as restrições impostas pela lógica binária tradicional (BELOHLAVEK et al., 2009).

A teoria dos conjuntos Fuzzy foi descrita inicialmente, em 1965, pelo azerbaijano Lotfi Asker Zadeh, com a tentativa de representar a incerteza inerente ao raciocínio humano. Ela permite mensurar o grau de aproximação da solução exata, diferentemente da lógica booleana onde só há respostas extremas (COX, 1994).

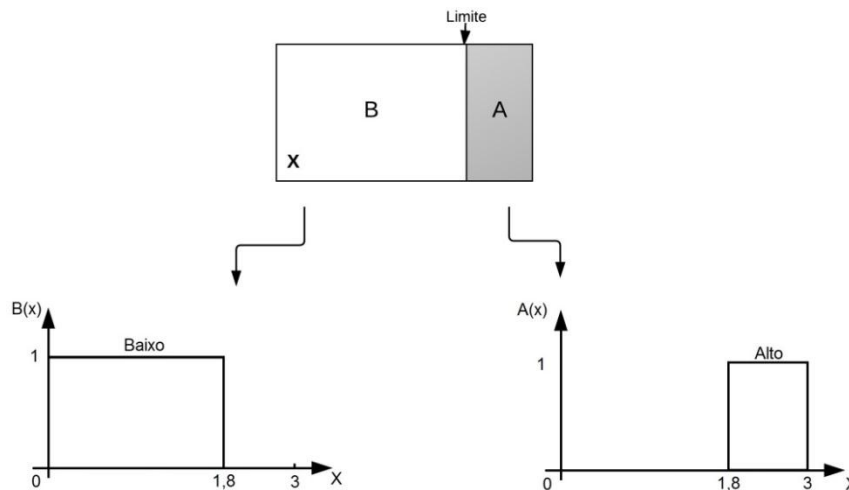
Na teoria dos conjuntos da lógica clássica, um elemento pertence ou não pertence a um conjunto. Os conjuntos, por sua vez, têm limites bem definidos, o que permite realizar a avaliação precisa: o elemento pertence sim ao conjunto em questão ou não pertence (CHEN e PHAM, 2001).

Enquanto isto, nos conjuntos Fuzzy, cada elemento possui um grau de pertencimento a um determinado conjunto. Este grau de pertencimento é representado por um número em um intervalo entre zero e um (EL-HAWARY, 1998).

Ocorrem várias situações onde a aplicação de conjuntos Fuzzy modela de forma mais próxima à realidade que os conjuntos clássicos. Ao lidar com o conceito de altura de pessoas, por exemplo, é comum afirmar que uma pessoa de altura igual a 1,0 m é baixa e uma pessoa de 1,90 m é alta. Entretanto, a percepção do limite que discrimina uma pessoa entre *baixa* e *alta* não é algo rígido, e não faz sentido para o raciocínio humano que haja um limite de altura em que abaixo dele uma pessoa seja considerada baixa e que, abruptamente, acima do mesmo seja considerada alta. Este é o conceito da *dicotomia*, que está atrelado aos conjuntos na lógica clássica e que é ilustrado na Figura A.1. Neste cenário, ficam definidos dois

conjuntos, B e A, compreendidos entre os seguintes intervalos (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

Figura A.1 – Dicotomia característica da lógica clássica



Fonte: Adaptado de Pedrycz e Gomide, 2007.

$$B = \{x_1 \in H \mid 0 \leq x_1 \leq 1,8\} \quad (\text{A.1})$$

$$A = \{x_1 \in H \mid 1,8 < x_1 \leq 3\} \quad (\text{A.2})$$

Ou seja, os conjuntos B e A representam restrições com limites bem definidos para a classificação de uma altura  $x_1$  de acordo com a teoria dos conjuntos clássicos.

Desta forma, fica definido que uma determinada altura  $x_1$  pertencerá ou ao conjunto B, ou ao conjunto A. Considerando que  $x_1$  encontre-se no intervalo definido pelo conjunto B, então este assume, por notação, valor de aceitação 1 para este conjunto, e valor 0 para o conjunto A, representando a rejeição a este conjunto. O mesmo ocorre quando  $x_1$  assume uma altura encontrada no intervalo representado pelo conjunto A, e receberá valor 1 de aceitação para o conjunto A e 0 para o conjunto B. É possível expressar as funções características para a classificação do elemento  $x_1$ , onde:



$$B(x_1) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_1 \in B \\ 0, & \text{se } x_1 \notin B \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

$$A(x_1) = \begin{cases} 1, & \text{se } x_1 \in A \\ 0, & \text{se } x_1 \notin A \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

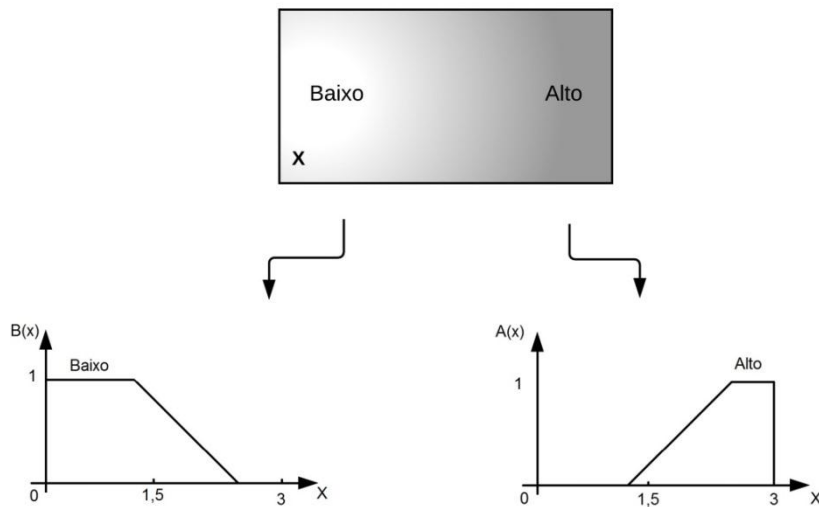
A ideia fundamental dos conjuntos Fuzzy é retirar a rigidez dos conjuntos clássicos apresentados, permitindo a atribuição de valores intermediários de compatibilidade (entre 0 e 1) para cada elemento, onde o “0” corresponde à total exclusão do elemento para o conjunto e “1” representa sua completa compatibilidade. Pedrycz e Gomide (2007) trazem o conceito de pertinência gradual, em que não existem limites naturais e onde um elemento pode coexistir em dois ou mais conjuntos simultaneamente, com diferentes valores parciais de compatibilidade com cada um. Matematicamente, o que ocorre é que um conjunto Fuzzy  $A$  terá uma função de pertinência que mapeará cada elemento do universo  $X$  em um intervalo  $[0,1]$ :

$$A : X \rightarrow [0,1] \quad (\text{A.5})$$

Para o exemplo construído sobre as alturas dos seres humanos haverá uma transição mais suave entre o conjunto de valores de alturas consideradas baixas e o de alturas consideradas altas, como apresentado na Figura A.2.

Quando assumida a perspectiva dos conjuntos Fuzzy, um elemento com altura de 1,5 m é compatível tanto com o conceito *baixo* quanto com o conceito *alto*, com pertinência 0,8 para *baixo* e 0,2 para *alto* (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

Figura A.2 – Exemplo de conjunto Fuzzy e suas funções de pertinência



Fonte: Adaptado de Pedrycz e Gomide, 2007.

Trata-se, portanto, de uma questão de grau de pertencimento e não de inclusão ou exclusão aos conjuntos. O que define o grau de pertencimento de um elemento a um conjunto Fuzzy são as funções de pertinência.

#### A.4 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

As funções de pertinência descrevem o comportamento dos conjuntos Fuzzy e, por consequência, a forma como um elemento será mapeado dentro do universo Fuzzy de cada variável. Segundo Pedrycz e Gomide (2007), elas devem retratar a percepção humana do conceito a ser representado para a solução do problema, o contexto e o nível de detalhamento que se intenciona capturar.

Matematicamente, qualquer função  $A : X \rightarrow [0,1]$ , onde  $X \in R$  é qualificada para descrever um conjunto Fuzzy e, portanto, para ser uma função de pertinência. Porém, a literatura ressalta algumas mais usuais, que são apresentadas a seguir.

##### A.4.1 Função de pertinência triangular

A função triangular é a mais simples dentre as funções de pertinência. Isto porque é completamente descrita por apenas três parâmetros, que são os três

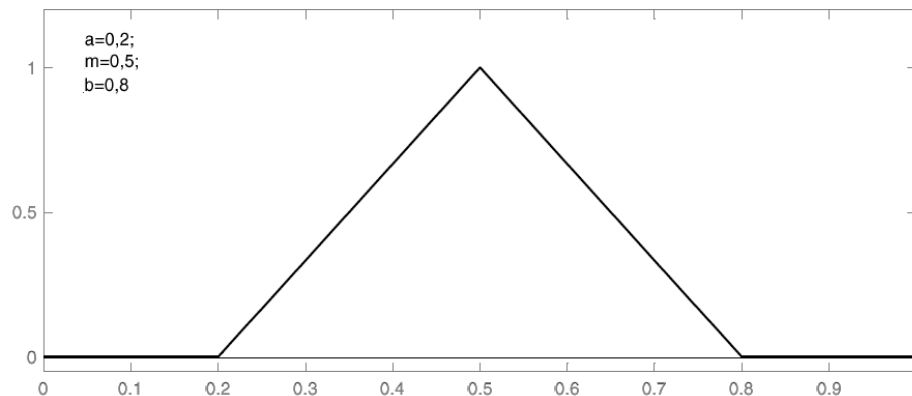
pontos que delimitam os seguimentos lineares que formam o triângulo, conforme é apresentado em (A.6):

$$A(x, a, b, m) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

onde  $a$ ,  $m$  e  $b$  são os vértices do triângulo.

A Figura A.3 apresenta graficamente um exemplo de função de pertinência triangular.

Figura A.3 – Função de pertinência triangular



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

O ponto  $m$  representa o ponto máximo da função, ou seja, o ponto de maior pertinência de um elemento ao conjunto descrito por esta função. Já os pontos  $a$  e  $b$  representam os limites inferior e superior que delimitam o intervalo de valência da função.

