

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

Vinícius André Uberti

**ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA PARA REDES
ELÉTRICAS RURAIS E CONSUMIDORES IRRIGANTES**

**Santa Maria, RS
2022**

Vinícius André Uberti

**ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA PARA REDES ELÉTRICAS RURAIS
E CONSUMIDORES IRRIGANTES**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado 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 **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alzenira da Rosa Abaide

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher

**Santa Maria, RS
2022**

Uberti, Vinícius André
ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA PARA REDES ELÉTRICAS
RURAIS E CONSUMIDORES IRRIGANTES / Vinícius André Uberti.
2022.
255 p.; 30 cm

Orientadora: Alzenira da Rosa Abaide
Coorientador: Luciano Lopes Pfitscher
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2022

1. Resposta da demanda 2. Redes elétricas rurais 3.
Consumidores irrigantes 4. Lógica fuzzy I. Abaide,
Alzenira da Rosa II. Pfitscher, Luciano Lopes III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, VINÍCIUS ANDRÉ UBERTI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Vinícius André Uberti

**ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA PARA REDES ELÉTRICAS RURAIS
E CONSUMIDORES IRRIGANTES**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Aprovada em 23 de Maio de 2022.

Alzenira da Rosa Abaide, Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

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

Laura Lisiane Callai dos Santos, Dr^a. (UFSM)

Paulo Ricardo da Silva Pereira, Dr. (UNISINOS, RS)

Rafael Gressler Milbradt, Dr. (UFSM)

Rodrigo Marques de Figueiredo, Dr. (UNISINOS, RS)

Santa Maria, RS
2022

"Um pássaro que repousa numa árvore nunca teme que o seu galho quebre,
porque a sua confiança não é no galho, mas nas suas próprias asas."

Autor desconhecido

AGRADECIMENTOS

São tantas pessoas que me ajudaram a estar aqui, que me fizeram crescer e ser uma pessoa melhor. Agradeço, inicialmente, a Deus e aos bons espíritos por terem me dado a capacidade de superar as dificuldades impostas e ter chegado até este momento tão importante em minha vida. Agradeço por terem colocado em meu caminho pessoas tão especiais, sem as quais eu não teria atingido este objetivo.

Agradeço a minha esposa, Eduarda, pelo amor e suporte prestados ao longo destes anos, por me incentivar e dar força para seguir, mesmo nos momentos de dúvida. Você é luz! Obrigado!

Agradeço a minha família, meus pais Sérgio e Claudia e minha irmã Adriane, por me darem uma base de educação tão sólida e me ensinarem os valores corretos. Muito obrigado por estarem sempre comigo!

Agradeço a minha orientadora, Profa. Dra. Alzenira da Rosa Abaide, pela confiança em meu trabalho, pela disposição em ajudar e pelo entendimento de minhas dificuldades e limitações. Muito obrigado, professora, por todo carinho!

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher, por sua dedicação e carinho com minha pessoa, pelo auxílio e pelas dicas a este trabalho. Obrigado de coração!

Aos professores que participaram de minha banca de qualificação e de minha banca de defesa, Profs. Drs. Laura Callai dos Santos, Karine Faverzani, Rafael Gressler Milbradt, Rodrigo Marques de Figueiredo e Paulo Ricardo da Silva Pereira, muito obrigado por sua disponibilidade e por todas suas contribuições a esta tese.

Agradeço ao meu amigo e orientado, Maurício Borges da Silva, por sua contribuição a esta tese com a programação do gerenciador. Muito obrigado pela ajuda e, principalmente, por sua amizade sincera.

A todos meus familiares, amigos, professores, colegas de trabalho e de estudo, encarnados ou não, que estiveram comigo ao longo destes anos e que, com certeza, contribuíram de todas as formas a este trabalho, deixo meu singelo agradecimento.

Enfim, gostaria de agradecer o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia com o projeto denominado “Sistema de Detecção de Perdas Não Técnicas em Áreas de Irrigação Empregando Técnicas de Inteligência Artificial” (desenvolvido sobre o programa de P&D da ANEEL PD-00063-3065/2020).

RESUMO

ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA PARA REDES ELÉTRICAS RURAIS E CONSUMIDORES IRRIGANTES

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

Redes rurais geralmente são compostas por alimentadores radiais de grandes extensões, situadas próximas à vegetação e, muitas vezes, em lugares ermos e com acesso dificultado. De forma geral, as redes rurais atendem a cargas sazonais, que operam apenas nos meses de safra, e possuem elevados níveis de perdas técnicas. Frequentemente, equipamentos destas redes encontram-se em sobrecarga, bem como observam-se ocorrências de transgressões dos limites regulatórios de tensão ao longo da rede. Inseridos nas redes rurais, os consumidores com instalações irrigantes de lavouras de arroz trazem suas próprias particularidades, como ausência de automatização, partida direta de grandes cargas e utilização de equipamentos precários, obsoletos ou mal dimensionados, o que potencializa a redução da qualidade de energia elétrica nestes alimentadores. Neste contexto, este trabalho propõe uma estrutura de resposta da demanda para redes rurais de distribuição de energia elétrica com concentração de consumidores irrigantes e comprova que esta pode contribuir para a qualidade de energia elétrica destas redes, reduzindo perdas técnicas, melhorando os níveis de tensão ao longo da rede e evitando transgressões dos limites de operação dos equipamentos. A estrutura de resposta da demanda proposta é composta por um controlador de irrigação e um gerenciador de resposta da demanda. O primeiro é desenvolvido através da lógica *fuzzy* e considera características da lavoura e variáveis de previsão do tempo para determinar a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba de irrigação. O gerenciador realiza o monitoramento dos parâmetros elétricos ao longo do alimentador rural e atua sobre os controladores de irrigação, em resposta a situações de transgressão dos limites operativos da rede rural, como sobrecarga nos circuitos alimentadores ou no transformador da subestação e transgressão dos limites de tensão. Testes realizados demonstram a redução média de perdas técnicas ao longo dos alimentadores rurais na ordem de 27%, assim como correções de tensões em situações precárias e redução significativa de sobrecargas dos equipamentos da subestação e da rede de distribuição. Outro resultado importante dá-se em termos de eficiência energética dos sistemas de irrigação das lavouras, em que as reduções de consumo partem de 49%, no horário fora de ponta, e 18%, no horário de tarifa incentivada, mesmo nas condições meteorológicas e de lavoura mais adversas.

Palavras-chave: Resposta da Demanda. Redes Elétricas Rurais. Consumidores Irrigantes. Lógica *Fuzzy*.

ABSTRACT

DEMAND RESPONSE STRUCTURE FOR RURAL ELECTRICAL GRIDS AND IRRIGANT CONSUMERS

AUTHOR: Vinícius André Uberti, MS
ADVISOR: Alzenira da Rosa Abaide, PhD
CO-ADVISOR: Luciano Lopes Pfitscher, PhD

Rural grids are composed by radial feeders of great extensions, are located close to the vegetation and, often, in uninhabited places and difficult access locations. In general, rural electrical grids feed seasonal loads, which operate only in the harvest months, and have high levels of technical losses. Often, equipment in these networks is overloaded, as well as the occurrence of transgressions of the operational limits of voltage measurements throughout the grid. Inserted in rural areas, consumers with irrigating rice crops bring their own particularities, such as the lack of automation, direct start of large loads and use of precarious, obsolete or poorly sized equipment, which enhances the reduction in the quality of electricity in these feeders. In this context, this work proposes a demand response structure to rural electricity distribution networks with a concentration of irrigation consumers and proves that demand response can contribute to the quality of energy on these grids, reducing technical losses, improving voltage levels long the grid and avoiding transgressions of operating limits of the equipment. The proposed structure is composed by an irrigating controller, located at the rice farms, and a demand response manager, which is located at the utility operational center. The irrigation controller is developed through the fuzzy logic and considers crop characteristics and weather forecast variables to determine the rotation speed of irrigation equipment. The demand response manager monitors the electrical parameters along the rural feeder and acts on the irrigation controllers, in response to situations of transgression of the rural network's operational limits, like feeders or transformer overload and voltage's limits transgressions. Results demonstrate technical losses along the grid mean reduction of 27%, as correction of voltage's precarious situations, and significant reduction of overload occurrence in substation and grid equipment. Another important result occurs in terms of energy efficiency of crop's irrigation systems, in which energy consumption reductions start from 49%, during off-peak tariff hours, and 18%, during the incentivized tariff hours, even in the most adverse weather and farming conditions.

Keywords: Demand Response. Rural Grids. Irrigating Consumers. Fuzzy Logic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Impacto da resposta da demanda nos custos da energia elétrica	46
Figura 2.2 – Produção média de arroz por região do RS na safra 2018/2019	51
Figura 2.3 – Arroz irrigado por inundação	52
Figura 2.4 – Canal de irrigação separado das parcelas de arroz por taipas ...	55
Figura 2.5 – Representação das perdas de água em uma lavoura de arroz irrigado	58
Figura 2.6 – Estrutura de um processo controlado por controlador <i>fuzzy</i>	61
Figura 2.7 – Exemplo de função de pertinência triangular	63
Figura 2.8 – Exemplo de função de pertinência trapezoidal	64
Figura 2.9 – Exemplos de funções de pertinência rampa	66
Figura 2.10 – Composição máximo dos mínimos	69
Figura 2.11 – <i>Defuzzyficação</i> pelo método do centroide	71
Figura 3.1 – Organização geral da estrutura de resposta da demanda	82
Figura 3.2 – Diagrama geral do controlador de irrigação	84
Figura 3.3 – Estrutura da modelagem <i>fuzzy</i>	85
Figura 3.4 – Variáveis de entrada	86
Figura 3.5 – Funções de pertinência da variável <i>Área Irrigada</i>	90
Figura 3.6 – Modelagem da variável <i>RD</i>	96
Figura 3.7 – Funções de pertinência da variável <i>Tarifa Horária</i>	98
Figura 3.8 – Variáveis de saída <i>Indicador Lavoura</i> e <i>Indicador Meteorológico</i>	100
Figura 3.9 – Variável de saída <i>Velocidade Bomba</i>	104
Figura 3.10 – Atuações do gerenciador de resposta da demanda	108
Figura 3.11 – Atuação em caso de sobrecarga do transformador	110
Figura 3.12 – Atuação em caso de sobrecarga em alimentador de distribuição rural	114
Figura 3.13 – Atuação em caso de subtensão	117
Figura 4.1 – Exemplo de visualização da variável <i>Velocidade Bomba</i> nas simulações	124
Figura 4.2 – Rede de distribuição de uma região produtora de arroz	141
Figura 4.3 – Curvas de carga inicial e com os controladores de irrigação no AL-1	147
Figura 4.4 – Perfis de tensão inicial e com os controladores de irrigação no AL-1	149
Figura 4.5 – Curvas de carga inicial e com controladores de irrigação no AL-2	152
Figura 4.6 – Perfis de tensão ao longo do AL-2 nos horários de maior carregamento	153

Figura 4.7 – Curvas de carga inicial e com controladores de irrigação no AL-3	156
Figura 4.8 – Perfis de tensão ao longo do AL-3 nos horários de maior carregamento	158
Figura 4.9 – Curvas de carga inicial e com controladores de irrigação no AL-4	160
Figura 4.10 – Perfis de tensão ao longo do AL-4 nos horários de maior carregamento	161
Figura 4.11 – Curvas de carga inicial e com os controladores de irrigação no AL-5	164
Figura 4.12 – Perfis de tensão ao longo do AL-5 nos horários de maior carregamento	165
Figura 4.13 – Visão geral da estrutura utilizada para as simulações	170
Figura 4.14 – Atuação do GRD para corrigir sobrecarga transformador subestação	173
Figura 4.15 – Detalhe do intervalo onde ocorreram atuações do GRD	174
Figura 4.16 – Atuação do GRD para corrigir baixa sobrecarga no AL-1	177
Figura 4.17 – Atuação do GRD para corrigir elevada sobrecarga no AL-1	178
Figura 4.18 – Atuação do GRD para corrigir baixa sobrecarga no AL-3	181
Figura 4.19 – Perfil de carga do AL-2 na atuação de subtensão do GRD	184
Figura 4.20 – Perfil de tensão no antigo horário de maior carregamento (6h) – AL-2	185
Figura 4.21 – Perfil de tensão no novo horário de maior carregamento (18h) – AL-2	186
Figura 4.22 – Perfil de carga do AL-4 na atuação de subtensão do GRD	187
Figura 4.23 – Perfil de tensão no horário de maior carregamento (9h) – AL-4	188
Figura A.1 – Exemplo de visualização da variável <i>Área Irrigada</i> nas simulações	211
Figura A.2 – Exemplo de visualização da variável <i>Delta Nível</i> nas simulações	211
Figura A.3 – Exemplo de visualização da variável <i>Permeabilidade do Solo</i> ...	212
Figura A.4 – Exemplo de visualização da variável <i>Temperatura</i> nas simulações	212
Figura A.5 – Exemplo de visualização da variável <i>Precipitação</i> nas simulações	213
Figura A.6 – Exemplo de visualização da variável <i>Velocidade Média do Vento</i>	213
Figura A.7 – Exemplo de visualização da variável <i>Gerenciador RD</i>	214
Figura A.8 – Exemplo de visualização da variável <i>Tarifa Horária</i> nas simulações	214
Figura A.9 – Exemplo de visualização da variável <i>Indicador Lavoura</i>	215
Figura A.10 – Exemplo de visualização da variável <i>Indicador Meteorológico</i> .	215

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Bancos de dados utilizados nesta tese	31
Quadro 2.1 – Compensações no RS em 2018	42
Quadro 2.2 – Programas de resposta da demanda baseadas em preço e em incentivo	48
Quadro 2.3 – Classificação dos solos quanto ao seu tipo de drenagem	59
Quadro 2.4 – Consistência entre condições e conclusões de regras <i>fuzzy</i>	68
Quadro 2.5 – Quadro-resumo dos trabalhos citados nesta tese	77
Quadro 3.1 – Níveis de execução de comandos do gerenciador	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Número de trabalhos relacionados com as palavras-chave desta tese	32
Tabela 2.1 – Levantamento dos indicadores de continuidade acumulados em 2018 dos conjuntos elétricos das principais regiões produtoras de arroz irrigado	40
Tabela 2.2 – Levantamento dos indicadores de continuidade acumulados em 2018 de conjuntos elétricos de regiões urbanas	41
Tabela 2.3 – Características gerais de irrigação do arroz no RS	54
Tabela 3.1 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Área Irrigada</i>	90
Tabela 3.2 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Delta Nível</i>	91
Tabela 3.3 – Funções e parâmetros da variável <i>Permeabilidade do Solo</i>	92
Tabela 3.4 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Precipitação</i>	93
Tabela 3.5 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Velocidade Média do Vento</i>	94
Tabela 3.6 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Temperatura do ar</i>	94
Tabela 3.7 – Modelagem da variável <i>RD</i>	95
Tabela 3.8 – Funções e parâmetros da variável <i>Tarifa horária</i>	97
Tabela 3.9 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Indicador Lavoura</i>	100
Tabela 3.10 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável <i>Velocidade Bomba</i>	105
Tabela 4.1 – Características das lavouras adotadas para os testes	121
Tabela 4.2 – Dados meteorológicos adotados para os testes	122
Tabela 4.3 – Resultados do controlador de irrigação para a Lavoura A	125
Tabela 4.4 – Teste de sensibilidade para a lavoura A e previsão de dia chuvoso	130
Tabela 4.5 – Variação percentual da velocidade, em relação à velocidade de referência, para a lavoura A e previsão de dia chuvoso	131
Tabela 4.6 – Resultados para a Lavoura A com comando de “Atenuar 1”	134
Tabela 4.7 – Resultados para a Lavoura A com comando de “Atenuar 2”	135

Tabela 4.8 – Reduções médias de velocidade provocadas pelos comandos de atenuação	136
Tabela 4.9 – Resultados dos comandos “Desligar Carga” e “Ligar Carga”	137
Tabela 4.10 – Percentuais de redução de potência de irrigação – Lavoura A ...	139
Tabela 4.11 – Características dos alimentadores rurais	142
Tabela 4.12 – Características das UCs consideradas nas simulações	144
Tabela 4.13 – Reduções de velocidade e demanda de irrigação das UCs controladas	146
Tabela 4.14 – Comparativo de perdas técnicas no AL-1	150
Tabela 4.15 – Comparativo de perdas técnicas no AL-2	155
Tabela 4.16 – Comparativo de perdas técnicas no AL-3	159
Tabela 4.17 – Comparativo de perdas técnicas no AL-4	162
Tabela 4.18 – Comparativo de perdas técnicas no AL-5	166
Tabela 4.19 – Resumo das alterações elétricas dos alimentadores a partir da atuação dos controladores de irrigação	167
Tabela 4.20 – Atenuações médias de demanda consideradas no gerenciador .	171
Tabela B.1 – Resultados do controlador de irrigação para a Lavoura B	217
Tabela B.2 – Resultados do controlador de irrigação para a Lavoura C	218
Tabela C.1 – Teste de sensibilidade para a lavoura B e previsão de dia seco ..	219
Tabela C.2 – Teste de sensibilidade para a lavoura C e previsão de dia muito seco	219
Tabela C.3 – Variação percentual da velocidade, em relação à velocidade de referência, para a lavoura B e previsão de dia seco	220
Tabela C.4 – Variação percentual da velocidade, em relação à velocidade de referência, para lavoura C e previsão de dia muito seco	220
Tabela D.1 – Resultados para a Lavoura B com comando de “Atenuar 1”	221
Tabela D.2 – Resultados para a Lavoura B com comando de “Atenuar 2”	222
Tabela D.3 – Resultados para a Lavoura C com comando de “Atenuar 1”	223
Tabela D.4 – Resultados para a Lavoura C com comando de “Atenuar 2”	224
Tabela E.1 – Percentuais de redução de potência de irrigação – Lavoura B	225
Tabela E.2 – Percentuais de redução de potência de irrigação – Lavoura C	226

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CI	Controlador de Irrigação
COD	Centro de Operação da Distribuição
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPP	<i>Critical Peak Pricing</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora
DRC	Duração Relativa de Transgressão de Tensão Crítica
DRP	Duração Relativa de Transgressão de Tensão Precária
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETD	<i>Electronic Theses and Dissertations</i>
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora
GRD	Gerenciador de Resposta da Demanda
HEMS	<i>Home Energy Management System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IRGA	Instituto Rio-Grandense do Arroz
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MEC	Ministério da Educação
MT	Média Tensão
NDLTD	<i>Networked Digital Library of Theses and Dissertations</i>
PEE	Programa de Eficiência Energética
PID	Proporcional Integral Diferencial
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

p.u.	Por Unidade
RD	Resposta da Demanda
REI	Rede Elétrica Inteligente
ROL	Receita Operacional Líquida
RS	Rio Grande do Sul
RTP	<i>Real Time Pricing</i>
SE	Subestação de distribuição
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
SOSBAI	Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado
TOU	<i>Time Of Use</i>
TR	Transformador
UC	Unidade Consumidora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	JUSTIFICATIVA	28
1.2	OBJETIVOS	30
1.3	INEDITISMO E CONTRIBUIÇÕES	30
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1	CARACTERIZAÇÃO DAS REDES RURAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	35
2.1.1	Qualidade do produto	37
2.1.2	Qualidade do serviço	38
2.1.3	Eficiência energética	42
2.2	RESPOSTA DA DEMANDA	45
2.3	CARACTERÍSTICAS DE IRRIGAÇÃO DE LAVOURAS DE ARROZ	50
2.3.1	Irrigação Suplementar	53
2.3.2	Agrometeorologia	56
2.3.3	Características do Solo	58
2.4	CONTROLADORES FUZZY	60
2.4.1	Fuzzyficação	62
2.4.1.1	Função de pertinência triangular	63
2.4.1.2	Função de pertinência trapezoidal	64
2.4.1.3	Funções de pertinência rampa	65
2.4.2	Base de conhecimento – conjunto de regras	66
2.4.3	Inferência <i>fuzzy</i>	68
2.4.4	Defuzzyficação	70
2.5	COMPUTAÇÃO DE BORDA	71
2.6	TRABALHOS CORRELATOS E ESTADO DA ARTE	73
2.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	78
3	PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA EM REDES ELÉTRICAS RURAIS	81
3.1	APRESENTAÇÃO GERAL DA ESTRUTURA PROPOSTA	81

3.2	MODELAGEM DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO	83
3.2.1	Informações de entrada	86
3.2.2	Fuzzyficação das variáveis de entrada	88
3.2.2.1	Área Irrigada	89
3.2.2.2	Delta Nível	91
3.2.2.3	Permeabilidade do Solo	91
3.2.2.4	Precipitação	92
3.2.2.5	Velocidade Média do Vento	93
3.2.2.6	Temperatura do ar	94
3.2.2.7	Resposta da Demanda (RD).....	95
3.2.3.8	Tarifa horária.....	97
3.2.3	Inferência fuzzy	98
3.2.3.1	Inferência Lavoura (LavControl).....	99
3.2.3.2	Inferência Previsão Meteorológica (MetControl).....	101
3.2.3.3	Inferência Irrigação (IrrigControl)	101
3.2.3.4	Princípios norteadores para a criação do conjunto de regras	102
3.2.4	Defuzzyficação e interpretação dos resultados	104
3.3	MODELAGEM DO GERENCIADOR DE RESPOSTA DA DEMANDA	105
3.3.1	Atuação em caso de sobrecarga do transformador da subestação ...	109
3.3.2	Atuação em caso de sobrecarga no alimentador	113
3.3.3	Atuação em caso de transgressão de tensão da rede de distribuição rural	116
3.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO	118
4	VALIDAÇÃO DA TESE E RESULTADOS	121
4.1	DADOS DE LAVOURAS E DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS .	121
4.2	FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO	123
4.2.1	Verificação de funcionamento	123
4.2.2	Análise de sensibilidade	129
4.2.3	Verificação do comportamento sob atuação do GRD	132
4.3	POSSÍVEIS GANHOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA IRRIGAÇÃO .	138
4.4	CARACTERIZAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS RURAIS UTILIZADAS ...	140
4.5	IMPACTOS DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS RURAIS	145

4.5.1	Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 1	146
4.5.2	Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 2	152
4.5.3	Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 3	156
4.5.4	Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 4	159
4.5.5	Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 5	163
4.5.6	Considerações sobre os impactos do controlador de irrigação em redes elétricas rurais	167
4.6	FUNCIONAMENTO DA ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA	169
4.6.1	Atuação em caso de sobrecarga do transformador da subestação	172
4.6.2	Atuação em caso de sobrecarga no alimentador	175
4.6.2.1	Transgressões em alimentador com grande parcela de demanda controlável	176
4.6.2.2	Transgressão em alimentador com baixa parcela de demanda controlável	180
4.6.3	Atuação em caso de transgressão do limite inferior de tensão	183
4.6.3.1	Atuação no cenário de transgressão de tensão do AL-2	183
4.6.3.2	Atuação no cenário de transgressão de tensão do AL-4	187
4.7	IMPACTOS DO GERENCIAMENTO DE RESPOSTA DA DEMANDA EM REDES ELÉTRICAS RURAIS: DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	189
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	195
5.1	CONTRIBUIÇÕES DESTA TESE	197
5.2	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	198
	REFERÊNCIAS	201
	APÊNDICE A – ACOMPANHAMENTO DAS SIMULAÇÕES DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO	211
	APÊNDICE B – RESULTADOS DO TESTE DE FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO	217
	APÊNDICE C – RESULTADOS DO TESTE SENSIBILIDADE DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO	219
	APÊNDICE D – COMPORTAMENTO DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO SOB ATUAÇÃO DO GERENCIADOR DE RESPOSTA DA DEMANDA	221

APÊNDICE E – PERCENTUAIS DE REDUÇÃO DE POTÊNCIA DE IRRIGAÇÃO.....	225
APÊNDICE F – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE SOBRECARGA DO TRANSFORMADOR DA SUBESTAÇÃO AL-5.....	227
APÊNDICE G – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE PEQUENA SOBRECARGA DO ALIMENTADOR AL-1.....	231
APÊNDICE H – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE GRANDE SOBRECARGA DO ALIMENTADOR AL-1.....	235
APÊNDICE I – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE SOBRECARGA DO ALIMENTADOR AL-3	239
APÊNDICE J – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE SUBTENSÃO DO ALIMENTADOR AL-2.....	245
APÊNDICE K – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE SUBTENSÃO DO ALIMENTADOR AL-4.....	251

1 INTRODUÇÃO

A distribuição de energia elétrica em áreas rurais possui papel de suma importância no Brasil, tal qual em outros países nos quais a economia é fortemente baseada no agronegócio. A atuação das concessionárias de distribuição nestas regiões é desafiadora, pois deve-se atender concomitantemente às regulamentações do setor, aos padrões mínimos de qualidade exigidos, à expectativa de investidores e à exigência dos consumidores.

As redes rurais são, normalmente, compostas por alimentadores radiais de grandes extensões e elevados níveis de perdas técnicas. Estão situadas em locais ermos, próximas à vegetação e, muitas vezes, com acesso dificultado. Em geral, atendem a cargas sazonais, que operam apenas nos meses de safra. Estes fatores somados elevam os custos de manutenção e expansão, o que dificulta o retorno financeiro para as concessionárias. Na prática, os investimentos nesse tipo de rede ficam aquém do ideal, o que reduz significativamente a qualidade do serviço prestado ao consumidor e contribui para a ocorrência de falhas nestes circuitos em uma frequência superior às redes urbanas (ANEEL, 2021 a).

A operação dos sistemas elétricos rurais comumente encontra-se em um estado sub-otimizado, o que ocorre devido à deficiência de pesquisas relacionadas a estas redes. Dentre as ocorrências comumente encontradas em redes rurais estão: sobrecarga do transformador de subestação e outros equipamentos durante o período de safra, subtensão nos pontos de entrega mais distantes, transitórios de tensão devido ao chaveamento de grandes cargas na entrada e saída do horário de ponta (FLETCHER, 2019), grande número de interrupções do atendimento e maior duração dessas interrupções em comparação com as redes urbanas (ANEEL, 2019).

Tratando-se da qualidade da energia elétrica, os parâmetros elétricos ao longo de toda a rede devem manter-se dentro do que é especificado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Para uma carga em constante crescimento, isto só é atingível por meio de investimento permanente em manutenção e reforços das redes atuais. O pagamento de compensações financeiras é devido pelas concessionárias de distribuição aos seus clientes (consumidores) em situações de transgressão dos limites adequados de tensão,

bem como em situações de ultrapassagem dos limites de número e tempo máximos de interrupções do serviço, igualmente ditados pela ANEEL. Não há, portanto, alternativa para a concessionária; que ou deve realizar investimentos para alcançar os padrões de qualidade de fornecimento esperados, ou dispender recursos financeiros indenizando seus consumidores.

Neste panorama, incluem-se consumidores com instalações irrigantes de grandes áreas, como o caso das lavouras de arroz irrigado. Tais instalações, inseridas nos sistemas elétricos rurais, trazem suas próprias particularidades, como ausência de automatização, partida direta de grandes cargas e utilização de equipamentos precários, obsoletos ou mal dimensionados.