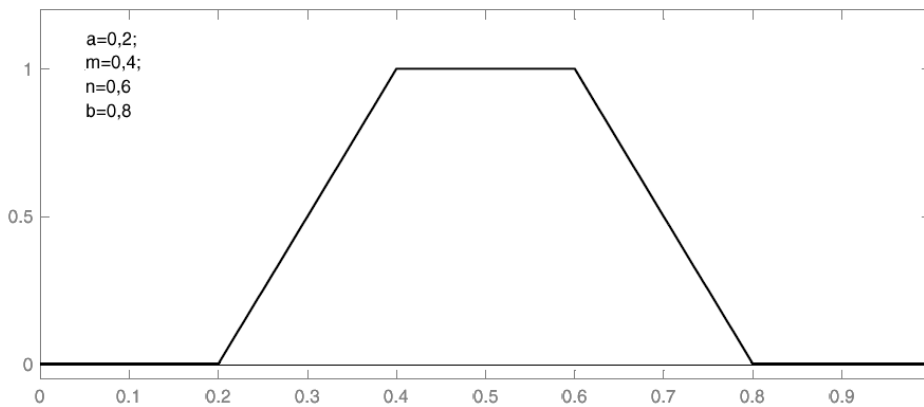
### A.4.2 Função de pertinência trapezoidal

Função definida por quatro parâmetros, que determinam três segmentos de reta que formam o trapézio. A função trapezoidal, também denominada função  $\pi$ , é definida por (A.7):

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ 1, & \text{se } x \in [m, n) \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (\text{A.7})$$

onde  $a$ ,  $m$ ,  $n$  e  $b$  são os vértices do trapézio. Graficamente esta função comporta-se como apresentado na Figura A.4.

Figura A.4 – Função de pertinência trapezoidal



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

Nesta função o conjunto de valores entre  $[m, n)$  apresenta pertinência máxima. Já os valores nos intervalos  $[a, m)$  e  $[n, b]$  apresentam pertinências parciais definidas pelas equações das retas, enquanto que os elementos localizados abaixo de  $a$  e acima de  $b$  não apresentam pertinência com o grupo.

A função trapezoidal apresenta um intervalo para pertinência máxima e é utilizada em situações de maior incerteza em relação à função triangular.

### A.4.3 Funções de Pertinência $\Gamma$ e L

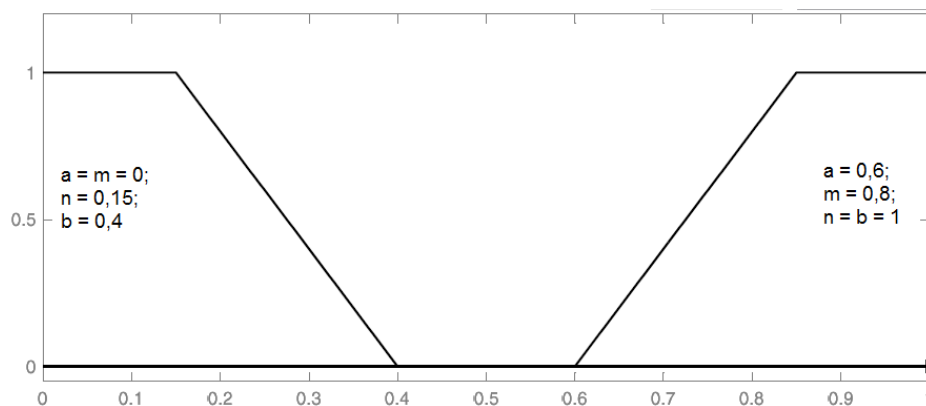
As funções de pertinência  $\Gamma$  e L são casos particulares da função trapezoidal. A função  $\Gamma$  apresenta pertinência máxima aos elementos abaixo do valor  $a$ , pertinências parciais entre  $a$  e  $b$ , e pertinência nula a partir de  $b$ , conforme (A.8). Já a função L tem comportamento oposto a de  $\Gamma$ , iniciando com pertinência nula para elementos abaixo de  $a$  e com pertinência igual a um para elementos acima de  $b$ , conforme (A.9):

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } x \in [a, b] \\ 1, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

$$A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x < a \\ \frac{x-b}{a-b}, & \text{se } x \in [a, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

O comportamento gráfico de cada função pode ser visualizado na Figura A.5.

Figura A.5 – Funções de pertinência  $\Gamma$  e L



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

As funções de pertinência  $\Gamma$  e L possuem comportamentos complementares e não raro são utilizadas em conjunto.

Existem ainda outras funções de pertinência frequentemente utilizadas como a gaussiana, a exponencial, a sigma e a sino, e outras não tão frequentemente utilizadas como as baseadas em funções polinomiais. Nenhuma destas, contudo, foi aplicada a esta dissertação.

## A.5 VARIÁVEIS E TERMOS DE LINGUAGEM FUZZY

O conceito de variável linguística é a base da lógica Fuzzy. Uma variável convencional é numérica e precisa, e não é capaz de expressar a nebulosidade da teoria dos conjuntos Fuzzy. Desta forma, a linguagem Fuzzy se utiliza de variáveis linguísticas, menos precisas que números, mas que fornecem caracterização aproximada para fenômenos complexos ou mal-definidos (CIRSTEA et. al., 2002).

Segundo Brancalioni (2010), as variáveis linguísticas têm o papel de expressar qualitativamente, através de palavras ou termos, uma variável de um determinado problema. Essas variáveis são também expressas quantitativamente, através das funções de pertinência associadas aos termos linguísticos.

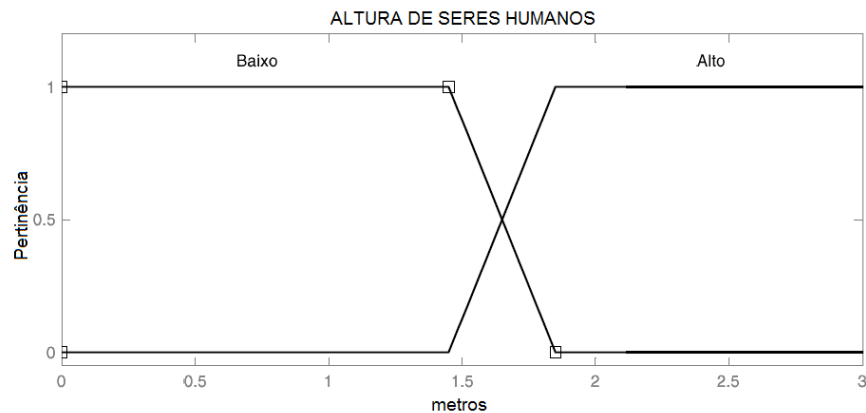
Os termos linguísticos são frequentemente empregados para caracterizar, diferenciar e/ou quantificar informações. No caso das alturas de seres humanos utilizado anteriormente, por exemplo, a variável linguística é *altura*. Já os conjuntos, formados por funções de pertinência, associados a esta variável são *baixo* e *alto*. A Figura A.6 ilustra este exemplo de utilização dos termos linguísticos.

Neste caso, o universo de avaliação da variável  $x_1$ , corresponde ao intervalo  $[0,3]$  metros.

Devido ao fato de os termos linguísticos serem expressos dentro de um domínio definido, a função do especialista torna-se indispensável (ORTEGA, 2004). Isto porque, apesar dos termos linguísticos terem um significado claro, eles requerem certa calibração ao contexto ao qual estão sendo inseridos (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

Isso significa que o conjunto *baixo* do exemplo anterior pode ter domínio diferente para outras situações, dependendo do contexto ao qual a variável *altura* esteja sendo avaliada.

Figura A.6 – Exemplo de variável linguística



Fonte: Elaborado pelo autor, 2016.

As variáveis linguísticas trazem a lógica Fuzzy para bem próxima do raciocínio humano, tornando mais fácil a interface entre a análise qualitativa e quantitativa, o que é uma das grandes vantagens da aplicação deste método.

## A.6 OPERAÇÕES FUZZY

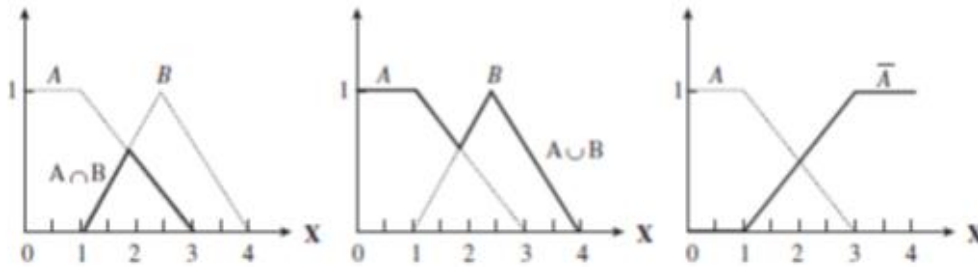
As operações Fuzzy são manipulações realizadas entre funções de pertinência. Da mesma forma que ocorre com conjuntos numéricos, conjuntos Fuzzy são passíveis de operações matemáticas. Desta forma, resultam em um novo conjunto. As operações Fuzzy existem em grande número e ocorrem nas etapas de inferência e *defuzzyficação*. Dentre as principais operações, pode-se destacar a união, a intersecção, o complemento, as normas triangulares e as conormas triangulares (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

A seguir são apresentadas as operações utilizadas neste trabalho.

### A.6.1 União, intersecção e complemento

As operações de união, intersecção e complemento Fuzzy são similares às dos conjuntos clássicos. A intersecção estabelece-se para o conjunto resultante os pontos  $x$  contidos simultaneamente em ambos os conjuntos primários, conforme é apresentado na Figura A.7(a).

Figura A.7 – Operações entre conjuntos Fuzzy: (a) intersecção, (b) união e (c) complemento



Fonte: Adaptado de Pedrycz e Gomide, 2007.

Para esta operação verifica-se uma relação de mínimo entre os conjuntos A e B, conforme a Equação (A.14):

$$(A \cap B)(x) = \min[A(x), B(x)] \quad (\text{A.14})$$

Já na união de dois conjuntos corresponderá à máxima representação de pontos  $x$  contidos em ambos conjuntos no universo Fuzzy, conforme visualizado na Figura A.7(b). Matematicamente o que verifica-se na união dos conjuntos A e B é descrito na Equação (A.15).

$$(A \cup B)(x) = \max[A(x), B(x)] \quad (\text{A.15})$$

Na operação de complemento, matematicamente, o que se verifica é o comportamento caracterizado pela Equação (A.16). Graficamente, o comportamento do complemento de um conjunto A é visualizado na Figura A.7(c).

$$\bar{A}(x) = 1 - A(x) \quad (\text{A.16})$$

Assim como as operações entre conjuntos Fuzzy são semelhantes aos conjuntos clássicos, as propriedades destes conjuntos, tais quais comutatividade, associatividade, distributividade, etc. também o são.



### A.6.2 Normas e conormas triangulares

As normas e conormas triangulares (norma-t e conorma-t) são uma classe geral de operadores de união e intersecção. Dado um operador norma-t, o seu operador dual é chamado conorma-t (ou norma-s) (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007). As normas-t generalizam as operações de intersecção dos conjuntos Fuzzy enquanto que as conormas-t generalizam as operações de união. As normas-t são operações binárias, a exemplo da Equação (A.17),

$$t: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (\text{A.17})$$

que satisfazem as propriedades de comutatividade, associatividade, monotonicidade e condições de contorno.

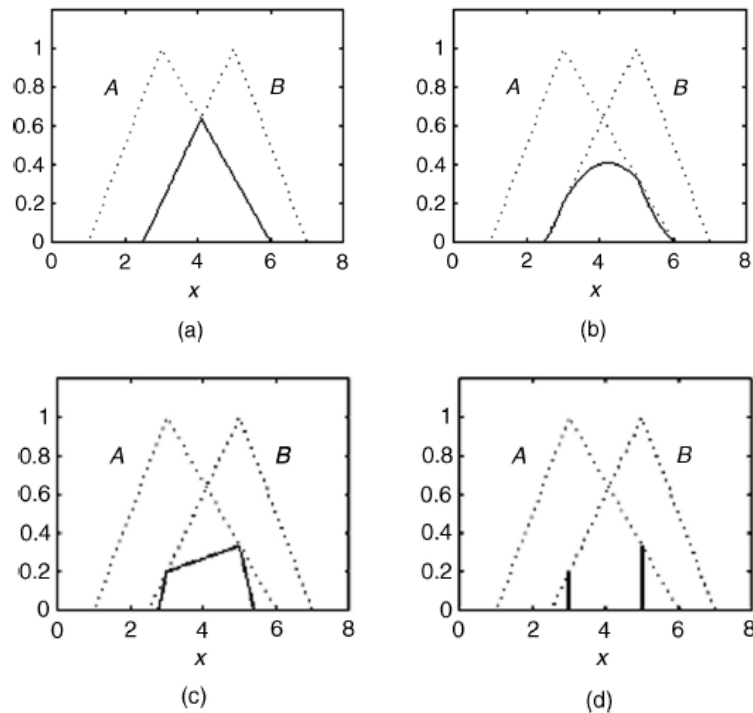
As operações mais comumente encontradas são:

1. Mínimo:  $a \ t_m \ b = \min(a, b) = a \wedge b$
2. Produto:  $a \ t_p \ b = ab$
3. Lukasiewicz:  $a \ t_l \ b = \max(a + b - 1, 0)$
4. Produto drástico:  $a \ t_d \ b = \begin{cases} a, & \text{se } b = 1 \\ b, & \text{se } a = 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Na norma-t mínimo, para cada elemento, a pertinência será a menor pertinência entre a e b (operação lógica *and*). No produto, para cada elemento, a pertinência é igual ao produto algébrico da pertinência de a e b. Já no produto limitado, ou Lukasiewicz, para cada elemento, o valor de pertinência será a soma da pertinência de a e b diminuído de 1, limitado ao valor de 0. Por fim, o produto drástico, apresenta um conjunto de três regras que cobrem todas possibilidades.

A Figura A.8 apresenta uma exemplificação das normas-t com as resultantes das quatro operações descritas.

Figura A.8 – Normas triangulares utilizadas na intersecção de conjuntos Fuzzy: (a) mínimo, (b) produto, (c) Lukasiewicz, e (d) produto drástico



Fonte: Pedrycz e Gomide, 2007.

As conormas-t são operações binárias exemplificadas pela Equação A.18,

$$s: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (\text{A.18})$$

que também satisfazem as propriedades de comutatividade, associatividade, monotonicidade e condições de contorno.

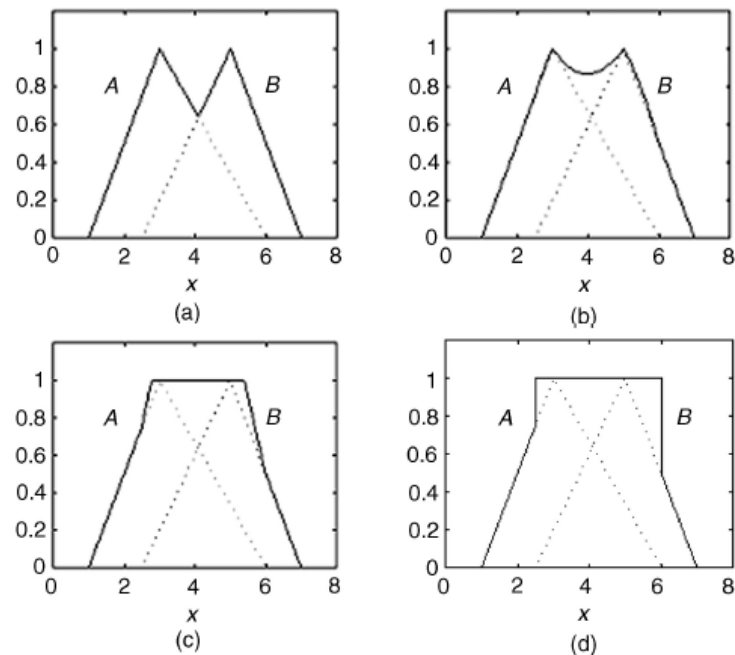
As operações mais comumente encontradas são:

1. Máximo:  $a s_m b = \max(a, b) = a \vee b$
2. Soma probabilística:  $a s_p b = a + b - ab$
3. Lukasiewicz:  $a s_l b = \min(a + b, 1)$
4. Soma drástica:  $a s_d b = \begin{cases} a, & \text{se } b = 0 \\ b, & \text{se } a = 0 \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Na conorma-t máximo, para cada elemento, a pertinência será a maior entre a e b (operação lógica *or*). Na soma probabilística, para cada elemento, a pertinência é igual à soma das pertinências de a e b menos o produto da pertinência de a e b. Já

na soma limitada ou Lukasiewicz, para cada elemento é obtido o mínimo entre 1 e a soma da pertinência de a e b. Finalmente, na soma drástica, há o conjunto de três regras que cobrem todas as combinações lógicas possíveis. A Figura A.9 apresenta uma exemplificação das conormas-t com as resultantes das quatro operações descritas.

Figura A.9 – Conormas triangulares utilizadas na união de conjuntos Fuzzy: (a) máximo, (b) soma probabilística, (c) Lukasiewicz, e (d) soma drástica



Fonte: Pedrycz e Gomide, 2007.

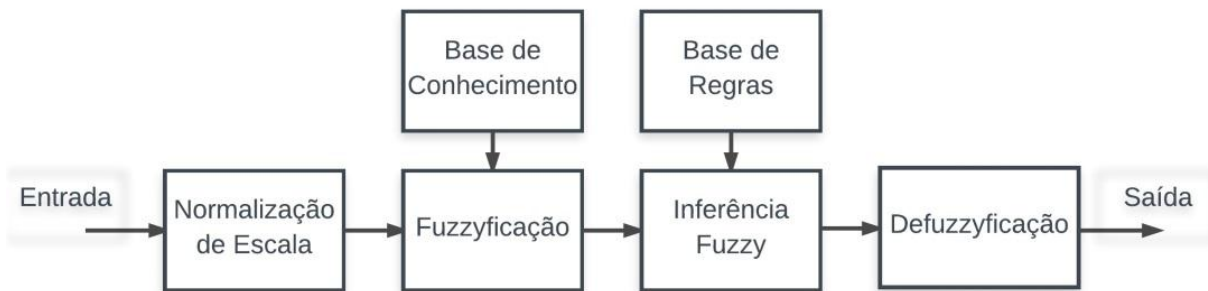
## A.7 FUZZYFICAÇÃO

A *fuzzyficação* é a etapa onde ocorre a passagem dos dados e informações numéricos disponíveis para o formato trabalhado pela lógica difusa, através dos conjuntos Fuzzy e das funções de pertinência. Em outras palavras, nesta fase as variáveis de entrada são convertidas para o formato Fuzzy através do acionamento dos conjuntos Fuzzy pré-definidos. Desta forma, os valores numéricos das variáveis de entrada são traduzidos para os termos linguísticos associados a estes.

A partir da passagem dos valores de entrada para termos linguísticos e da classificação dos elementos de acordo com o universo de cada variável, aplicando as funções de pertinência, é possível a aplicação dos chamados controladores fuzzy,

compostos por uma base de regras e máquina de inferência, que serão vistas na Figura A.10.

Figura A.10 – Arquitetura típica Fuzzy



Fonte: Adaptado de Cirstea, 2010.

## A.8 ARQUITETURA FUZZY BASEADA EM REGRAS

Os modelos baseados em regras cumprem papel central dentre as arquiteturas Fuzzy. Isto porque as regras conseguem capturar as relações entre as variáveis conectando as descrições linguísticas com as percepções computacionais (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

Estas são compostas basicamente por sentenças do tipo “se – então”, que associam as *condições* em operações Fuzzy e as relacionam às *conclusões*, como no exemplo da Equação (A.19).

$$\textit{se } \textit{condi\c{c}o\~{e}}_1 \textit{ \textit{e} } A \textit{ E } \textit{condi\c{c}o\~{e}}_2 \textit{ \textit{e} } B \textit{ E } \dots \textit{condi\c{c}o\~{e}}_n \textit{ \textit{e} } N \textit{ \textit{ent\~{a}o} } \textit{conclus\~{a}o}_1 \textit{ \textit{e} } X \quad (\textit{A.19})$$

onde  $A$ ,  $B$ ,  $N$  e  $X$  são os conjuntos Fuzzy de entrada e saída previamente definidos.