O setor orizícola possui grande expressão na agricultura brasileira. Na safra 2018/19, foram cultivados 1,68 milhões de hectares (CONAB, 2020). O Estado do Rio Grande do Sul concentra 68,9% da produção nacional (MAPA, 2018). Há dois grupos de cultivo de arroz: o irrigado e o de sequeiro. A cultura do arroz irrigado é a mais utilizada e corresponde a cerca de 75% do total (EMBRAPA, 2016). O cultivo do arroz irrigado utiliza o método de inundação, que necessita irrigação complementar. Estima-se ser necessário o volume de até 7000 m³ ha⁻¹ para a irrigação complementar durante uma safra de arroz irrigado (IRGA, 2011). Grande parte das estações de bombeamento para irrigação das lavouras de arroz opera em regime de 21 horas diárias durante o período de safra, que varia entre 80 e 100 dias (KOPP, 2015).

Não raro, a operação simultânea de consumidores irrigantes de uma mesma região sobrecarrega o alimentador, ou até mesmo o transformador da subestação, causando efeitos prejudiciais como a redução da segurança operacional, comprometimento da vida útil dos equipamentos, aumento da quantidade de perdas, redução dos patamares de tensão da rede, bem como uma maior frequência de acionamento das proteções destes circuitos.

A redução da qualidade de energia elétrica evidenciada por problemas como os citados traz uma série de prejuízos aos agentes envolvidos. Pelo lado do produtor rural, uma baixa qualidade pode provocar danos aos equipamentos, gerando custos de manutenção ou substituição, assim como a indisponibilidade de energia prejudica o desenvolvimento da cultura sem a irrigação adequada. Pelo viés da concessionária de distribuição, aumentam-se os custos; ou a empresa prioriza os investimentos nestas redes problemáticas ou sofre com o aumento de

compensações financeiras pagas aos consumidores, seja por indicadores de precariedade de tensão, seja por indicadores de continuidade.

Uma ação organizada da concessionária de energia elétrica sobre as cargas de levante dos consumidores irrigantes, baseada na previsão meteorológica, condições do solo e características da lavoura, bem como em informações de parâmetros elétricos do sistema de distribuição, contribuiria para a redução do carregamento dos circuitos da distribuição e para a melhoria da qualidade de energia destes consumidores. Isso, sem o risco de deixar qualquer consumidor sem o volume de irrigação suficiente e necessário para sua lavoura.

De mesmo modo, a atuação dos sistemas de irrigação individuais das lavouras, se realizada baseada em informações reais da lavoura, tais como a permeabilidade do solo, a área irrigada, a evaporação e a precipitação pluviométrica, entre outras, pode levar ao aumento de eficiência destes sistemas. Desta forma, é possível a redução do consumo de energia elétrica, além de um uso mais eficiente da água, entre outros benefícios que serão melhores explorados ao longo deste trabalho.

Um mecanismo de resposta da demanda pode representar uma contribuição para a melhoria da qualidade da energia elétrica nestes alimentadores rurais com concentração de cargas de irrigação. O gerenciamento de carga pelo lado da demanda, ou resposta da demanda, é um conjunto de ações que venham a alterar a curva de carga de um sistema de distribuição de forma proposital (PETERSON, 2013). Normalmente, estas ações são estruturadas em programas de resposta da demanda, que são previamente pactuados entre concessionária de distribuição e consumidores. Estes últimos recebem incentivos financeiros, seja através da tarifa ou de benefícios concedidos, em troca de possibilitarem o ajuste de suas cargas, pela concessionária, dentro de limites pré-estabelecidos.

A resposta da demanda tem a capacidade de mudar a curva de carga dos consumidores e, conseqüentemente, dos alimentadores de distribuição. O deslocamento da carga dos períodos de pico para outros de baixa demanda traz uma série de benefícios, como redução da demanda no horário de ponta e conseqüente redução dos custos de geração, aumento da confiabilidade do sistema a partir da redução da probabilidade de interrupções forçadas, benefícios financeiros aos consumidores participantes e benefícios financeiros às concessionárias, por meio da possibilidade de postergar investimentos (EPE, 2019; O'NEILL, 2013). O

gerenciamento pelo lado da demanda é mais um artifício possível graças às tecnologias de aquisição de dados ao longo da rede e de comunicação das redes elétricas inteligentes. Sua aplicação permite a operação otimizada dos sistemas de distribuição (NOLAN; O'MALLEY, 2015).

O trabalho proposto nesta tese contempla a proposta de uma estrutura de resposta da demanda que atenda aos consumidores rurais irrigantes de arroz, com vistas a colaborar com a qualidade de fornecimento das redes elétricas rurais em que estes consumidores estiverem presentes. A estrutura de resposta da demanda será composta por dois dispositivos, o controlador de irrigação e o gerenciador de resposta da demanda. O controlador é desenvolvido através da lógica *fuzzy* e considera características da lavoura e variáveis de previsão meteorológica para determinar a velocidade de rotação do conjunto motor-bomba de irrigação. Já o gerenciador de resposta da demanda realiza o monitoramento dos parâmetros elétricos ao longo do alimentador rural e atua sobre os controladores de irrigação, em resposta a situações de transgressão dos limites de operação, tais como subtensão e sobrecargas do alimentador ou do transformador da subestação.

1.1 JUSTIFICATIVA

O segmento rural das redes de distribuição é preterido em relação ao urbano, no que diz respeito a investimentos, que chegam a ser inferiores a 10% do total investido por concessionárias de energia elétrica (CEEE, 2019). A baixa concentração de clientes, o perfil de consumo sazonal e o baixo retorno sobre o investimento são fatores que justificam esta decisão.

Contudo, a baixa qualidade no fornecimento de energia elétrica é passível de punições às concessionárias. De acordo com o Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017b), a transgressão dos limites de tensão adequada em regime permanente, assim como dos indicadores que tratam de interrupções, geram uma obrigação de compensação financeira da concessionária para com o consumidor.

Os custos adicionais gerados às concessionárias de energia reduzem sua capacidade de investimento. Colocam, portanto, estas empresas em posição de decisão de qual a melhor forma de despender os recursos, se investindo em redes de baixo retorno financeiro, ou se arcando com eventuais compensações. Pesa-se

nesta decisão outros fatores que não os financeiros, como a imagem da empresa frente aos seus consumidores, determinações judiciais, entre outros.

Durante os períodos de safra do arroz irrigado são observadas, de forma comum, ocorrências de sobrecarga em equipamentos, incluindo transformadores da subestação e de subtensão em pontos mais extremos da rede. Neste sentido, uma hipótese é levantada: a utilização de uma estrutura de resposta da demanda pode contribuir para a qualidade de energia e para o fornecimento dentro dos limites de operação dos equipamentos das redes rurais de distribuição de energia elétrica com concentração de produtores irrigantes. De forma objetiva: a resposta da demanda pode contribuir para a redução do sobrecarregamento dos alimentadores rurais, para a melhoria do perfil de tensão, para a redução das perdas técnicas, e para, conseqüentemente, postergar investimentos nestas redes através de uma operação mais otimizada das estruturas já existentes.

A implementação de uma estrutura de resposta da demanda, permite uma série de benefícios adicionais para a concessionária de energia. A possibilidade de atuação nos consumidores, dentro de limites estabelecidos previamente, pode agregar conveniência operacional para a empresa de distribuição. Uma possível redução das interrupções, atingida mantendo a operação dos equipamentos dentro dos limites nominais e seguros, contribui para a melhora dos índices de continuidade e sua manutenção dentro dos limites ditados pela ANEEL, o que reduz o dispêndio com compensações. Também representaria um auxílio durante a ocorrência de contingências em subestações ou nos sistemas de subtransmissão, momento em que a concessionária poderia realizar o desligamento dos equipamentos de irrigação até a retomada da operação normal. É possível citar, ainda, a possível redução dos picos de demanda e a redução de perdas não técnicas, por meio de uma atuação mais próxima junto aos consumidores irrigantes.

Por fim, a estrutura de resposta da demanda proposta traz benefícios adicionais ao consumidor rural, como o aumento da eficiência da operação do sistema de levante e a conseqüente redução do consumo de energia elétrica e de uso de água. O controlador situado na instalação de irrigação utiliza dados meteorológicos, além de outras informações reais da lavoura, para definir a necessidade de irrigação.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é propor uma metodologia de resposta da demanda para redes elétricas rurais com concentração de consumidores irrigantes de lavouras de arroz, de forma a avaliar os possíveis incrementos à qualidade do fornecimento de energia, a partir da redução do carregamento e melhoria no perfil de tensão dos alimentadores.

Para o atendimento do objetivo principal, devem ser atendidos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um controlador de irrigação das lavouras de arroz irrigado, baseado em dados da lavoura e na previsão meteorológica, e que permita a atuação de mecanismos de resposta da demanda, utilizando a lógica *fuzzy*;
- Propor um gerenciador de resposta da demanda para redes elétricas rurais, que permita interação da concessionária com seus consumidores rurais irrigantes, a partir de informações coletadas da rede de distribuição e dos sistemas de irrigação destes consumidores;
- Analisar, através de simulações de operação de redes rurais de distribuição, o comportamento dos parâmetros elétricos e a qualidade da energia elétrica;
- Inter-relacionar a qualidade da energia elétrica nos alimentadores rurais com as especificidades de operação das cargas de irrigação.

1.3 INEDITISMO E CONTRIBUIÇÕES

A pesquisa desenvolvida nesta tese busca confirmar a hipótese levantada e trazer com ineditismo as seguintes contribuições:

- Proposta de uma estrutura de resposta da demanda aplicável a redes elétricas rurais, com a presença de consumidores irrigantes;
- Apresentação de um controlador de irrigação, desenvolvido a partir da lógica *fuzzy*, que utiliza dados de previsão meteorológica e de características do solo e da lavoura;

O ineditismo deste trabalho é justificado, principalmente, pela ausência de pesquisas a respeito de resposta da demanda com aplicação em redes rurais de

distribuição de energia elétrica. O tema proposto é atual e inovador, quando integrado às redes elétricas rurais, algo ainda não abordado na literatura.

Como forma de corroborar as contribuições inovadoras propostas, realizou-se uma profunda busca das palavras-chaves deste trabalho nos mais reconhecidos bancos de dados de dissertações e teses e de periódicos, do Brasil e do mundo. O Quadro 1.1 apresenta os bancos de dados pesquisados.

Quadro 1.1 – Bancos de dados utilizados nesta tese

ABRANGÊNCIA	TESES E DISSERTAÇÕES	PERIÓDICOS
NACIONAL	<ul style="list-style-type: none"> • CAPES – Catálogo de Teses e Dissertações • Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) 	<ul style="list-style-type: none"> • CAPES/MEC – Portal de Periódicos • SciELO – <i>Scientific Electronic Library Online</i>
INTERNACIONAL	<ul style="list-style-type: none"> • DART <i>Europe E-theses Portal</i> • ND LTD <i>Global ETD Search (Networked Digital Library of Theses and Dissertations)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Plataforma IEEE (IEEEExplore) • EBSCOhost • CAPES/MEC – Portal de Periódicos • ScienceDirect

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

As palavras-chaves que são os objetos centrais do estudo desenvolvido neste trabalho, quando pesquisadas nas bases de dados, não retornaram artigos relacionados. A Tabela 1.1 apresenta o número de trabalhos encontrados em cada base de dados quando digitadas as palavras-chave.

Tabela 1.1 – Número de trabalhos relacionados com as palavras-chave desta tese

Palavra-chave central	Palavra(s)-chave(s) associada(s)	Teses e Dissertações		Periódicos			
		CAPES	BDTD	CAPES/MEC		SciELO	
Resposta da demanda	Redes elétricas rurais	28	0	0		0	
	Consumidores irrigantes	0	0	0		0	
	Lógica <i>fuzzy</i>	2	1	0		0	
	Redes elétricas rurais + Gerenciamento	0	0	0		0	
	Redes elétricas rurais + Consumidores Irrigantes	0	0	0		0	
	Redes elétricas rurais + Lógica <i>fuzzy</i>	0	0	0		0	
		DART	NDLTD	CAPES/MEC	IEEEExplore	EBSCO host	ScienceDirect
Demand response	<i>Rural grids</i>	0	1	9	27	0	12
	<i>Irrigating consumer</i>	0	0	0	0	0	0
	<i>Rural grids + Management</i>	0	0	9	10	0	12
	<i>Rural grids + Irrigating consumer</i>	0	0	0	0	0	0
	<i>Rural grids + Fuzzy logic</i>	0	0	0	1	0	0
	<i>Rural grids + Irrigating consumer + Fuzzy logic</i>	0	0	0	0	0	0
	<i>Rural grids + Management + Irrigating consumer</i>	0	0	0	0	0	0
Total: 80 trabalhos		30	2	9	27	0	12

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os termos centrais de busca utilizados foram “resposta da demanda”, nas bases nacionais, e “*demand response*”, nas bases internacionais. Realizou-se a combinação desses termos com outras palavras-chave desta tese, como redes elétricas rurais, gerenciamento, lógica *fuzzy* e consumidores irrigantes, bem como seus correspondentes em língua inglesa.

No total, foram identificados 80 trabalhos em línguas portuguesa e inglesa. Todos estes trabalhos, identificados nas plataformas de busca a partir das combinações dos termos-chave, tornavam-se possíveis trabalhos correlatos a essa tese. Logo, foram reservados para uma posterior análise de correlação com os objetivos propostos.

Da análise de correlação, concluiu-se que não houve trabalhos análogos publicados em nenhuma das bases pesquisadas. O trabalho proposto por essa tese

trata-se, pois, de um trabalho inédito no Brasil e no mundo. Os trabalhos identificados com a associação dos termos “resposta da demanda” e “redes elétricas rurais”, que estão no primeiro nível das buscas, apesar de numerosos, possuíam abordagens e objetivos diversos, tais quais muito distintas do problema atacado nesta tese. Não obstante, algumas publicações, em níveis de pesquisa mais refinados, apresentaram alguma correlação com este trabalho, e serão apresentadas e comentadas na seção 2.6.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese foi dividida em cinco capítulos, sendo o Capítulo 1 introdutório, para a contextualização do tema abordado, apresentação da hipótese e definição dos objetivos da tese. No Capítulo 2 realiza-se uma apresentação da revisão bibliográfica realizada, abordando conceitos sobre resposta da demanda, caracterização do atual cenário das redes rurais de distribuição de energia elétrica, especificidades da irrigação das lavouras de arroz e controladores Fuzzy. Também neste capítulo será explorada a apresentação de publicações, trabalhos e pesquisas correlatas a esta tese.

No Capítulo 3 aborda-se a apresentação da metodologia proposta para a estrutura de resposta da demanda em redes rurais de distribuição de energia elétrica, apresentando com detalhes o desenvolvimento dos componentes principais do trabalho, o controlador fuzzy e o gerenciador de resposta da demanda. O Capítulo 4 traz uma apresentação dos resultados dos testes e simulações realizados, evidenciando o funcionamento coerente dos componentes da estrutura de resposta da demanda proposta. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais deste documento de tese, bem como sugestões de etapas futuras destinadas a dar continuidade a este trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão teórica dos temas pertinentes a esta tese, entre as quais a caracterização das redes de distribuição elétricas rurais e a resposta da demanda, pontos importantes para conceituar a proposta que será desenvolvida na sequência. Outrossim, são apresentadas características que impactam na irrigação de lavouras de arroz irrigado, como as variáveis meteorológicas e as propriedades do solo. Por fim, será abordado o controle através da Lógica Fuzzy, método escolhido para o desenvolvimento do controlador de irrigação das lavouras, e a computação de borda, conceito de processamento de dados seguido nesta proposta de estrutura de resposta da demanda.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES RURAIS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

As redes elétricas de distribuição em áreas rurais possuem características peculiares em relação àquelas localizadas nos centros urbanos. Em termos gerais, são redes com grandes extensões e grande dispersão dos clientes e, conseqüentemente, de carga. Neste contexto estão os consumidores ligados à agricultura, que possuem curvas de consumo com baixo fator de carga, devido ao consumo estar diretamente relacionado com o período de safra da cultura. Durante a safra apresentam elevado consumo, chegando até sua capacidade instalada em alguns períodos. Fora da safra apresentam apenas consumo relacionado a aplicações domésticas.

Além do baixo fator de carga, a imprevisibilidade de consumo é outro ponto de destaque para a operação das redes elétricas rurais. A produção agroindustrial está muito associada aos efeitos meteorológicos, de forma que o regime de chuvas impacta diretamente no aumento de consumo de energia elétrica por sistemas de irrigação complementar.

No contexto nacional, 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). A proximidade com a vegetação, em conjunto com as condições de operação descritas, eleva a susceptibilidade das redes

elétricas rurais a falhas e à dificuldade de manter os mesmos padrões de qualidade praticados nos centros urbanos.

Outro problema detectado frequentemente nas redes de distribuição rurais brasileiras 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. Autores como Evaldt et al. (2015) e Uberti et al. (2017) desenvolveram metodologias 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 uso de motores elétricos para a irrigação, ventiladores para aeração em secadores, compressores de refrigeradores, esteiras de transporte de grãos, entre outros.

No Brasil, os clientes que possuam estações de bombeamento utilizadas para irrigação nas lavouras do arroz irrigado podem ser enquadrados em dois grupos conforme a ANEEL (2010):

- 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). 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 mínimo de 70% no valor da tarifa horossazonal verde, chegando a até 90% dependendo da região do país (ANEEL, 2017a). Faz-se aí um intervalo horário economicamente benéfico ao consumidor irrigante, que pode aproveitar tarifas muito mais baixas para realizar a irrigação complementar de sua lavoura. O benefício tarifário cria um efeito colateral na relação do consumidor irrigante com o consumo de energia elétrica. Uma vez que esta possui custo reduzido, o consumidor não pratica o consumo consciente, muitas vezes não dando muita atenção à atualização e ao dimensionamento correto dos equipamentos e ao manejo correto da água, onde vê-se frequentemente lavouras transbordando e com a bomba ligada. Grande parte das estações de bombeamento

para irrigação das lavouras de arroz opera em regime de 21 horas diárias durante o período de safra (KOPP, 2015).

2.1.1 Qualidade do produto

Para Dugan et al. (2012), a baixa qualidade de energia está associada a manifestação de qualquer perturbação na tensão, corrente ou frequência elétrica do sistema. Alguns dos exemplos destas perturbações são sinais harmônicos de corrente e de tensão, variações de tensão de curta ou longa duração, desequilíbrio de fases, flutuação de tensão, fator de potência e variação da frequência (ANEEL, 2017b). Estes parâmetros de qualidade da energia entregue aos consumidores finais também são tratados pelo Módulo 8 do PRODIST. Basicamente, o documento caracteriza os fenômenos da qualidade do produto, em regimes permanente e transitório, e estabelece seus indicadores e valores de referência ou limites.

Os principais indicadores abordados em relação à qualidade da energia são a Duração Relativa de transgressão de tensão precária (DRP) e a Duração Relativa de transgressão de tensão crítica (DRC), podendo ser individualizado por unidade consumidora (DRP_i e DRC_i) ou coletivos (DRP_E e DRC_E). Estes indicadores também geram a obrigação à concessionária de distribuição de pagamento de compensações pela violação dos seus limites.

Segundo dados divulgados pela ANEEL (2019a), foram pagos aos consumidores como compensação pela violação dos limites de tensão, apenas pelas distribuidoras de energia elétrica do Rio Grande do Sul, mais de R\$ 3 milhões, em 2018. Estes valores eram ainda maiores nos anos anteriores.

Em termos de investimentos, a priorização é das redes de distribuição em áreas urbanas, que concentram a maior parcela dos consumidores. Segundo dados da CEEE (2019), dos investimentos realizados em um período de quatro anos, apenas 7,7% foram destinados para obras rurais. Dados da ANEEL (2016) vão no mesmo sentido e demonstram que, dos projetos desenvolvidos no âmbito dos programas regulados, os de aplicação em áreas rurais representam apenas 4% do total de projetos desenvolvidos.

Para Tolmasquim e Szklo (2000), o setor rural apresenta tradicionalmente um consumo de energia baixo e sazonal, gerando um custo marginal muito alto e um tempo de retorno muito longo para as concessionárias investirem. O baixo

investimento das distribuidoras nas redes elétricas rurais está associado à baixa densidade de consumidores presentes nestas regiões.

Silva et al. (2002) cita o motor elétrico como maior fonte de perturbações nas redes elétricas. Equipamentos com baixa eficiência, sobredimensionados e com falta de manutenção adequada colaboram para reduções de eficiência e do fator de potência (KAYA et al., 2008).

Haddad et al. (2010) citam a utilização de inversor de frequência para uma redução da demanda de energia elétrica no conjunto motor-bomba. Isto porque o ponto de operação destes conjuntos ocorre no ponto de intersecção entre as curvas de vazão versus altura manométrica do sistema e da bomba. Reduzir a vazão do conjunto através de um dispositivo de velocidade variável muda a intersecção das duas curvas para um ponto de altura manométrica menor, o que reduz a perda de carga e o consumo de energia elétrica.

Além da qualidade da energia elétrica, outra questão que afeta os consumidores é a qualidade do serviço, que dá conta da continuidade do fornecimento de energia elétrica.

2.1.2 Qualidade do serviço

A qualidade e a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica ao consumidor são requisitos imprescindíveis nos dias de hoje. A interrupção do fornecimento causa prejuízos financeiros e outros transtornos, mesmo que por curtos períodos. Neste sentido, as empresas concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia elétrica são avaliadas em diversos aspectos do fornecimento de energia, no que concerne tanto a qualidade do serviço prestado como do produto entregue aos consumidores. O Módulo 8 do PRODIST trata especificamente sobre a qualidade de energia elétrica e caracteriza os indicadores de qualidade do produto, do serviço e do tratamento de reclamações (ANEEL, 2017b).

Relativo ao serviço prestado, o fornecimento de energia elétrica, a ANEEL institui alguns indicadores que avaliam as interrupções no fornecimento, destacando-se os indicadores de continuidade coletivos, DEC e FEC, e os indicadores de continuidade individuais, DIC, FIC e DMIC:

- DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em horas;

- FEC: Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em número de interrupções;
- DIC: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, expressa em horas;
- FIC: Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora, expressa em número de interrupções; e
- DMIC: Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora, expressa em horas.

O Módulo 8 do PRODIST também define o pagamento de compensações da distribuidora aos consumidores em caso de violação dos limites dos indicadores de continuidade individuais, DIC, FIC e DMIC, expondo metodologia de cálculo e critérios para o pagamento destas compensações (ANEEL, 2017b).

Apesar de as compensações ocorrerem individualmente, os indicadores coletivos é que são disponibilizados em detalhes e de forma pública pela ANEEL. Os indicadores coletivos são calculados a partir da média dos indicadores individuais de unidades consumidoras pertencentes a um mesmo conjunto.

As regras para a composição dos conjuntos de unidades consumidoras também são fornecidas no Módulo 8 do PRODIST. Formam um conjunto todas as unidades consumidoras alimentadas por uma mesma Subestação de Distribuição (SE); esta é a regra geral. São adotados, ainda, outros critérios que podem agrupar SEs em um mesmo conjunto ou desmembrar uma SE em mais de um conjunto. A contiguidade geográfica permite, por exemplo, a agregação de mais de uma SE em um mesmo conjunto.

Os conjuntos de consumidores, deste modo, dificilmente são puramente urbanos ou puramente rurais. Pode haver, contudo, uma predominância de redes localizadas em áreas urbanas ou rurais. A Tabela 2.1 apresenta um apanhado dos indicadores coletivos de continuidade acumulados, referentes ao ano de 2018 e disponibilizados pela ANEEL (2019b), dos conjuntos elétricos das principais regiões de produção de arroz irrigado do Brasil, todas localizadas no Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 2.1 – Levantamento dos indicadores de continuidade acumulados em 2018 dos conjuntos elétricos das principais regiões produtoras de arroz irrigado

Conjunto	R/U	Nº Consum.	DEC apu. (horas)	DEC lim. (horas)	FEC apu. (qtde.)	FEC lim. (qtde.)
Uruguiana 1	U	40.756	8,55	12,00	3,99	10,00
Uruguiana 4	R	4.707	66,80	40,00	12,30	15,00
Maçambará	R	1.892	64,88	48,00	11,23	18,00
Itaqui	R/U	12.514	15,38	14,00	5,35	10,00
Alegrete	R/U	31.406	31,10	17,00	10,76	10,00
Sta. Vitória Palmar	R/U	20.760	45,99	20,00	19,83	16,00
São Borja 1	U	15.786	11,60	9,00	9,13	7,00
São Borja 2	R	11.563	44,36	41,00	11,74	17,00
Arroio Grande	R/U	12.141	35,48	12,00	13,86	10,00
Camaquã 1	R/U	35.136	34,78	17,00	14,79	12,00
Camaquã 2	R/U	7.326	15,38	11,00	8,17	8,00
Mostardas	R/U	11.019	43,95	18,00	21,47	15,00

Legenda: R = Rural; U = Urbano; apu. = apurado; lim. = limite.

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2019b.

Percebe-se que, em todos os casos de conjuntos rurais, o DEC apurado ultrapassou o limite estipulado pela ANEEL, e que em sete dos doze conjuntos da análise o FEC apurado também ultrapassou o limite. Outra observação possível é de que os conjuntos com marcante presença rural possuem DEC apurado bastante elevado, comumente acima do limite definido para o conjunto (DEC limite), mesmo este sendo também bastante elevado. O FEC na maioria dos casos também apresentou transgressões dos limites. Contudo observa-se, de acordo com os conjuntos com predominância rural, que o DEC é o principal problema para as concessionárias de distribuição.

A continuidade do fornecimento de energia é interrompida a partir de eventos, de natureza:

- Mecânica: causados pela ação indireta de intempéries, como a queda de vegetação sobre as linhas e queda de postes;
- Elétrica: ocasionados por descargas atmosféricas;

- Térmica: sobreaquecimento nos condutores, oriundos de sobrecorrentes ou sobrecargas;
- Manutenção: instalação de componentes inadequados, de má qualidade, que falham precocemente, ou ainda erros das equipes de manutenção;
- Acidentes: danos causados por acidentes de trânsito e animais.

Investimentos em confiabilidade das redes de distribuição contribuem para reduzir o número de desligamentos, impactando sobre o FEC. São exemplos de ações: a constante renovação das estruturas (postes), isoladores e condutores, agregação de equipamentos de proteção contra descargas atmosféricas (linha de cobertura e para-raios) e instalação de religadores automáticos. Uma vez interrompido o fornecimento, a concessionária deve realizar esforços para que esta interrupção dure o menor tempo possível, o que se relaciona diretamente ao DEC (CASTRO et al., 2017). As maiores distâncias, os acessos difíceis e o número enxuto de equipes de campo são aspectos contribuintes para indicadores de duração mais elevados nos conjuntos elétricos rurais em comparação com os urbanos.

A falta de qualidade dos indicadores de continuidade das regiões rurais fica mais nítida quando comparada com os de conjuntos puramente, ou ao menos predominantemente, urbanos. A Tabela 2.2 apresenta alguns destes conjuntos de forma comparativa aos indicadores das regiões produtoras de arroz (ANEEL, 2019b).