As regras podem expressar relações de certeza qualificada, de graduação, de função, além de condições, como no exemplo, entre outras.

Para as topologias baseadas em regras, inicialmente, é necessário que sejam definidas as variáveis de entrada e saída e as funções de pertinência de cada uma. O número prático é de duas a sete funções de pertinência para cada variável. Quanto maior o número de funções melhor será a precisão do modelo, porém maior será o número de regras. Experiências mostram que o aumento de 5 funções

triangulares para 7 aumentam a precisão dos resultados em menos de 15% e que a partir de valores maiores não são vistas melhoras significativas (SIMÕES e SHAW, 1999).

Após a constituição das variáveis e suas respectivas funções de pertinência, são construídas as regras. Segundo Pedrycz e Gomide (2007), a generalidade das regras deve ser ajustada para melhorar a qualidade das conclusões. Aumentada a generalidade das condições, é possível ter uma regra que se aplique a mais situações. O que se deve buscar sempre na elaboração das regras é que a parte das condições seja a mais generalista possível e que a parte da conclusão seja específica (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007). Geralmente, as regras são elaboradas baseadas no conhecimento empírico do especialista.

### **A.8.1 Sistema Especialista**

Especialistas são indivíduos com domínio do problema tratado e que fornecem o conhecimento sobre conceitos básicos e variáveis essenciais conectando-o em forma de regras. Da mesma forma, as regras refletem o conhecimento existente no assunto (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

Uma das vantagens de utilizar o conhecimento do especialista é que o tempo de desenvolvimento das regras pode ser bastante curto.

Apesar dos sistemas Fuzzy baseados no conhecimento do especialista serem bastante efetivos, há alguns cuidados a se tomar, principalmente quando o número de regras é muito elevado. O primeiro deles é que o sentido das regras é muito rígido, uma vez que elas refletem o conhecimento existente. Isto significa que em alguns casos uma calibração dos conjuntos Fuzzy pode ser necessária para que sua semântica capture ao máximo a especificidade do problema. Outro cuidado é quanto à qualidade das regras. A construção das regras pode ser tarefa muito difícil em problemas maiores, visto que o número de regras é definido por  $N = p^n$ , onde  $n$  é o número de variáveis de entrada e  $p$  é o número de conjuntos linguísticos de cada uma. A qualidade das regras pode se deteriorar nestes casos. É necessária atenção a dois pontos: a plenitude de cobertura de todos os conjuntos Fuzzy por regras e a consistência das regras. O quadro 3.1 dá algumas diretrizes relativas à consistência entre regras na sua elaboração.

Quadro A.1 – Consistência entre condições e conclusões de regras Fuzzy

	<b>Conclusões similares</b>	<b>Conclusões distintas</b>
<b>Condições similares</b>	Regras são redundantes	Regras estão em conflito
<b>Condições distintas</b>	Regras diferentes, talvez possam ser fundidas	Regras diferentes

Fonte: Adaptado de Pedrycz e Gomide (2007).

### A.8.2 Controlador Mamdani

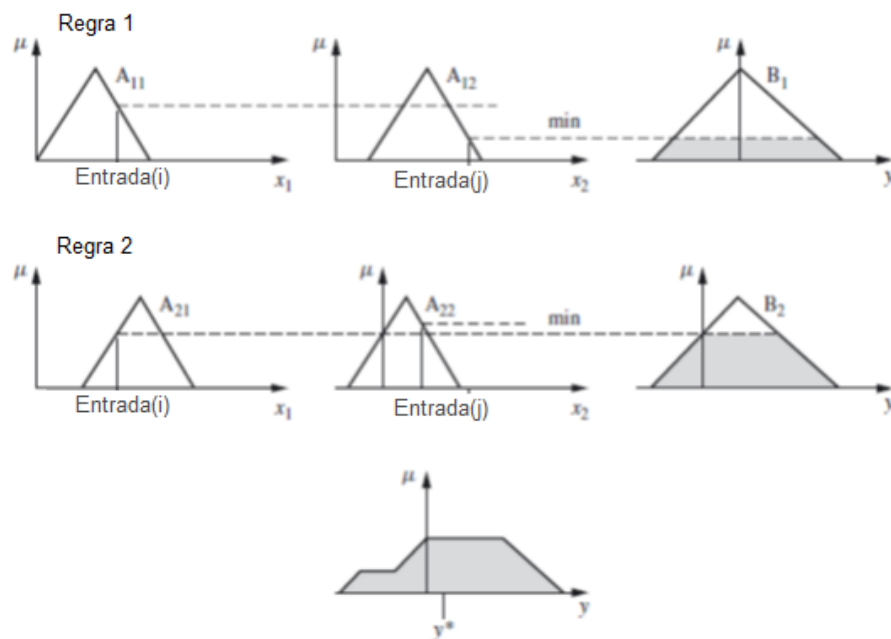
O conjunto de regras elaborado pelo especialista é interpretado por um método de inferência, também conhecido como controlador Fuzzy. Os controladores mais conhecidos são: Mamdani, Larsen, Tsukamoto e Takagi-Sugeno. A principal diferença entre estes controladores é o formato dos dados de saída. Os modelos de Tsukamoto e Takagi-Sugeno são modelos nos quais a conclusão de cada regra é dada através de uma função. Já os modelos de Larsen e de Mamdani são considerados modelos clássicos, nos quais a conclusão de cada regra especifica um termo nebuloso dentre um conjunto fixo de termos (SANDRI e CORREA, 1999). Todavia, o sistema de Mamdani é o mais utilizado na prática e também o mais explorado pela literatura (ROSS, 2010). Por estas razões, o controlador Fuzzy escolhido para aplicação na metodologia proposta foi o Mamdani.

Segundo Ross, o controlador Mamdani é uma técnica gráfica (ROSS, 2010). As características principais deste são a praticidade para a incorporação das regras (seguindo o raciocínio humano de análise), compatibilidade com diversos métodos de *fuzzyficação* e *defuzzyficação* e a possibilidade de acompanhamento e manipulação das regras pelo programador do algoritmo (LIANG e WANG, 1991). É caracterizado, também, pelo fato de as relações difusas ocorrerem tanto nos antecedentes (parte das condições) quanto nos consequentes (parte das conclusões) das regras.

O Mamdani tem diversas variações de acordo com os diferentes métodos de inferência possíveis, entre os quais os mais comuns são a composição máximo dos mínimos (*max-min*) e a composição máximo dos produtos (*max-product*) (ROSS, 2010).

Nesta dissertação foi adotada a composição máximo dos mínimos. Neste, a agregação do conjunto de regras é realizada pelo operador *união* (operador lógico *or*). Já dentro de cada regra, as condições são relacionadas com o operador *intersecção* (operador lógico *and*) (BRANCALIONI, 2010). A Figura A.11 demonstra graficamente as operações nesta composição.

Figura A.11 – Composição máximo dos mínimos



Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

Neste exemplo, observa-se duas variáveis, *i* e *j*, e duas regras relacionando-as:

- Regra 1: se (*i* é A<sub>11</sub> e *j* é A<sub>12</sub>) então (*y* é B<sub>1</sub>);
- Regra 2: se (*i* é A<sub>21</sub> e *j* é A<sub>22</sub>) então (*y* é B<sub>2</sub>);

A relação das variáveis dentro de cada regra é realizada pelo operador intersecção, que transfere para o consequente *B* o valor mínimo dentre estas. Já a agregação entre os termos consequentes de cada regra é feita pela sua união. Matematicamente, o que ocorre é descrito em (A.19).

$$\mu_{B^k}(y) = \max_k [\min[\mu_{A_{k1}}(\text{entrada}(i)), \mu_{A_{k2}}(\text{entrada}(j))]] , k = 1, 2, \dots, r \quad (\text{A.19})$$

onde *i* e *j* são as entradas, *y* é a saída e *k* é o índice da regra.

Para o exemplo apresentado, o resultado após o mecanismo de inferência é o descrito graficamente na Figura A.11. O próximo passo é a etapa de *defuzzyficação* deste resultado.

## A.9 DEFUZZYFICAÇÃO

A *defuzzyficação* é a transformação de um valor Fuzzy proveniente da saída de um controlador Fuzzy em um valor numérico. É um processo que permite interpretar a distribuição de possibilidades de saída de um modelo linguístico de forma quantitativa, em um único valor numérico.

Muitos métodos de *defuzzyficação* foram propostos na literatura nos últimos anos, porém sete são os mais estudados e usados: método das alturas, do centro de gravidade, da média ponderada, da média dos máximos, centro das somas, centro da maior área e primeiro (ou último) dos máximos (ROSS, 2010).

Dentre estes, o método do centro de gravidade foi selecionado para ser utilizado neste trabalho, por ser o mais predominante na literatura e também por que tem seu resultado calculado a partir da integral da área composta pela união das conclusões de todas as regras. A Figura A.12 exemplifica graficamente o como é encontrado o centroide.

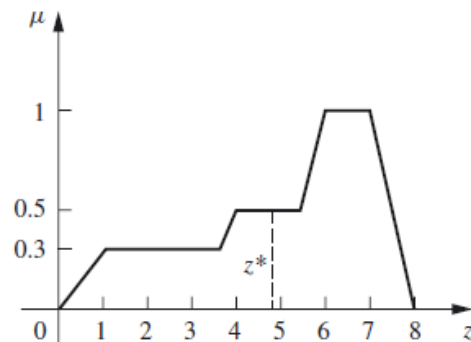
Na Figura A.12 o ponto  $z^*$  apresenta o centroide calculado a partir da composição da união da saída de três regras diferentes. Segundo Ross (2010), o cálculo do valor centroide é descrito na Equação (A.20).

$$z^* = \frac{\int \mu_B(z).z dz}{\int \mu_B(z)dz} \quad (\text{A.20})$$

onde  $\mu_B$  é a união das conclusões de todas as regras.



Figura A.12 – Defuzzyficação pelo método do centroide



Fonte: Ross, 2010.

## A.10 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

As terminologias de verificação e validação estão fortemente estabelecidas na área de engenharia de software e são muito úteis quando trazidas para a avaliação de modelos Fuzzy. Enquanto que a verificação diz respeito a constatar a correta construção dos processos básicos do modelo Fuzzy, a validação preocupa-se em assegurar que o modelo atinge os resultados a que se propõe (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

Quanto à verificação, é levantada a importância de construir um modelo com a menor complexidade possível, de se utilizar um método iterativo para a construção do modelo, e de avaliar a precisão do modelo com um conjunto de dados de treinamento.

Em relação à validação, Pedrycz e Gomide (2007) citam dois aspectos importantes: transparência e estabilidade. A transparência é associada à simplicidade: quanto menores forem as regras, e quanto menos regras houver em um modelo Fuzzy baseado em regras, mais transparente ele será. Já a estabilidade diz que a saída do modelo não pode sofrer grandes alterações quando se impõe uma pequena variação em suas entradas.

## A.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse apêndice apresentou os principais conceitos teóricos relacionados à lógica Fuzzy, que é empregada como parte da metodologia proposta nessa dissertação.

A teoria dos conjuntos Fuzzy permite criar um modelo de estimativa de necessidade de irrigação artificial para lavouras de arroz irrigado, que é fundamental para a metodologia proposta.

## APÊNDICE B – ENTREVISTAS COM ESPECIALISTAS

### B.1 ENGENHEIRO AGRÔNOMO IRGA

**Pergunta 1:** Em termos de eficiência energética do sistema de levante, pelo lado dos produtores existe alguma preocupação e algum movimento neste sentido?

**Resposta:** Em meados dos anos 80, com a possibilidade iminente de seca e de racionamento de energia, a CEEE iniciou o desenvolvimento de projetos com os produtores, de conscientização, troca de motores e troca de bombas. Segundo a concessionária a substituição dos equipamentos reduziria pela metade o consumo em alguns casos. À época foi decretado que a grande maioria destes consumidores tinha instalações muito ineficientes. Mas a melhoria sempre esbarra na questão de investimentos.

Cerca de 60% dos produtores possuem áreas arrendadas e por isso não investem em eficiência, pois a terra é de outro. Porém, há outros casos em que o produtor tem acesso à Lagoa Mirim ou à Lagoa Mangueira e além de captar água para si, presta o serviço de distribuir água para outros produtores. Nestes casos justifica-se o investimento em eficiência da instalação.

Mas nota-se hoje que a bandeira vermelha é um sinal de alerta para a questão de energia hoje nas lavouras de arroz. No passado, devido à crise do petróleo, se incentivou a utilização de energia elétrica, com subsídio inclusive, então foi feito um movimento de eletrificação em todas as regiões, e hoje a energia está mais cara, o que preocupa os produtores devido ao aumento dos custos de produção.

**Pergunta 2:** O senhor saberia nos dizer qual é o padrão de consumo destes sistemas de irrigação?

**Resposta:** Existe levante elétrico, mecânico diesel e mecânico natural (barragem). A proporção eu não saberia te dizer, mas existe um censo realizado pelo IRGA entre 2004 e 2005 que vocês podem encontrar esta informação. Quanto ao consumo elétrico, é utilizado fora do horário de ponta, sendo que de madrugada é incentivado.

**Pergunta 3:** A altura do levante e a distância são aspectos determinantes para o consumo de energia destas instalações. Qual é a faixa de valores destas variáveis no RS?

**Resposta:** Na fronteira oeste existem levantes de mais de 50 metros de altura. De maneira geral, as alturas maiores se dão na fronteira oeste em função da formação da topografia, enquanto que no resto do Estado são de áreas mais planas, que não ultrapassam 20 metros. Nestas regiões mais planas as distâncias é que as vezes são maiores.

**Pergunta 4:** Existem muitas lavouras que utilizam automação para o controle do nível?

**Resposta:** Na realidade não existe nenhum tipo de controle de nível. Os produtores ligam a bomba e deixam ligadas continuamente. Ocorre, as vezes, de o canal transbordar. Podem existir projetos, mas eu nunca vi em nenhuma lavoura nenhum cuidado neste sentido.

**Pergunta 5:** Qual o tempo máximo que uma lavoura de arroz pode ficar sem abastecimento de água?

**Resposta:** Nos dias de hoje, o consumo de água diminuiu muito. Antigamente utilizava-se bombeio 24 horas por dia, com água corrente. A água tinha que sair no dreno. Quando muito se reaproveitava a água do dreno e utilizava de novo na lavoura. Hoje se utiliza cerca de  $8000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , antes eram  $15000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  durante a safra.

Na lavoura de arroz não pode faltar água. O solo deve estar saturado. Pode não haver lâmina, mas o solo deve estar saturado para evitar oxidação. O perfil do solo tem que continuar úmido para manter as condições ideais para o arroz e para o controle de ervas daninhas.

Mas na lavoura de arroz não pode faltar água. Existe no manejo uma pessoa específica para este trabalho na lavoura, o *aguador*, que percorre o dia inteiro a lavoura com o intuito de não deixar faltar água. Ele abre as taipas, fecha e controla

os níveis nos tabuleiros. O aguador recebe um percentual sobre a produtividade da lavoura para não deixar a lavoura de arroz sem água.

**Pergunta 6:** E água em demasia é um problema?

**Resposta:** Não é um problema para a planta. É só um problema de custo.

**Pergunta 7:** E é comum a utilização de altos níveis de água na lavoura?

**Resposta:** Há 30 ou 40 anos atrás as lâminas d'água eram altas, cerca de 25 cm de altura. Hoje, utiliza-se cerca de 5 cm no máximo. Claro que existe o problema do desnível, pois no nível mais baixo deve ser mantido cerca de 5 cm, então no outro lado do tabuleiro o nível será mais alto. Na fronteira oeste, por exemplo, se utiliza a plantação em desnível, cada parcela fica em nível superior à próxima.

**Pergunta 8:** Existem produtores que ainda utilizam níveis próximos de 20 cm?

**Resposta:** Não, pois hoje em dia as taipas são feitas mais baixas, então nem comportaria este nível. Caso suba muito acima dos 10 cm irá transbordar.

**Pergunta 9:** De acordo com sua experiência prática, como é feito o manejo de água pelo produtor?

**Resposta:** O produtor não pode deixar secar a lavoura, pois esta fica propícia para infestação de inços e gramíneas. O método de irrigação de solo saturado não é muito usado. Geralmente, a bomba fica durante muito tempo ligado, quase que 24 horas por dia. Principalmente no início da safra as bombas ficam ligadas continuamente para o enchimento inicial da lavoura. Inclusive, normalmente, as bombas são sobredimensionadas para encher a lavoura mais rapidamente.

**Pergunta 10:** Quais são os tipos de solo mais propícios ao cultivo do arroz irrigado? E qual suas características?

**Resposta:** No Rio Grande do Sul, o cultivo do arroz é realizado nos solos de várzea, que são solos hidromórficos. Comum são os planossolos, que se caracterizam por terem uma camada de baixa infiltração localizada cerca de 80 cm da superfície. Esta camada é argilosa e possui um pouco de limo, que ajuda diminuir a permeabilidade.

**Pergunta 11:** Quais são as perdas de água envolvidas em uma lavoura de arroz?

**Resposta:** A água é perdida por transpiração da planta, infiltração no solo e evaporação na lavoura e também nos canais de distribuição de água. Nos canais ainda ocorrem perdas por arraste devido à ação do vento. Estas perdas de transpiração e evaporação, em um dia de verão, são perdas bem consideráveis.

**Pergunta 12:** Sobre as variáveis meteorológicas, qual o impacto na produção do arroz?

**Resposta:** O Estado do Rio Grande do Sul é bastante afetado pelas condições de meteorologia, pois não há muitas barragens para a irrigação. A cultura do arroz é a menos afetada, pois o produtor se assegura em ter água disponível para irrigação suplementar, seja em uma barragem ou em um manancial. Inclusive, os anos de seca, de La Niña por exemplo, com muita insolação, pouca nebulosidade e pouca chuva, para o arroz é o ideal. São anos de alta produtividade. Se ocorrerem problemas de irrigação, no entanto, vai haver redução de produtividade.

A velocidade de evaporação em uma lavoura é muito rápida. A temperatura em um dia de sol chega a 38 °C. O vento auxilia, pois tem o efeito de arraste da água de superfície das folhas e da lâmina d'água. A umidade do ar não impacta tanto na perda de água, mas traz problemas de ordem sanitária, como doenças fúngicas que podem atacar as plantas.

**Pergunta 13:** Em termos de área cultivada, o que o senhor considera lavoura pequena, média e grande?

**Resposta:** Os pequenos produtores ficam entre 5 ha e 20 ha. Áreas em torno de 100 ha são associadas a um produtor médio-pequeno. Existem lavouras grandes que chegam a 1000 ha, outras de 5000 ha, mas estas são exceção.

**Pergunta 14:** Quais são os maiores problemas encontrados hoje na realidade dos produtores em relação à irrigação?

**Resposta:** Hoje faltam aguadores no mercado de trabalho, sendo que muitos aposentados estão retornando para suprir a demanda, pois os jovens não se interessam pela atividade. Outro problema são os roubos de equipamentos: transformador, bomba e motor. Estes roubos são um transtorno e um prejuízo, pois além do custo de comprar outro equipamento, tem a questão de perder o sistema de irrigação por alguns dias, até semanas. O produtor precisa achar uma outra alternativa neste período.

**Pergunta 15:** A automatização da operação das bombas seria uma solução para o produtor?

**Resposta:** Eu considero uma tendência automatizar as instalações. Talvez os pequenos produtores não tenham recursos para investir nisto, mas os grandes produtores se interessam por um controle que diminua o consumo de energia elétrica e também por esta questão de falta de aguadores.

## B.2 DOUTORA EM FITOTECNICA, COM ÊNFASE EM AGROMETEOROLOGIA

**Pergunta 1:** Baseado no seu conhecimento, qual é o impacto (muito baixo, baixo, médio, alto, muito alto) das variáveis abaixo sobre a necessidade de irrigação das lavouras de arroz?