Tabela 2.2 – Levantamento dos indicadores de continuidade acumulados em 2018 de conjuntos elétricos de regiões urbanas

Conjunto	R/U	Nº Consum.	DEC apu. (horas)	DEC lim. (horas)	FEC apu. (qtde.)	FEC lim. (qtde.)
Canoas 1	U	50.667	10,11	9,00	5,89	8,00
Canoas 3	U	49.763	6,76	9,00	2,42	8,00
P. Alegre 4 - Centro	U	23.958	0,42	4,00	0,21	4,00
Tramandaí	U	55.825	9,39	10,00	4,84	8,00

Legenda: R = Rural; U = Urbano; apu. = apurado; lim. = limite.

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2019b.

Comparativamente, percebe-se que os conjuntos urbanos possuem valores absolutos para os indicadores de continuidade muito inferiores aos dos conjuntos rurais. Isto demonstra uma maior preocupação, seguida de maiores investimentos, das concessionárias de energia para com as redes de distribuição urbanas. O Quadro 2.1, por sua vez, apresenta os montantes financeiros dispendidos pelas maiores concessionárias de distribuição que atendem ao Estado do Rio Grande do Sul, no ano de 2018, em função de transgressões dos indicadores de continuidade.

Quadro 2.1 – Compensações no RS em 2018

CEEE-D	RGE	RGE Sul
23.033.755,75	15.452.218,97	22.127.676,75

Fonte: Adaptado de ANEEL, 2019.

Conforme as informações do Quadro 2.1, as compensações pagas pelas concessionárias chegam a um montante de mais de R\$ 60 milhões (ANEEL, 2019). As áreas de atuação das concessionárias com maiores montantes dispendidos em compensações coincidem com as áreas em que é cultivado o arroz irrigado no RS. O cruzamento das informações levantadas permite inferir que as redes elétricas rurais impactam negativamente sobre os indicadores de continuidade, bem como sobre o dispêndio da concessionária em compensações aos clientes. Isto só reforça a ideia desta tese de buscar novas tecnologias e abrir oportunidades de investimentos para as redes elétricas rurais.

Outro aspecto relevante no contexto da qualidade de energia elétrica em redes de distribuição rurais é a eficiência energética.

2.1.3 Eficiência energética

A eficiência energética é um assunto de grande relevância para os sistemas elétricos. 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, no Plano Nacional de Energia 2050, ações de eficiência terão contribuição de cerca de 20% em relação à energia consumida em 2050.

No Brasil, a irrigação de grandes áreas, como de culturas irrigadas por inundação, como o arroz irrigado, representa parcela significativa do consumo de energia elétrica da classe rural. Segundo Assad (2016), o consumo de energia elétrica para irrigação é crescente desde 2013 e a previsão é de continuar em crescimento. O consumo de classe rural representa cerca de 6% do total, no Brasil, segundo a EPE (2020). Sistemas de irrigação ineficientes também impõem diversos custos à concessionária de distribuição, pois elevam a necessidade de investimentos em reforços da rede, bem como o aumento de capacidade de carga, além do aumento das perdas técnicas nos equipamentos ao longo da rede (ANEEL, 2021 a).

A utilização de inversor de frequência é uma técnica consolidada para a redução da demanda de energia elétrica em sistemas de irrigação (HADDAD et al., 2010). Da teoria de máquinas de fluxo, em uma bomba centrífuga, enquanto a vazão varia de forma linear com a variação da velocidade mecânica, a potência motriz demandada varia em uma relação cúbica. As Equações 2.1 e 2.2 descrevem estes efeitos.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (2.2)$$

em que Q_1 , P_1 e N_1 são a vazão volumétrica, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, a potência motriz, em W, e a velocidade mecânica, em rad s^{-1} , iniciais, respectivamente, e Q_2 , P_2 e N_2 são a vazão volumétrica, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, a potência motriz, em W, e a velocidade mecânica, em rad s^{-1} , finais, respectivamente.

Isto significa que uma redução de velocidade de 20% em uma bomba centrífuga, realizada a partir de um inversor de frequência utilizado como acionamento do motor elétrico, representa uma redução de cerca de 20% na vazão de irrigação de uma lavoura de arroz, e uma redução de 48,8% da potência demandada. Já uma redução de 40% da velocidade reduz cerca de 40% na vazão, enquanto reduz 78,4% da potência elétrica demandada.

A curva de rendimento da bomba centrífuga quase não se modifica com a velocidade, de forma que a variação de rendimento pela mudança de velocidade é muito pequena (FILIPPO FILHO, 2015). Geralmente, há um consumo de 4 a 10% pelo inversor de frequência da energia absorvida da rede elétrica, o que impacta de forma leve na eficiência global do conjunto de bombeamento, mas nada comparado ao ganho de eficiência trazido pela redução da potência consumida pela bomba devido à redução de sua velocidade (ANDRADE FILHO, GOMES, 2013).

Redes elétricas rurais demonstram grande dispersão de consumidores, segundo Ribeiro et al. (2012), variando entre 0,1 e 5,0 consumidores por quilômetro de rede elétrica. Conforme Cavalcanti e Luciano (2001), para o atendimento aos padrões de queda de tensão em áreas de grande dispersão é 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. Trabalhos como o de Freeman et al. (2009) e Bortoni et al. (2007) consideram que as perdas técnicas nas redes rurais advêm de condições de aumentos desnecessários da corrente elétrica da rede. Os autores mencionam o baixo fator de potência como um grande contribuinte para as perdas técnicas nas redes rurais, e como maiores causas para o baixo fator de potência, o superdimensionamento de motores e o baixo fator de carga dos transformadores.

O combate ao desperdício de energia elétrica no setor de distribuição de energia elétrica é encorajado pela ANEEL, através do Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica (PEE), que determina o investimento de 0,5% da receita operacional líquida (ROL) das empresas de distribuição em projetos de eficiência energética (ANEEL, 2021 b). Dados da ANEEL mostram que o setor rural recebeu cerca de 1% dos investimentos aplicados nas últimas décadas no âmbito do programa.

Neste contexto, uma das possibilidades, por parte da concessionária, seria a aplicação de um programa de gerenciamento pelo lado da demanda, ou programa de resposta da demanda. A resposta da demanda poderia aumentar a eficiência energética nas redes rurais de distribuição, reduzindo perdas técnicas, a partir da reduções de cargas em momentos de maior demanda do sistema de distribuição.

2.2 RESPOSTA DA DEMANDA

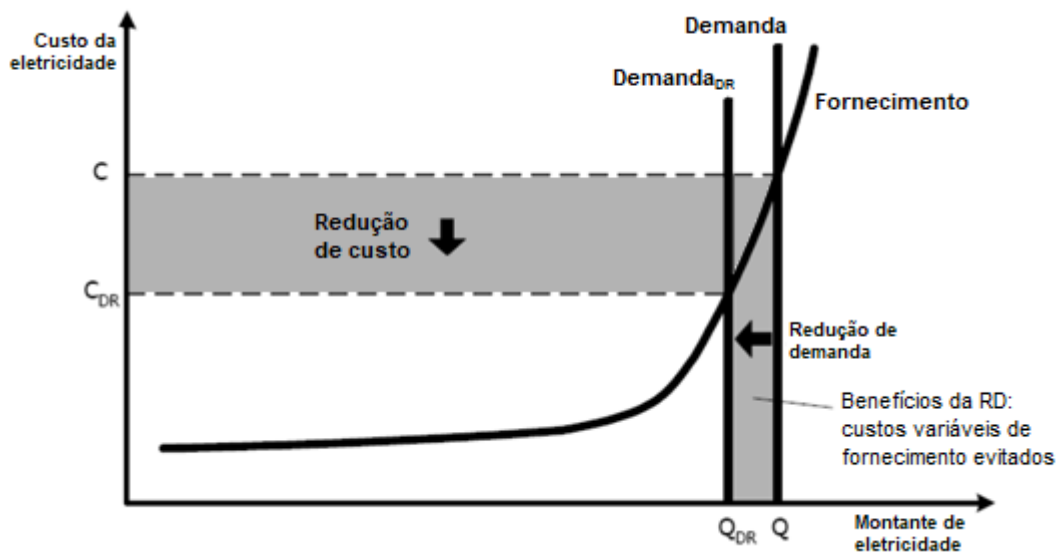
A Resposta da Demanda (RD) pode ser definida como alterações no consumo instantâneo de energia elétrica dos consumidores finais em resposta a condições da oferta, como pagamentos ou variações do preço da energia ao longo do tempo. Efeitos esperados pela atuação destes mecanismos são a redução do consumo e/ou o deslocamento do consumo no tempo (EPE, 2019).

No sistema elétrico tradicional, a capacidade de geração é dimensionada de modo a atender à demanda máxima do sistema, com margem disponível para atender às variações da carga e à incerteza da geração (SIANO, 2014). Desta forma, a geração é alterada de forma dinâmica em resposta às variações da demanda, mantendo o sistema equilibrado e estável. Esta estratégia recebe o nome de *load following* (TOLMASQUIM, 2017).

Em contraponto, a resposta pelo lado da demanda tem a capacidade de mudar a curva de carga dos consumidores. A resposta da demanda inclui toda e qualquer ação sobre a carga dos consumidores que possa alterar a curva de carga de um sistema de distribuição ou de uma região (PETERSON, 2013). Ao realizar-se o deslocamento da carga dos períodos de pico para outros de baixa demanda é possível reduzir a oferta, retirando do sistema geradores termelétricos, de custo mais elevado (CCEE, 2019). A resposta da demanda também permite a realização de rápidas variações de carga, otimizando o balanceamento dinâmico entre oferta e demanda, o que confere maior eficiência e flexibilidade para a operação da rede elétrica (TOLMASQUIM, 2017).

A Figura 2.1 apresenta a resposta que uma redução da demanda nos horários de pico do sistema pode causar no custo da eletricidade. A curva de fornecimento apresentada por O'Neill (2013) mostra que quanto maior a demanda do sistema, incrementos de energia possuem um custo cada vez mais elevado que o incremento anterior. Dessa forma, qualquer esforço para redução do consumo traz um impacto grande nos custos com geração.

Figura 2.1 – Impacto da resposta da demanda nos custos da energia elétrica



Fonte: Adaptado de O'Neill, 2013.

Como demonstra a Figura 2.1, em horários de maior carregamento, há um incremento acentuado de custos variáveis de fornecimento, tornando a curva “Fornecimento” não linear na região de alto montante de eletricidade demandada. Uma redução de demanda de Q para Q_{DR} implica, portanto, em uma redução de custo de C para C_{DR} . Nota-se que a variação do custo da eletricidade é maior que a redução da demanda, devido à inclinação da curva “Fornecimento”.

A resposta da demanda, portanto, representa uma alternativa aos operadores do sistema elétrico para manter o equilíbrio entre geração e demanda. Seu uso ganhou força nos últimos anos, coincidindo com as inovações tecnológicas e diretrizes políticas que permitem a implementação das redes elétricas inteligentes (REI).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2019), destaca os programas de resposta da demanda como forma de engajamento dos consumidores no gerenciamento do próprio consumo de energia. Estes programas trazem uma série de benefícios ao sistema elétrico, entre os quais:

- Aumento de flexibilidade e confiabilidade, prevendo uma maior inserção dos recursos energéticos distribuídos;

- Redução da emissão dos gases de efeito estufa, pelo não acionamento de usinas termelétricas de combustíveis fósseis para atendimento à demanda máxima do sistema;
- Diminuição da demanda no horário de ponta, o que implica na redução dos custos de geração, tendo em vista que usinas térmicas mais caras não serão despachadas;
- Possibilidade de postergar ou evitar investimentos em construção de novas unidades de geração, transmissão e distribuição;
- Redução do poder de mercado dos agentes geradores, a partir da flexibilização do consumo;
- Redução da volatilidade de preços e maior previsibilidade financeira para os agentes envolvidos (geradores, comercializadores e consumidores).

No mesmo sentido, O'Neill (2013) elenca quatro grupos de benefícios provenientes da implantação da resposta da demanda:

- Benefícios financeiros aos participantes: economia na fatura de energia ou recebimento de pagamentos de incentivo para aderir aos programas de resposta da demanda;
- Benefícios financeiros para o mercado: uma redução do pico da demanda possibilita retirar as usinas geradoras mais caras do sistema, reduzindo o custo global da energia, como demonstra a Figura 2.1. No longo prazo, reduz a necessidade de agregar mais capacidade ao sistema, reduzindo custos de expansão, economia que futuramente pode ser repassada aos consumidores através de reduções das tarifas de energia;
- Benefícios de confiabilidade: a resposta da demanda reduz a probabilidade e as consequências de interrupções forçadas, que causam custos financeiros e inconvenientes aos consumidores;
- Benefícios de mercado: resposta da demanda reduz a capacidade dos geradores de exercerem poder de mercado e elevar o custo da energia na geração.

Peterson (2013) classifica a resposta da demanda em dois tipos, “despachável” e “não despachável”. No caso do primeiro, são alterações de

consumo realizadas pelo operador do sistema de distribuição, ou outra entidade definida com esta responsabilidade, com a concordância do consumidor, em resposta a razões econômicas ou de confiabilidade do sistema. Isto inclui o controle direto da carga dos equipamentos elétricos do consumidor. Já na resposta da demanda não despachável o consumidor é quem decide quando e qual redução de consumo será realizada, baseando-se na precificação dinâmica da tarifa ao longo do tempo.

Para O'Neill (2013), a classificação da resposta da demanda pode ser realizada de acordo com a forma que a alteração de carga é provocada, seja baseada no preço da tarifa ou baseada em incentivos. Dentro destas duas categorias principais, há diferentes opções de programas de resposta da demanda: tarifa horária (TOU), tarifa em tempo real (RTP), tarifa de ponta crítica (CPP), controle direto de carga, serviço de interrupção ou corte (I/C), *bidding/buyback*, resposta da demanda em emergências, capacidade de mercado e mercado de serviços auxiliares, conforme o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Programas de resposta da demanda baseadas em preço e em incentivo

(continua)

Opções baseadas no preço	Programas baseados no incentivo
<ul style="list-style-type: none"> • Tarifa horária (<i>time of use – TOU</i>): define preços unitários diferentes para uso durante diferentes blocos de tempo, geralmente definidos para cada 24 horas. As taxas do TOU refletem o custo médio de geração e entrega da energia durante os períodos de tempo. • Tarifa em tempo real (<i>Real-time pricing – RTP</i>): o valor da energia flutua tipicamente de forma horária, refletindo o preço da energia no atacado. Os consumidores são notificados dos valores com uma antecedência de um dia ou de uma hora. 	<ul style="list-style-type: none"> • Controle direto de carga: programa no qual o operador desliga ou alterna remotamente equipamentos elétricos do consumidor (ex.: ar condicionado, aquecedor de água). Estes programas são principalmente oferecidos a consumidores residenciais ou comerciais de pequeno porte. • Serviço de interrupção ou corte (<i>Interruptible/curtailable service</i>): opção que oferece desconto na taxa ou crédito na fatura de energia do consumidor que concordar em reduzir a carga durante contingências do sistema. Penalizações podem ser aplicadas caso a resposta falhe. Esta opção é tradicionalmente oferecida apenas aos maiores consumidores industriais e comerciais. • Programas <i>Bidding/Buyback</i>: os clientes oferecem lances para reduzir com base nos preços no mercado atacadista de eletricidade ou equivalente. Oferecido principalmente a grandes consumidores. • Programas de resposta da demanda em emergências: Provêm pagamento de incentivos aos consumidores para reduções de carga durante períodos de déficit das reservas.

Quadro 2.2 – Programas de resposta da demanda baseadas em preço e em incentivo

(conclusão)

Opções baseadas no preço	Programas baseados no incentivo
<ul style="list-style-type: none"> • Tarifa de Ponta Crítica (<i>Critical Peak Pricing – CPP</i>): um híbrido entre TOU e RTP. A taxa básica segue uma estrutura TOU, porém é feita uma provisão, com gatilhos especificados, para substituir o preço de pico normal por um preço de evento pico crítico (ex.: quando a confiabilidade do sistema é comprometida ou os preços de fornecimento são muito altos). 	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de capacidade de mercado: consumidores ofertam cortes de carga como substituição à geração convencional. Normalmente, os consumidores recebem um aviso prévio de um dia, bem como pagamentos antecipados pela reserva como incentivo, e sofrem penalizações caso falhem em dar a resposta acordada quando solicitados. • Programas de mercado de serviços auxiliares: clientes ofertam cortes de carga em leilão. Se sua proposta é aceita, recebem um valor por se comprometerem a ficar em <i>standby</i>. Caso seu corte de carga seja necessário, o cliente é chamado pelo operador e recebe o preço da energia de curto prazo (mercado <i>spot</i>).

Fonte: Adaptado de O'Neill, 2013.

No Quadro 2.2 observa-se que os programas de resposta da demanda baseados em preço utilizam variações no valor da tarifa de energia para sensibilizar os consumidores a reduzirem seu consumo. A elevação da tarifa em um intervalo de tempo, principalmente, nos horários de ponta do sistema, gera uma resposta dos clientes a evitar o consumo de energia elétrica nestes períodos. Caso isso se confirme, o consumidor verificará uma redução em sua fatura de energia. Um ponto de destaque dos programas baseados no preço é que estes são exclusivamente voluntários. Não há ação direta do operador na resposta da demanda ao sistema.

Por outro lado, os programas de resposta da demanda baseados em incentivos permitem o controle direto do operador do programa sobre o consumo dos clientes que aderirem ao programa, em troca de pagamento de incentivos financeiros previstos em contrato. Alguns programas penalizam os consumidores que falham em responder com suas obrigações contratuais quando são convocados para tal.

Dentre as opções disponíveis, os mecanismos de tarifas horárias (TOU) são os mais difundidos. Nestes modelos são definidos diferentes postos tarifários ao longo do dia, de forma a refletir de forma mais próxima à realidade os custos em cada período do dia (PHILIPPOU et al., 2015). Este trabalho, contudo, considerará a futura implementação de um mecanismo de RD baseado em incentivos, pois será

necessária a atuação direta da concessionária de distribuição sobre as cargas dos consumidores.

A resposta da demanda e as redes elétricas inteligentes possuem laços estreitos. A implementação de REI inclui o desenvolvimento de dispositivos que possam gerenciar a demanda como forma de prover serviços para o sistema de distribuição, tal qual regulação de tensão, o controle do fluxo de potência e a reserva de energia (considerando uma futura participação maciça dos veículos elétricos no sistema) (PETERSON, 2013). Por sua vez, a RD só é viável com a disponibilidade de informações, tanto do consumidor quanto da rede, o que depende da instalação de medidores e equipamentos inteligentes (NOLAN; O'MALLEY, 2015).

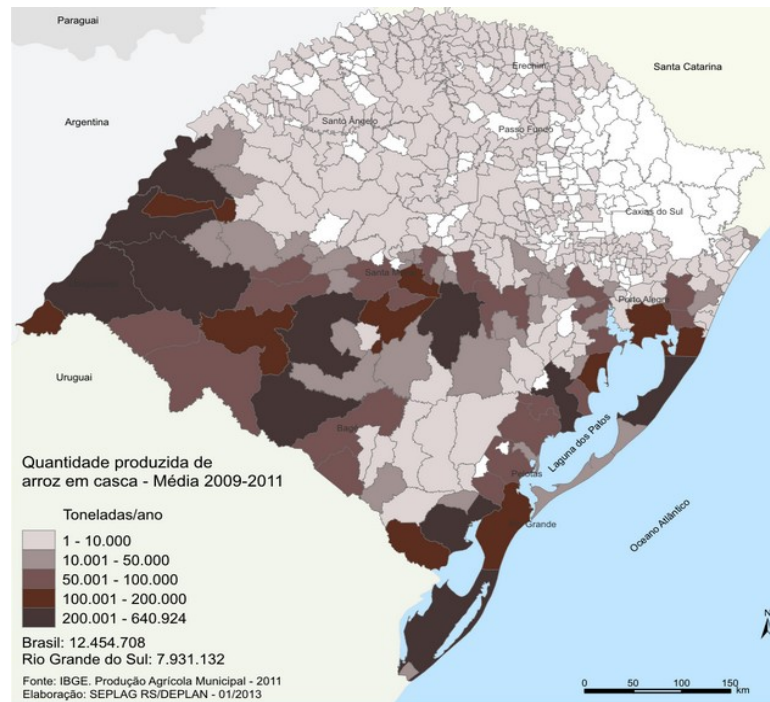
2.3 CARACTERÍSTICAS DE IRRIGAÇÃO DE LAVOURAS DE ARROZ

A principal cultura irrigada, no Brasil e no mundo, é a do arroz. Na safra 2019/2020, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) estima que o arroz tenha sido cultivado em uma área total de mais de 1,68 milhões de hectares, com uma produção esperada de 10,56 milhões de toneladas, o que representa mais de 80% da oferta nacional (CONAB, 2020).

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) concentra 68,9% da produção total de arroz do Brasil. O segundo maior produtor é Santa Catarina, com 9,8% da produção nacional, seguido por Tocantins (6,0%), Mato Grosso (4,1%) e Maranhão (2,7%) (MAPA, 2018).

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 as regiões de produção de arroz no Estado.

Figura 2.2 – Ilustração das regiões de plantio de arroz do RS



Fonte: Embrapa, 2019.

Na Figura 2.2 as cores mais fortes estão associadas a uma quantidade maior de produção de arroz. É possível verificar que praticamente todo o Rio Grande do Sul possui cultivo de arroz, com exceção da região da Serra e outros poucos municípios esparsos.

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 arroz 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. 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⁻¹ (MARCOLAN et al., 2008).

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⁻¹ (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 2.3.

Figura 2.3 – Arroz irrigado por inundação



Fonte: Embrapa, 2016.

Os maiores produtores de arroz do mundo são China, com 29,5% de participação na produção mundial, e Índia, com 22,7% de participação. Comparativamente, o Brasil possui uma participação de 1,4% na produção mundial (IRGA, 2020). Em comum, todos estes países possuem predominância no cultivo do arroz irrigado.

2.3.1 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 m³ ha⁻¹ para irrigação de uma safra, oriundo de levante e precipitação somados (IRGA, 2011).

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.

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).

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 ocorrem com níveis de lâmina d'água de até 2,5 cm. Salvos 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.

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. 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, 2016).

Características fundamentais da irrigação da cultura do arroz no Rio Grande do Sul foram estudadas e divulgadas pelo Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA, 2011). A Tabela 2.3 apresenta as principais informações, como volumes e vazões de água necessários.

Tabela 2.3 – Características gerais de irrigação do arroz no RS

	Mínimo	Máximo
Volume total (m³ ha⁻¹)	8.000	14.000
Volume irrigação precipitação (m³ ha⁻¹)	7.000	9.800
Volume irrigação complementar (m³ ha⁻¹)	4.200	7.000
Vazão de irrigação (manutenção) (L s⁻¹ ha⁻¹)	1	1,5
Tempo de irrigação (dias)	80	100
Nível lâmina d'água (cm)	2,5	10

Fonte: Adaptado de IRGA, 2011.

Após o bombeio, a água é distribuída para as parcelas da lavoura através de canais de distribuição, conforme visualizado na Figura 2.4. Estes canais normalmente são formados por taipas.

Figura 2.4 – Canal de irrigação separado das parcelas de arroz por taipas



Fonte: Embrapa, 2016.

Os motores elétricos utilizados nas instalações de levante são motores de indução trifásicos e possuem potências típicas entre 50 e 300 cv. É comum, ainda, a utilização de equipamentos degradados, com especificação incorreta, operação fora das condições nominais e falta de manutenção adequada (VIANA e RICARDO, 2008).

Durante o período de irrigação, o funcionamento dos motores é praticamente contínuo, sendo que a maior parte dos produtores se preocupa 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 (2019), o percentual médio do custo total da safra atribuído ao uso da energia elétrica para irrigação é de cerca de 3,64%, o que representa financeiramente R\$ 323,56 por hectare cultivado. Se considerada a área de arroz irrigado cultivada na safra 2019/2020, o montante chega a mais de R\$ 400 milhões em consumo de energia elétrica. O percentual de custos com energia elétrica é maior que o da semente, por exemplo, que é de 2,02%. Os maiores custos da safra são agroquímicos (12,86%) e adubos (10,89%). 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).

O consumo de energia elétrica para irrigação das lavouras de arroz é fortemente impactado pelas condições meteorológicas durante o período de safra.

2.3.2 Agrometeorologia

A variabilidade das condições meteorológicas durante o ciclo de cultivo é responsável por cerca de 80% da variabilidade da produção agrícola no mundo (SENTELHAS; MONTEIRO, 2009). Deste modo, o acompanhamento das previsões meteorológicas é um aspecto relevante no que tange a necessidade de irrigação complementar da cultura do arroz irrigado no período de safra. Por exemplo, a reposição mecânica de nível de água da lavoura na véspera de uma grande chuva pode não ser a melhor tomada de decisão financeiramente.

A grande maioria das lavouras de arroz ainda utiliza, nos dias de hoje, o aguador para realizar esta decisão. Segundo o IRGA (2019), os custos com aguadores totalizaram R\$ 59,72 por hectare (0,67% de participação no custo total da safra). Somam-se a estes, os custos com irrigação que totalizam R\$ 323,56 por hectare (3,64% do total) em energia elétrica, e R\$ 125,96 por hectare (1,42% do total) em combustíveis fósseis. Os custos com aguadores demonstram que o controle de nível nas lavouras é realizado, em grande parte, de forma manual, o que sugere que há margem para reduzir o custo da safra, tanto nesta parcela, quanto na parcela dos custos de irrigação. A previsão meteorológica associada a um sistema de automação pode auxiliar neste sentido.

Na meteorologia, o tempo é definido como o estado físico das condições da atmosfera em um momento e local. A previsão do tempo, por sua vez, inclui o uso de modelos matemáticos baseados em parâmetros atmosféricos para gerar um prognóstico das ocorrências futuras (INMET, 2020). As previsões do tempo são classificadas por Barry e Chorley (2013) como perspectivas de curto prazo (até três dias), médio prazo (até 14 dias) e longo prazo (mensal ou sazonal). O clima, por sua vez, é constituído pelo comportamento estatístico da variabilidade dos parâmetros do tempo de uma região, entre os quais temperatura, precipitação, umidade e vento, analisado sob um longo período, normalmente 30 anos (INPE, 2020).

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a confiabilidade das previsões do tempo das próximas 24 horas chega a ser de 100%, enquanto em uma previsão com antecedência de 5 dias, a confiabilidade fica reduzida a 70%

(INPE, 2020). Tendo em vista que uma maior taxa de acerto é verificada em previsões com intervalos mais curtos, o controlador *fuzzy* proposto nesta tese contará com dados de previsão das próximas 24 horas (dia seguinte).

Na agrometeorologia, enquanto a precipitação atmosférica contribui para a reposição e o acúmulo de água nas lavouras, outras 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.