- a) precipitação/chuva
- b) evaporação/insolação
- c) vento
- d) temperatura
- e) umidade

**Resposta:** Segundo Voltolini et al., (2002) para obter uma estimativa da necessidade de água pela lavoura de arroz, pode-se subdividi-la em três partes: i) água para saturação do solo e formação da lâmina; ii) para suprir a

evapotranspiração; e, iii) para compensar as perdas na condução, infiltração profunda, infiltração lateral e escoamento superficial.

Os itens i e iii são diretamente relacionados ao tipo de solo e as questões de como foi feito o preparo do solo para o plantio (altura e compactação das taipas). O segundo item (ii) é o que diz respeito às condições meteorológicas.

A evapotranspiração pode ser definida como o processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera por evaporação da água e por transpiração das plantas. As variáveis meteorológicas que influenciam na evapotranspiração são radiação solar/insolação, a velocidade do vento, a umidade relativa e a temperatura. Em termos de contribuição relativa das variáveis meteorológicas as referências bibliográficas mostram que a radiação solar contribui em 80% (fonte de energia), a temperatura e umidade relativa do ar juntas respondem por 6% e a velocidade do vento por 14%.

Assim, colocaria em grau de importância:

- a) precipitação/chuva- alto (repor o que foi perdido pela evapotranspiração)
- b) evaporação - muito alto
- c) vento - alto
- d) temperatura do ar - médio
- e) umidade - médio
- f) radiação solar - muito alto

**Pergunta 2:** Há outras variáveis não citadas acima que merecem atenção? Quais? E qual seu impacto?

**Resposta:** Seria interessante incluir radiação solar e separar de evaporação.

**Pergunta 3:** Tomando como base as médias históricas destas variáveis durante a safra, se houver uma variação para mais ou para menos, qual seria esta variação para sentirmos diferença no volume acumulado na lavoura e a necessidade de aumentar a quantidade de irrigação (aumentar o tempo de bomba ligada, por exemplo, ou até instalar outra bomba) ou a necessidade de diminuir a quantidade de irrigação (deixar a bomba desligada mais tempo)? (em termos percentuais %)

- a) precipitação/chuva
- b) evaporação/insolação



- c) vento
- d) temperatura
- e) umidade
- f) outras:

**Resposta:** Não saberia quantificar em percentuais, mas deve-se considerar os cenários:

a) Maior consumo de água - Safras com menor precipitação e conseqüentemente com maior disponibilidade de radiação solar. Se a irrigação suprir as necessidades da cultura são alcançadas as maiores produtividades (maior produção de grãos de arroz irrigado).

b) Menor consumo de água - Safras com maior disponibilidade de precipitação e menor disponibilidade de radiação solar. Mesmo com irrigação adequada a produção de grãos é menor em função de que o arroz para poder expressar todo seu potencial produtivo necessita de elevados índices de radiação solar.

Cabe ressaltar que um dos fenômenos meteorológicos que mais influenciam a produção de grãos de arroz irrigado no RS e o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) em suas fases quente (El Niño) e Fria (La Niña). Via de regra o fenômeno, tanto em sua fase quente como na fase fria, apresenta maiores impactos nos trimestres de primavera-verão (coincidindo com o período de cultivo do arroz). Segundo Carmona & Berlato (2002), os eventos El Niño são desfavoráveis para a cultura do arroz irrigado em 53% dos casos e os eventos La Niña são favoráveis à cultura do arroz em 60% dos casos. A menor disponibilidade de insolação, associada ao aumento de precipitação pluvial, que ocorre no período outubro a fevereiro é uma das causas do evento El Niño ser desfavorável à cultura do arroz irrigado. Já para a La Niña, a maior frequência de eventos favoráveis, pode ser creditada, em parte, aos altos índices de insolação relativa verificados principalmente nos meses de outubro, novembro e dezembro. Resultados semelhantes foram encontrados por Mota (1999) para a região de Pelotas.

### B.3 MESTRE EM AGRONOMIA, COM ÊNFASE EM SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

**Pergunta 1:** Na sua opinião, o quadro de Rezende (1986) que correlaciona qualitativamente os tipos de solos e sua característica de drenagem é válido? (Tabela em anexo)

**Resposta:** Em relação ao Quadro proposto por Rezende (1986) com as classes de solos e respectivas classes de drenagem posso dizer que a correspondência está bem feita, fiz pequenas sugestões de ajustes em vermelho no Quadro B.1.

Quadro B.1 – Classificação dos solos quanto ao seu tipo de drenagem

Tipos de Solo	Drenagem Boa	Drenagem Media	Drenagem Ruim	Drenagem Muito Ruim
Argissolos	X	X		
Cambissolos		X		
Nitossolos	X			
Neossolos	X			
Organossolos			X	
Chernossolos		X		
Luvissolos			X	
Vertissolos			X	
Gleissolos			X	X
Hidromorficos			X	X
Plintossolos			X	
Planossolos			X	
Organossolos				X
Vertisolos			X	
<b>Latossolos</b>	<b>X</b>			

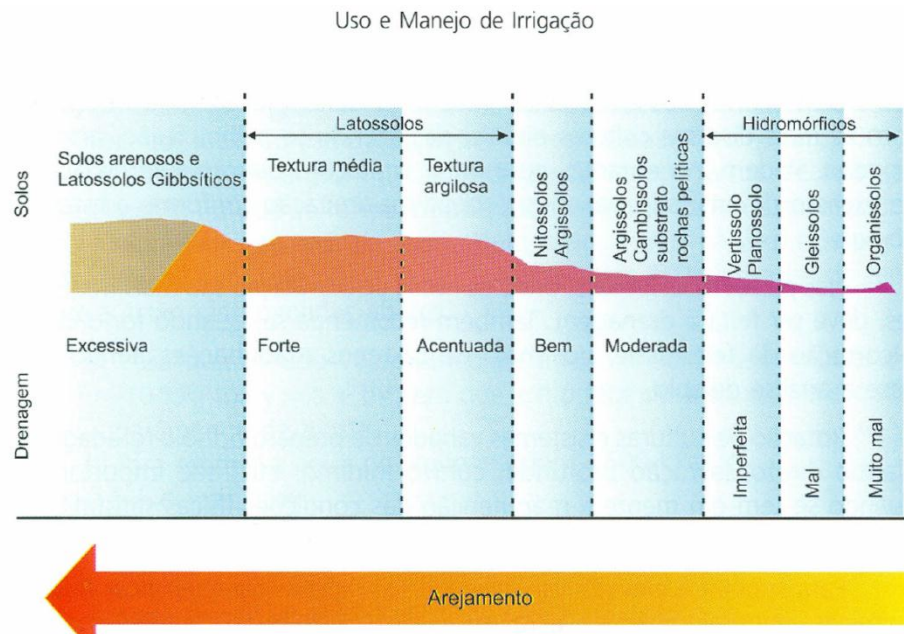
Fonte: Rezende, 1986.

**Pergunta 2:** Conforme pesquisa prévia, o arroz irrigado é cultivado em solos de várzea, ou solos hidromórficos. Há alguma classificação e valores quantitativos de drenagem para estes solos?

**Resposta:** Solos Hidromórficos ou de caráter hidromórfico é uma designação genérica, uma característica, que ocorre em muitos tipos de solos como os

Gleissolos por exemplo, que são os mais hidromórficos juntamente com os Organossolos (solos mal drenados). Segue Figura B.1, sobre a classificação de solos proposta por Rezende (1986).

Figura B.1 - Classificação dos solos quanto ao seu tipo de drenagem



Fonte: Rezende, 1986.

**Pergunta 3:** Os dados de solos serão extraídos do mapa de solos online da Embrapa - <http://mapas.cnpm.embrapa.br/somabrasil/webgis.html> - O senhor concorda com esta classificação?

**Resposta:** Segundo a última edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), as classes de solos atuais para o primeiro nível categórico de classificação são 13: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos, Vertissolos.



## APÊNDICE C – ALGORITMO FUZZY

```
//Controlador Lavoura

[System]
Name='LAVOURA2'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=27
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='ÁREA-[ha]'
Range=[0 1000]
NumMFs=3
MF1='Pequena':'trapmf',[-1 0 30 150]
MF2='Média':'trapmf',[30 150 200 400]
MF3='Grande':'trapmf',[200 400 1000 1100]

[Input2]
Name='ALTURA-LÂMINA-[cm]'
Range=[0 20]
NumMFs=3
MF1='Controlada':'trapmf',[0.5 4.5 5 10]
MF2='Não-controlada':'trapmf',[4.5 10 20 22]
MF3='Solo-Saturado':'trapmf',[-1 0 0.5 4.5]

[Input3]
Name='PERDAS-SOLO-[mm/dia]'
Range=[0 30]
NumMFs=3
MF1='Muito-Lenta':'trapmf',[-1 0 2 5]
MF2='Lenta':'trapmf',[2 5 7 12]
MF3='Rápida':'trapmf',[7 12 30 100]

[Output1]
Name='INDICADOR-LAVOURA'
Range=[0 1]
NumMFs=5
MF1='Necessidade-Pequena':'trimf',[0.1 0.3 0.5]
MF2='Necessidade-Média':'trimf',[0.3 0.5 0.7]
MF3='Necessidade-Grande':'trimf',[0.5 0.7 0.9]
MF4='Necessidade-Muito-Pequena':'trapmf',[-1 0 0.1 0.3]
MF5='Necessidade-Muito-Grande':'trapmf',[0.7 0.9 1 1.1]

[Rules]
1 3 1, 4 (1) : 1
1 3 2, 1 (1) : 1
1 3 3, 1 (1) : 1
```

```

1 1 1, 4 (1) : 1
1 1 2, 1 (1) : 1
1 1 3, 2 (1) : 1
1 2 1, 1 (1) : 1
1 2 2, 2 (1) : 1
1 2 3, 3 (1) : 1
2 3 1, 4 (1) : 1
2 3 2, 1 (1) : 1
2 3 3, 2 (1) : 1
2 1 1, 1 (1) : 1
2 1 2, 2 (1) : 1
2 1 3, 3 (1) : 1
2 2 1, 2 (1) : 1
2 2 2, 3 (1) : 1
2 2 3, 5 (1) : 1
3 3 1, 1 (1) : 1
3 3 2, 2 (1) : 1
3 3 3, 3 (1) : 1
3 1 1, 2 (1) : 1
3 1 2, 3 (1) : 1
3 1 3, 5 (1) : 1
3 2 1, 3 (1) : 1
3 2 2, 5 (1) : 1
3 2 3, 5 (1) : 1