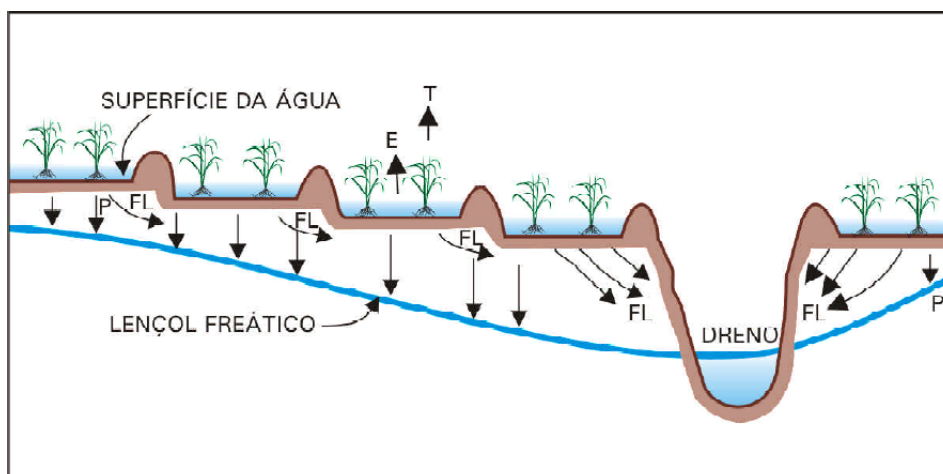
Outro aspecto relevante em termos de produtividade do arroz irrigado, bem como de necessidade de reposição de água através da irrigação é a tipologia de solo presente na lavoura.

2.3.3 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, 2014), 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 2.5 ilustra as drenagens por percolação e por fluxo lateral.

Figura 2.5 – Representação das perdas de água em uma lavoura de arroz irrigado



Legenda: P - percolação vertical, FL - fluxo lateral, E - evaporação, T - transpiração

Fonte: Stone, 2005.

Valores típicos de percolação e fluxo lateral em lavouras de arroz variam de 1 a 5 mm dia⁻¹ em solos muito argilosos e de 25 a 30 mm dia⁻¹ 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⁻¹ têm sua aptidão ao cultivo do arroz irrigado questionada.

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 através da rotação de produção com outras culturas como a soja, na proporção de três anos de arroz para um de soja (IRGA, 2016).

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. Rezende (1986) classifica este tipo de solo com característica de drenagem entre ruim e precária, como apresentado no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 – 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.

A informação do tipo de solo é disponibilizada pela Embrapa (2020) 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. Com a informação do tipo de solo do local da lavoura, obtida no SOMABRASIL, e o perfil de drenagem deste solo, informação coletada no Quadro 2.3, é possível estimar a velocidade de percolação vertical (permeabilidade) do solo presente em uma lavoura específica.

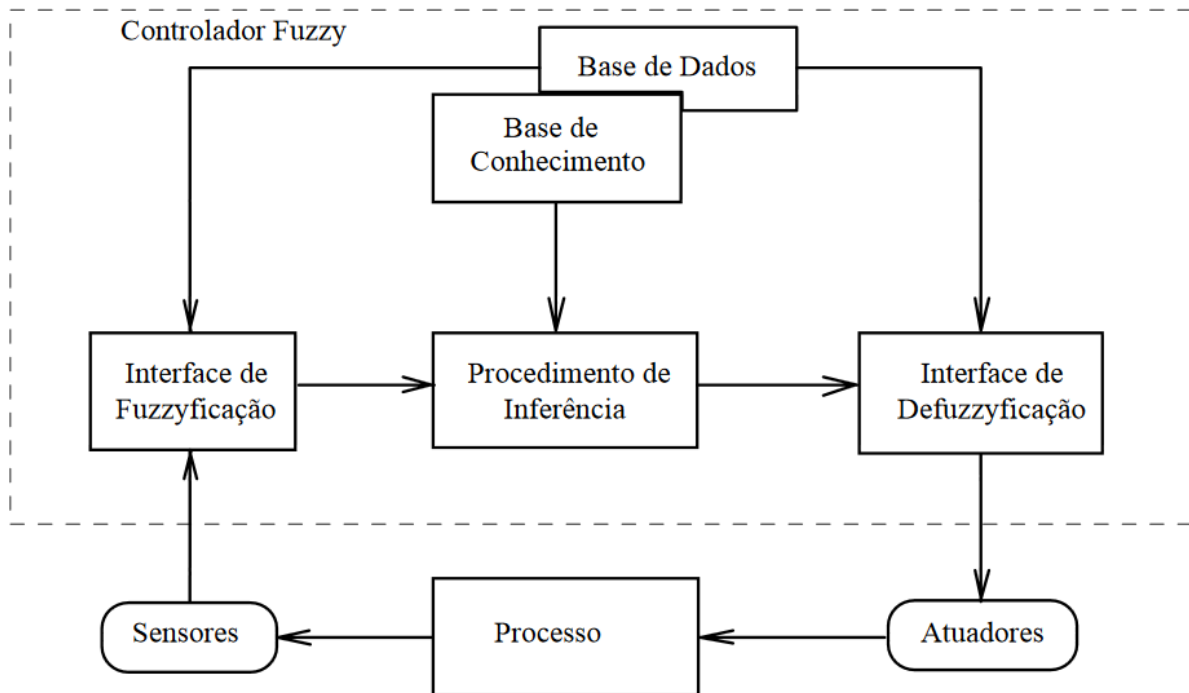
2.4 CONTROLADORES FUZZY

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; 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) (BELOHLAVEK et al., 2009). Estes valores são conhecidos como graus de pertinência. A utilização da lógica *fuzzy* vai desde o desenvolvimento de ferramentas de apoio a tomada de decisão até o projeto de controladores destinados a automação de processos.

Para Gomide e Gudwin (1994), no controle *fuzzy*, realiza-se a modelagem das ações a serem tomadas a cada variação do processo, a partir do conhecimento especialista, sem que seja necessário modelar o processo em si. Em outras palavras, é possível traduzir o conhecimento empírico humano sobre um assunto e implementá-lo em um controlador através da lógica *fuzzy*. A estrutura de um controlador *fuzzy* aplicado a um processo genérico é apresentada na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Estrutura de um processo controlado por controlador *fuzzy*



Fonte: Gomide e Gudwin, 1994.

Como em qualquer sistema de controle, a interação com o processo é realizada através de sensores e atuadores. O controlador *fuzzy* possui alguns componentes principais elencados no diagrama (GOMIDE e GUDWIN, 1994):

- *Interface de Fuzzyficação*, que realiza a leitura das variáveis numéricas colhidas do processo pelos sensores e as interpreta de acordo com os conjuntos de pertinência Fuzzy;
- *Procedimento de Inferência*, onde ocorre o processamento dos dados *fuzzy* em conjunto com as regras definidas na *Base de Conhecimento*, de modo a inferir as ações de controle;
- *Interface de Defuzzyficação*, que transforma as ações *fuzzy* inferidas em ações de controle dirigidas ao processo.

O embasamento teórico mais aprofundado de cada etapa do controlador e outros conceitos e definições necessários para aplicação da lógica *fuzzy* são apresentados a seguir.

2.4.1 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.

O conceito de variável linguística é a base da lógica nebulosa. Uma variável convencional é numérica e precisa, e não é capaz de expressar a nebulosidade da teoria dos conjuntos *fuzzy*. Desta forma, a lógica *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. 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 um mesmo conjunto pode ter domínio diferente para situações diferentes, dependendo do contexto ao qual a variável seja aplicada.

Já 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: a triangular, a trapezoidal, as funções rampa.

2.4.1.1 Função de pertinência triangular

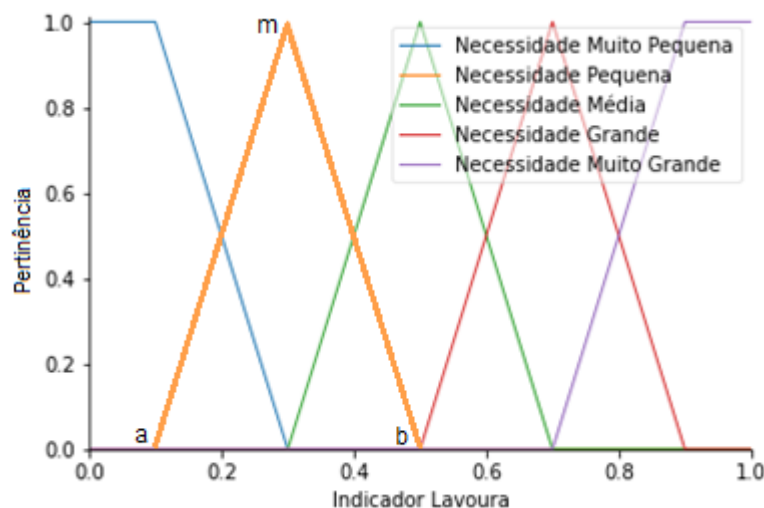
A função triangular é a mais simples dentre as funções de pertinência. Isto porque é completamente descrita por apenas três parâmetros, que são os três pontos que delimitam os seguimentos lineares que formam o triângulo, conforme é apresentado na Equação (2.3) (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

$$A(x, a, b, m) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (2.3)$$

em que a , m e b são os vértices do triângulo.

A Figura 2.7 apresenta graficamente exemplos de função de pertinência triangular que compõem a variável “Indicador Lavoura”, caracterizada no tópico 3.3.2.4.1.

Figura 2.7 – Exemplo de função de pertinência triangular



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 2.7 apresenta uma função triangular de forma destacada. 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 suporte da função. A função triangular destacada, nomeada “Necessidade Pequena”, por exemplo, possui $a=0,1$, $m=0,3$ e $b=0,5$.

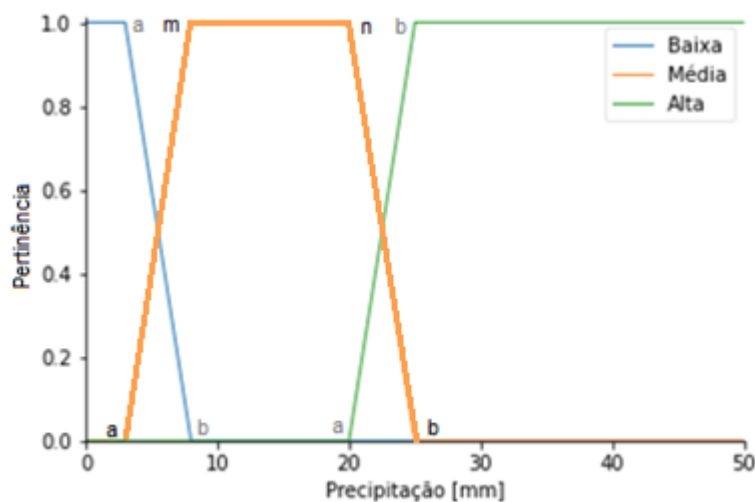
2.4.1.2 Função de pertinência trapezoidal

Função definida por quatro parâmetros, que determinam três segmentos de reta que formam o trapézio. A função trapezoidal, também denominada função π , é definida pela Equação (2.4) (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007).

$$A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m) \\ 1, & \text{se } x \in [m, n) \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (2.4)$$

em que a , m , n e b são os vértices do trapézio. Graficamente, esta função comporta-se como apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Exemplo de função de pertinência trapezoidal



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A função trapezoidal é apresentada na Figura 2.8 de forma destacada. 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. Para esta função, por exemplo, $a=3$, $m=8$, $n=20$ e $b=25$.

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

2.4.1.3 Funções de pertinência rampa

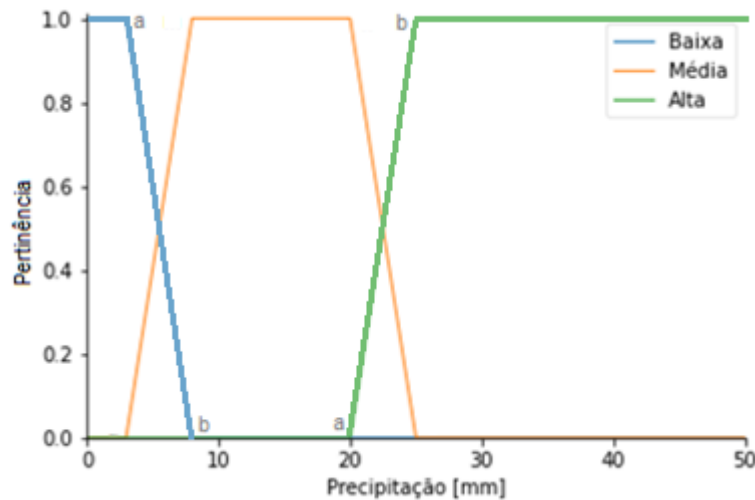
As funções de pertinência do tipo rampa são casos particulares da função trapezoidal. A função rampa à direita apresenta pertinência máxima aos elementos abaixo do valor a , pertinências parciais entre a e b , e pertinência nula a partir de b , conforme Equação (2.5). Já a função rampa à esquerda tem comportamento oposto, iniciando com pertinência nula para elementos abaixo de a e com pertinência igual a um para elementos acima de b , conforme Equação (2.6).

$$A_D(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x < a \\ \frac{x-b}{a-b}, & \text{se } x \in [a, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (2.5)$$

$$A_E(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } x \in [a, b] \\ 1, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (2.6)$$

O comportamento gráfico de cada função pode ser visualizado na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Exemplos de funções de pertinência rampa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na figura 2.9, as funções rampa foram destacadas. A função nomeada “Baixa” é uma função rampa à direita e possui $a=3$ e $b=8$. Já a função nomeada “Alta” é uma função rampa à esquerda e possui $a=20$ e $b=25$.

Existem ainda outras funções de pertinência frequentemente utilizadas, como a gaussiana, a exponencial, a sigma e a sino, bem como outras não tão frequentemente utilizadas, como as baseadas em funções polinomiais (PEDRYCZ e GOMIDE, 2007). Nenhuma destas, contudo, foi aplicada a esta tese.