```

```
//Controlador Meteorológico
```

```

[System]
Name='METEOROLOGICO2'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=27
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='EVAPORAÇÃO-[mm]'
Range=[0 5]
NumMFs=3
MF1='Média': 'trapmf', [1 2.5 3 4]
MF2='Baixa': 'trapmf', [-1 0 1 2.5]
MF3='Alta': 'trapmf', [3 4 5 6]

[Input2]
Name='PRECIPITAÇÃO-[mm]'
Range=[0 10]
NumMFs=3
MF1='Baixa': 'trapmf', [-1 0 1.5 4]
MF2='Alta': 'trapmf', [4.5 7 10 12]
MF3='Média': 'trapmf', [1.5 4 4.5 7]

```

```

[Input3]
Name='VENTO-MÉDIO-[m/s] '
Range=[0 6]
NumMFs=3
MF1='Baixo':'trapmf',[-0.6 0 1 2.1]
MF2='Médio':'trapmf',[1 2.1 2.4 4]
MF3='Alto':'trapmf',[2.4 4 6 6.6]

[Output1]
Name='INDICADOR-METEOROLOGICO '
Range=[0 1]
NumMFs=5
MF1='Necessidade-Baixa':'trimf',[0.1 0.3 0.5]
MF2='Necessidade-Média':'trimf',[0.3 0.5 0.7]
MF3='Necessidade-Alta':'trimf',[0.5 0.7 0.9]
MF4='Necessidade-Muito-Baixa':'trapmf',[-0.1 0 0.1 0.3]
MF5='Necessidade-Muito-Alta':'trapmf',[0.7 0.9 1 1.1]

[Rules]
2 2 1, 4 (1) : 1
2 2 2, 4 (1) : 1
2 2 3, 1 (1) : 1
2 3 1, 4 (1) : 1
2 3 2, 1 (1) : 1
2 3 3, 2 (1) : 1
2 1 1, 1 (1) : 1
2 1 2, 2 (1) : 1
2 1 3, 3 (1) : 1
1 2 1, 1 (1) : 1
1 2 2, 1 (1) : 1
1 2 3, 2 (1) : 1
1 3 1, 1 (1) : 1
1 3 2, 2 (1) : 1
1 3 3, 3 (1) : 1
1 1 1, 2 (1) : 1
1 1 2, 3 (1) : 1
1 1 3, 5 (1) : 1
3 2 1, 1 (1) : 1
3 2 2, 2 (1) : 1
3 2 3, 3 (1) : 1
3 3 1, 2 (1) : 1
3 3 2, 3 (1) : 1
3 3 3, 5 (1) : 1
3 1 1, 3 (1) : 1
3 1 2, 5 (1) : 1
3 1 3, 5 (1) : 1

//Controlador Instalação

[System]
Name='INSTALOK'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=5

```

```
NumOutputs=1
NumRules=130
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'
```

```
[Input1]
```

```
Name='ALT-LEV-[m] '
Range=[0 50]
NumMFs=3
MF1='Várzea':'trapmf',[-1 0 5 17.5]
MF2='Média':'trimf',[5 17.5 30]
MF3='Alta':'trapmf',[17.5 30 50 70]
```

```
[Input2]
```

```
Name='COMP-TUB-[m] '
Range=[0 100]
NumMFs=3
MF1='Curta':'trapmf',[-10 0 10 35]
MF2='Média':'trimf',[10 30 60]
MF3='Longa':'trapmf',[20 60 100 120]
```

```
[Input3]
```

```
Name='EF-BOMBA'
Range=[0 1]
NumMFs=3
MF1='Baixa':'trapmf',[-0.1 0 0.5 0.7]
MF2='Média':'trapmf',[0.5 0.7 0.7 0.85]
MF3='Alta':'trapmf',[0.7 0.85 1 1.1]
```

```
[Input4]
```

```
Name='EF-MOTOR'
Range=[0 1]
NumMFs=3
MF1='Recond/Obsoleto':'trapmf',[-0.1 0 0.65 0.83]
MF2='Padrão':'trapmf',[0.65 0.83 0.83 0.95]
MF3='Alta-Ef':'trapmf',[0.83 0.95 1 1.1]
```

```
[Input5]
```

```
Name='PERDA-TUB'
Range=[0 1]
NumMFs=3
MF1='Baixo':'trapmf',[-0.1 0 0.01 0.05]
MF2='Aceitável':'trapmf',[0.01 0.05 0.05 0.1]
MF3='Grande/Inaceitável':'trapmf',[0.05 0.1 1 1.1]
```

```
[Output1]
```

```
Name='INDICADOR-INSTAL'
Range=[0 1]
NumMFs=5
MF1='Consumo-Peq':'trimf',[0.1 0.3 0.5]
MF2='Consumo-Medio':'trimf',[0.3 0.5 0.7]
MF3='Consumo-Grande':'trimf',[0.5 0.7 0.9]
MF4='Consumo-Muito-Peq':'trapmf',[-0.1 0 0.1 0.3]
```



```
MF5='Consumo-Muito-Grande': 'trapmf', [0.7 0.9 1 1.1]
```

```
[Rules]
```

```
1 1 3 3 1, 4 (1) : 1
2 1 3 3 1, 4 (1) : 1
3 1 3 3 1, 1 (1) : 1
1 2 3 3 1, 4 (1) : 1
2 2 3 3 1, 1 (1) : 1
3 2 3 3 1, 1 (1) : 1
1 3 3 3 1, 1 (1) : 1
2 3 3 3 1, 2 (1) : 1
3 3 3 3 1, 2 (1) : 1
1 1 2 3 1, 1 (1) : 1
2 1 2 3 1, 1 (1) : 1
3 1 2 3 1, 2 (1) : 1
1 2 2 3 1, 1 (1) : 1
2 2 2 3 1, 2 (1) : 1
3 2 2 3 1, 2 (1) : 1
1 3 2 3 1, 2 (1) : 1
2 3 2 3 1, 3 (1) : 1
3 3 2 3 1, 3 (1) : 1
1 1 1 3 1, 2 (1) : 1
2 1 1 3 1, 2 (1) : 1
3 1 1 3 1, 3 (1) : 1
1 2 1 3 1, 2 (1) : 1
2 2 1 3 1, 3 (1) : 1
3 2 1 3 1, 3 (1) : 1
1 3 1 3 1, 3 (1) : 1
2 3 1 3 1, 3 (1) : 1
3 3 1 3 1, 5 (1) : 1
1 1 3 2 1, 1 (1) : 1
2 1 3 2 1, 1 (1) : 1
3 1 3 2 1, 2 (1) : 1
1 2 3 2 1, 1 (1) : 1
2 2 3 2 1, 2 (1) : 1
3 2 3 2 1, 2 (1) : 1
1 3 3 2 1, 2 (1) : 1
2 3 3 2 1, 3 (1) : 1
3 3 3 2 1, 3 (1) : 1
1 1 2 2 1, 2 (1) : 1
2 1 2 2 1, 2 (1) : 1
3 1 2 2 1, 3 (1) : 1
1 2 2 2 1, 2 (1) : 1
2 2 2 2 1, 3 (1) : 1
3 2 2 2 1, 3 (1) : 1
1 3 2 2 1, 3 (1) : 1
2 3 2 2 1, 5 (1) : 1
3 3 2 2 1, 5 (1) : 1
1 1 1 2 1, 3 (1) : 1
2 1 1 2 1, 3 (1) : 1
3 1 1 2 1, 5 (1) : 1
1 2 1 2 1, 3 (1) : 1
2 2 1 2 1, 5 (1) : 1
3 2 1 2 1, 5 (1) : 1
1 3 1 2 1, 5 (1) : 1
2 3 1 2 1, 5 (1) : 1
```

3 3 1 2 1, 5 (1) : 1  
1 1 3 1 1, 2 (1) : 1  
2 1 3 1 1, 2 (1) : 1  
3 1 3 1 1, 3 (1) : 1  
1 2 3 1 1, 2 (1) : 1  
2 2 3 1 1, 3 (1) : 1  
3 2 3 1 1, 3 (1) : 1  
1 3 3 1 1, 3 (1) : 1  
2 3 3 1 1, 5 (1) : 1  
3 3 3 1 1, 5 (1) : 1  
1 1 2 1 1, 3 (1) : 1  
2 1 2 1 1, 3 (1) : 1  
3 1 2 1 1, 5 (1) : 1  
1 2 2 1 1, 3 (1) : 1  
2 2 2 1 1, 5 (1) : 1  
3 2 2 1 1, 5 (1) : 1  
1 3 2 1 1, 5 (1) : 1  
2 3 2 1 1, 5 (1) : 1  
3 3 2 1 1, 5 (1) : 1  
0 0 1 1 0, 5 (1) : 1  
1 1 3 3 2, 1 (1) : 1  
2 1 3 3 2, 1 (1) : 1  
3 1 3 3 2, 2 (1) : 1  
1 2 3 3 2, 1 (1) : 1  
2 2 3 3 2, 2 (1) : 1  
3 2 3 3 2, 2 (1) : 1  
1 3 3 3 2, 2 (1) : 1  
2 3 3 3 2, 3 (1) : 1  
3 3 3 3 2, 3 (1) : 1  
1 1 2 3 2, 2 (1) : 1  
2 1 2 3 2, 2 (1) : 1  
3 1 2 3 2, 3 (1) : 1  
1 2 2 3 2, 2 (1) : 1  
2 2 2 3 2, 3 (1) : 1  
3 2 2 3 2, 3 (1) : 1  
1 3 2 3 2, 3 (1) : 1  
2 3 2 3 2, 5 (1) : 1  
3 3 2 3 2, 5 (1) : 1  
1 1 1 3 2, 3 (1) : 1  
2 1 1 3 2, 3 (1) : 1  
3 1 1 3 2, 5 (1) : 1  
1 2 1 3 2, 3 (1) : 1  
2 2 1 3 2, 5 (1) : 1  
3 2 1 3 2, 5 (1) : 1  
1 3 1 3 2, 5 (1) : 1  
2 3 1 3 2, 5 (1) : 1  
3 3 1 3 2, 5 (1) : 1  
1 1 3 2 2, 2 (1) : 1  
2 1 3 2 2, 2 (1) : 1  
3 1 3 2 2, 3 (1) : 1  
1 2 3 2 2, 2 (1) : 1  
2 2 3 2 2, 3 (1) : 1  
3 2 3 2 2, 3 (1) : 1  
1 3 3 2 2, 3 (1) : 1  
2 3 3 2 2, 5 (1) : 1  
3 3 3 2 2, 5 (1) : 1

```

1 1 2 2 2, 3 (1) : 1
2 1 2 2 2, 3 (1) : 1
3 1 2 2 2, 5 (1) : 1
1 2 2 2 2, 3 (1) : 1
2 2 2 2 2, 5 (1) : 1
3 2 2 2 2, 5 (1) : 1
1 3 2 2 2, 5 (1) : 1
2 3 2 2 2, 5 (1) : 1
3 3 2 2 2, 5 (1) : 1
0 0 1 2 2, 5 (1) : 1
1 1 3 1 2, 3 (1) : 1
2 1 3 1 2, 3 (1) : 1
3 1 3 1 2, 5 (1) : 1
1 2 3 1 2, 3 (1) : 1
2 2 3 1 2, 5 (1) : 1
3 2 3 1 2, 5 (1) : 1
1 3 3 1 2, 5 (1) : 1
2 3 3 1 2, 5 (1) : 1
3 3 3 1 2, 5 (1) : 1
0 0 2 1 2, 5 (1) : 1
0 0 0 0 3, 5 (1) : 1

```

```
//Controlador Consumo
```

```

[System]
Name='CONSUMO'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=125
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='METEOROLOGICO'
Range=[0 1]
NumMFs=5
MF1='Necessidade-Baixa':'trimf',[0.1 0.4 0.5]
MF2='Necessidade-Média':'trimf',[0.4 0.5 0.6]
MF3='Necessidade-Alta':'trimf',[0.5 0.6 0.9]
MF4='Necessidade-Muito-Baixa':'trapmf',[-0.1 0 0.1 0.4]
MF5='Necessidade-Muito-Alta':'trapmf',[0.6 0.9 1 1.1]

[Input2]
Name='LAVOURA'
Range=[0 1]
NumMFs=5
MF1='Necessidade-Baixa':'trimf',[0.1 0.4 0.5]
MF2='Necessidade-Média':'trimf',[0.4 0.5 0.6]
MF3='Necessidade-Alta':'trimf',[0.5 0.6 0.9]
MF4='Necessidade-Muito-Baixa':'trapmf',[-0.1 0 0.1 0.4]

```

```
MF5='Necessidade-Muito-Alta': 'trapmf', [0.6 0.9 1 1.1]
```

```
[Input3]
```

```
Name='INSTALAÇÃO'
```

```
Range=[0 1]
```

```
NumMFs=5
```

```
MF1='Consumo-Peq': 'trimf', [0.1 0.4 0.5]
```

```
MF2='Consumo-Medio': 'trimf', [0.4 0.5 0.6]
```

```
MF3='Consumo-Grande': 'trimf', [0.5 0.6 0.9]
```

```
MF4='Consumo-Muito-Peq': 'trapmf', [-0.1 0 0.1 0.4]
```

```
MF5='Consumo-Muito-Grande': 'trapmf', [0.6 0.9 1 1.1]
```

```
[Output1]
```

```
Name='PREVISÃO-CONSUMO'
```

```
Range=[0 1]
```

```
NumMFs=7
```

```
MF1='Consumo-Muito-Baixo': 'trapmf', [-0.1 0 0.1 0.25]
```

```
MF2='Consumo-Baixo': 'trimf', [0.1 0.25 0.4]
```

```
MF3='Consumo-Baixo-Médio': 'trimf', [0.25 0.4 0.5]
```

```
MF4='Consumo-Médio': 'trimf', [0.4 0.5 0.6]
```

```
MF5='Consumo-Médio-Alto': 'trimf', [0.5 0.6 0.75]
```

```
MF6='Consumo-Alto': 'trimf', [0.6 0.75 0.9]
```

```
MF7='Consumo-Muito-Alto': 'trapmf', [0.8 0.9 1 1.1]
```

```
[Rules]
```

```
4 4 4, 1 (1) : 1
```

```
4 4 1, 1 (1) : 1
```

```
4 4 2, 2 (1) : 1
```

```
4 4 3, 2 (1) : 1
```

```
4 4 5, 3 (1) : 1
```

```
4 1 4, 1 (1) : 1
```

```
4 1 1, 2 (1) : 1
```

```
4 1 2, 2 (1) : 1
```

```
4 1 3, 3 (1) : 1
```

```
4 1 5, 3 (1) : 1
```

```
4 2 4, 2 (1) : 1
```

```
4 2 1, 2 (1) : 1
```

```
4 2 2, 3 (1) : 1
```

```
4 2 3, 3 (1) : 1
```

```
4 2 5, 4 (1) : 1
```

```
4 3 4, 2 (1) : 1
```

```
4 3 1, 3 (1) : 1
```

```
4 3 2, 3 (1) : 1
```

```
4 3 3, 4 (1) : 1
```

```
4 3 5, 5 (1) : 1
```

```
4 5 4, 3 (1) : 1
```

```
4 5 1, 3 (1) : 1
```

```
4 5 2, 4 (1) : 1
```

```
4 5 3, 5 (1) : 1
```

```
4 5 5, 5 (1) : 1
```

```
1 4 4, 1 (1) : 1
```

```
1 4 1, 2 (1) : 1
```

```
1 4 2, 2 (1) : 1
```

```
1 4 3, 3 (1) : 1
```

```
1 4 5, 3 (1) : 1
```

```
1 1 4, 2 (1) : 1
```

1 1 1, 2 (1) : 1  
 1 1 2, 3 (1) : 1  
 1 1 3, 3 (1) : 1  
 1 1 5, 4 (1) : 1  
 1 2 4, 2 (1) : 1  
 1 2 1, 3 (1) : 1  
 1 2 2, 3 (1) : 1  
 1 2 3, 4 (1) : 1  
 1 2 5, 5 (1) : 1  
 1 3 4, 3 (1) : 1  
 1 3 1, 3 (1) : 1  
 1 3 2, 4 (1) : 1  
 1 3 3, 5 (1) : 1  
 1 3 5, 5 (1) : 1  
 1 3 4, 3 (1) : 1  
 1 3 1, 4 (1) : 1  
 1 3 2, 5 (1) : 1  
 1 3 3, 5 (1) : 1  
 1 3 5, 6 (1) : 1  
 2 4 4, 2 (1) : 1  
 2 4 1, 2 (1) : 1  
 2 4 2, 3 (1) : 1  
 2 4 3, 3 (1) : 1  
 2 4 5, 4 (1) : 1  
 2 1 4, 2 (1) : 1  
 2 1 1, 3 (1) : 1  
 2 1 2, 3 (1) : 1  
 2 1 3, 4 (1) : 1  
 2 1 5, 5 (1) : 1  
 2 2 4, 3 (1) : 1  
 2 2 1, 3 (1) : 1  
 2 2 2, 4 (1) : 1  
 2 2 3, 5 (1) : 1  
 2 2 5, 5 (1) : 1  
 2 3 4, 3 (1) : 1  
 2 3 1, 4 (1) : 1  
 2 3 2, 5 (1) : 1  
 2 3 3, 5 (1) : 1  
 2 3 5, 6 (1) : 1  
 2 5 4, 4 (1) : 1  
 2 5 1, 5 (1) : 1  
 2 5 2, 5 (1) : 1  
 2 5 3, 6 (1) : 1  
 2 5 5, 6 (1) : 1  
 3 4 4, 2 (1) : 1  
 3 4 1, 3 (1) : 1  
 3 4 2, 3 (1) : 1  
 3 4 3, 4 (1) : 1  
 3 4 5, 5 (1) : 1  
 3 1 4, 3 (1) : 1  
 3 1 1, 3 (1) : 1  
 3 1 2, 4 (1) : 1  
 3 1 3, 5 (1) : 1  
 3 1 5, 5 (1) : 1  
 3 2 4, 3 (1) : 1  
 3 2 1, 4 (1) : 1

3 2 2, 5 (1) : 1  
3 2 3, 5 (1) : 1  
3 2 5, 6 (1) : 1  
3 3 4, 4 (1) : 1  
3 3 1, 5 (1) : 1  
3 3 2, 5 (1) : 1  
3 3 3, 6 (1) : 1  
3 3 5, 6 (1) : 1  
3 5 4, 5 (1) : 1  
3 5 1, 5 (1) : 1  
3 5 2, 6 (1) : 1  
3 5 3, 6 (1) : 1  
3 5 5, 7 (1) : 1  
5 4 4, 3 (1) : 1  
5 4 1, 3 (1) : 1  
5 4 2, 4 (1) : 1  
5 4 3, 5 (1) : 1  
5 4 5, 5 (1) : 1  
5 1 4, 3 (1) : 1  
5 1 1, 4 (1) : 1  
5 1 2, 5 (1) : 1  
5 1 3, 5 (1) : 1  
5 1 5, 6 (1) : 1  
5 2 4, 4 (1) : 1  
5 2 1, 5 (1) : 1  
5 2 2, 5 (1) : 1  
5 2 3, 6 (1) : 1  
5 2 5, 6 (1) : 1  
5 3 4, 5 (1) : 1  
5 3 1, 5 (1) : 1  
5 3 2, 6 (1) : 1  
5 3 3, 6 (1) : 1  
5 3 5, 7 (1) : 1  
5 5 4, 5 (1) : 1  
5 5 1, 6 (1) : 1  
5 5 2, 6 (1) : 1  
5 5 3, 7 (1) : 1  
5 5 5, 7 (1) : 1