2.4.2 Base de conhecimento – conjunto de 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 (2.7). As regras podem expressar relações de certeza qualificada, de graduação, de função, de condições, entre outras.

$$\text{se } \text{condição}_1 \text{ é } A \text{ E } \text{condição}_2 \text{ é } B \text{ E } \dots \text{condição}_n \text{ é } N \text{ então } \text{conclusão}_1 \text{ é } X \quad (2.7)$$

em que A , B , N e X são os conjuntos *fuzzy* de entrada e saída previamente definidos.

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; 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; GOMIDE, 2007; COX, 1999). Geralmente, as regras são elaboradas baseadas no conhecimento empírico de um especialista ou mais.

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; GOMIDE, 2007). Uma das vantagens de utilizar o conhecimento do especialista é que o tempo de desenvolvimento das regras é menor, se comparado com outras técnicas.

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, situações que envolvam grande número de variáveis de entrada e conjuntos linguísticos. A qualidade das regras pode se deteriorar nestes casos. O

Quadro 2.4 apresenta algumas diretrizes relativas à consistência entre regras na sua elaboração.

Quadro 2.4 – Consistência entre condições e conclusões de regras *fuzzy*

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

Fonte: Adaptado de Pedrycz e Gomide, 2007.

O Quadro 2.4 apresenta diretrizes básicas de consistência para a construção das regras de uma base de conhecimento *fuzzy*. É necessária atenção a dois principais pontos: a plenitude de cobertura de todos os conjuntos *fuzzy* por regras e a consistência das regras. O conjunto de regras elaborado, deste modo, é processado por uma etapa denominada “inferência”.

2.4.3 Inferência *fuzzy*

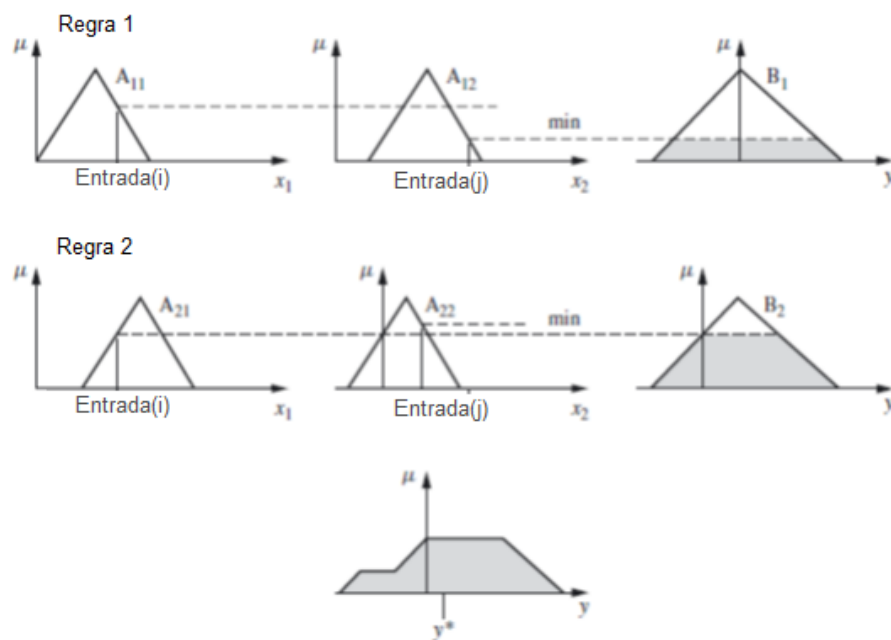
A base de conhecimento e as variáveis linguísticas provenientes da *fuzzyficação* são interpretadas por um método de inferência Fuzzy. Os mais conhecidos são: Mamdani, Larsen, Tsukamoto e Takagi-Sugeno. Uma das diferenças entre estes é o formato dos dados de saída. Nos modelos de Tsukamoto e Takagi-Sugeno a conclusão de cada regra é dada através de uma função. Já nos modelos de Larsen e de Mamdani a conclusão de cada regra especifica um termo nebuloso dentro um conjunto fixo de termos (SANDRI; CORREA, 1999). Todavia, o sistema de Mamdani é o mais utilizado na prática e o mais explorado pela literatura (ROSS, 2010). Por estas razões, o controlador *fuzzy* escolhido para aplicação na metodologia proposta foi o Mamdani.

As características principais do controlador Mamdani 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). Na composição máximo dos mínimos, adotada nesta tese, 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 2.10 demonstra graficamente as operações nesta composição.

Figura 2.10 – Composição máximo dos mínimos



Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

No exemplo da Figura 2.10 observa-se duas variáveis, i e j , e duas regras relacionando-as:

- Regra 1: se (i é A_{11} e j é A_{12}) então (y é B_1);
- Regra 2: se (i é A_{21} e j é A_{22}) então (y é B_2).

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 na Expressão (2.8).

$$\mu_{B^k}(y) = \max_k [\min [\mu_{A_{k1}}(entrada(i)), \mu_{A_{k2}}(entrada(j))]] , k = 1, 2, \dots, r \quad (2.8)$$

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

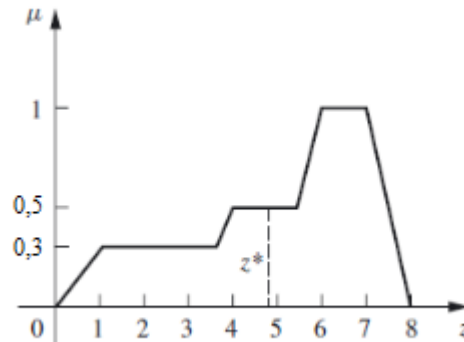
Para o exemplo apresentado, o resultado após o mecanismo de inferência é o descrito graficamente na parte inferior da Figura 2.11. O próximo passo é a etapa de *defuzzyficação* deste resultado.

2.4.4 Defuzzyficação

A *defuzzyficação* é a transformação de um valor *fuzzy* proveniente da saída do bloco de inferência 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 que melhor representa a decisão do controlador para que seja enviada efetivamente ao processo.

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, ou centroide, 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 2.11 exemplifica graficamente como é encontrado o centroide.

Figura 2.11 – Defuzzyficação pelo método do centroide



Fonte: Adaptado de Ross, 2010.

Na Figura 2.11 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 (2.9).

$$z^* = \frac{\int \mu_B(z) \cdot z \, dz}{\int \mu_B(z) \, dz} \quad (2.9)$$

em que μ_B é a união das conclusões de todas as regras.

O controlador *fuzzy*, nesta tese, é adotado como controlador de irrigação para lavouras de arroz e seu funcionamento segue princípios relacionados à computação de borda.

2.5 COMPUTAÇÃO DE BORDA

Computação de borda, ou *edge computing*, é um modelo descentralizado de processamento em que os dados são processados e analisados no próprio dispositivo que o gerou, ou próximo deste. Este tipo de estrutura visa ser utilizado em dispositivos eletrônicos que produzem uma quantidade massiva de dados. (KRISHNASAMY et al., 2021).

De forma que opta-se pela realização de parte, ou integralidade, do processamento e tratamento dos dados na própria aplicação, uma série de vantagens são destacadas, entre as quais: minimização dos requisitos de largura de banda e latência para comunicação dos dados, em comparação a uma aplicação

centralizada em um servidor físico ou na nuvem; possibilidade de redução de capacidade do servidor de dados, bem como outros componentes de infraestrutura de processamento e de rede; bem como, redução do tráfego de informações sensíveis entre aplicações e servidores (BUMGARDNER; HICKEY, 2020).

Os conceitos de computação de borda possuem aplicação em diversas áreas, entre as quais, a distribuição de energia elétrica. Chen et al. (2018) analisam cenários de aplicação de computação de borda em sistemas de distribuição inteligentes. Os autores apresentam e discutem os requisitos para possibilitar o gerenciamento de equipamentos de controle da rede de baixa tensão, como chaves inteligentes, reguladores de tensão e medidores inteligentes.

No mesmo caminho, Chen et al. (2019) propõem um sistema de computação de borda para redes elétricas inteligentes baseadas em internet das coisas, como forma de superar as desvantagens da computação em nuvem em sistemas de energia, entre as quais os requisitos de grande largura de banda e baixa latência. Os autores demonstram algoritmos para prever o custo da energia elétrica em um sistema de preços dinâmicos. Nas simulações, ficam demonstradas reduções expressivas da largura de banda e da latência, a partir de 100 dispositivos conectados, em comparação com uma aplicação em nuvem similar.

Um modelo de definição de rota de inspeção de redes elétricas baseado em computação de borda é proposto por Ye et al. (2020). Em testes em laboratório, a partir do uso de um robô, os autores concluem que a utilização da computação de borda possui capacidade de atingir taxas de eficiência acima de 98% no reconhecimento de faltas na rede, índice superior aos 84% de eficiência dos métodos de inspeção manuais.

Como é observado, a computação de borda trata-se de uma metodologia de estruturação de processamento que soluciona diversos problemas gerados pela alta quantidade de dados gerados em campo, como é o caso da estrutura de resposta da demanda proposta nesta tese. A partir da utilização dos controladores de irrigação processando as informações coletadas em tempo real, a quantidade de informações transmitidas ao servidor do gerenciador de resposta da demanda torna-se inferior ao que seria em caso de um sistema de controle centralizado.

Por se tratar de um conceito relativamente recente, a aplicação prática ainda enfrenta alguns desafios. Satyanarayanan (2017) cita alguns destes desafios para implementação e difusão das tecnologias com computação de borda, entre os quais

estão a maior complexidade de gerenciamento em relação a uma estrutura centralizada e a menor segurança em relação aos datacenters. Khan et al. (2019) acrescentam, ainda, como desafios, a confiança do usuário, a colaboração entre sistemas de computação de borda heterogêneos e a implementação de modelos de baixo custo que sejam tolerantes a falhas.

2.6 TRABALHOS CORRELATOS E ESTADO DA ARTE

Ao longo da execução da revisão bibliográfica desta tese, seja em dissertações e teses acadêmicas, seja em publicações em periódicos, não foram encontrados trabalhos com desígnio de propor uma estrutura de resposta da demanda aplicável às redes elétricas rurais, de forma a contribuir para a qualidade de energia nestas redes. Os 80 trabalhos relacionados pelos sistemas de busca das bases de dados consultadas foram analisados em relação a sua semelhança a essa tese, sendo que nenhum apresentou propósitos similares. No entanto, alguns trabalhos correlatos, mesmo que não totalmente relacionados com esta tese, merecem destaque, pois contribuem para elucidar o contexto das redes elétricas rurais e da implementação de mecanismos de resposta pelo lado da demanda de forma geral.

Girbau-Llistuella et al. (2019), por exemplo, citam os benefícios possíveis a partir da atualização das redes elétricas rurais com tecnologias *smart grid*. Os autores citam que a instalação de medidores inteligentes e outras tecnologias oferecem ao público a oportunidade de instaurar programas de resposta da demanda e, assim, tornar a operação da rede mais eficiente, economizar recursos tanto dos geradores quanto dos consumidores finais, bem como descongestionar o sistema elétrico. Os autores, contudo, ficam apenas na esfera teórica, não chegam a propor uma estrutura de resposta da demanda, como é a proposta desta tese.

Muller (2016) realiza um estudo sobre o impacto da resposta da demanda e outras tecnologias de *smart grid* sobre a demanda de energia nacional, bem como sobre a redução da emissão de CO₂ provocada. O autor utiliza a lógica *fuzzy* para construir seu modelo teórico e o aplica a cenários pré-definidos. O autor avalia a possível contribuição da resposta da demanda e conclui que a demanda brasileira pode ser reduzida em até 10% a partir da penetração de programas de resposta da demanda e de eficiência, bem como da geração distribuída e dos veículos elétricos.

Apesar de abordar dois dos temas centrais desta tese, a resposta da demanda e a utilização da lógica nebulosa, as semelhanças param neste ponto. Em seu trabalho, o autor não trata diretamente da resposta da demanda em si, tampouco propõe uma estrutura de resposta da demanda, pontos que são abordados pela presente tese de doutorado.

Campos (2017), por sua vez, verifica o uso de resposta da demanda baseada no preço e analisa o retorno de investimento da instalação da infraestrutura à concessionária. O autor utilizou duas modalidades tarifárias, período de uso (TOU) e tarifação de ponta (CPP), e buscou verificar a resposta de eficiência de sua implementação. Diferentemente da presente tese, o autor foca mais na análise das estruturas tarifárias dinâmicas, conceito que segundo o mesmo teria uma melhor eficiência para as características de consumo do mercado brasileiro. O autor, não aborda, portanto, a proposição de uma estrutura de resposta da demanda, tampouco analisa seus impactos em termos de qualidade da energia elétrica em redes de distribuição. Como conclusões, a partir da simulação de alguns cenários, verificou-se que a utilização de CPP traz resultados melhores à concessionária e que o Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) é a variável de maior impacto ao resultado.

No mesmo sentido, Levy (2013) avalia a implementação de uma resposta da demanda baseada em preços, utilizando o modelo com horário de ponta, intermediário e fora de ponta para clientes comerciais e residenciais urbanos. A autora utiliza a lógica *fuzzy* para realizar o ajuste do perfil de carga dos consumidores frente a variação das tarifas. Como resultado das simulações realizadas, observa-se redução da demanda ativa da subestação, e das perdas do sistema de distribuição. É percebida, ainda, uma elevação dos níveis de tensão durante o horário de ponta. O trabalho da autora, diferentemente desta tese, não traz uma proposta de estrutura de resposta da demanda, limitando-se a analisar impactos de um programa de resposta da demanda baseada em preços para a redução de carregamento de alimentadores urbanos em horários de ponta.

Ainda, Silva (2017) propõe um programa de resposta da demanda, através do controle de preço da tarifa, para clientes residenciais urbanos prevendo a utilização de geração solar fotovoltaica e veículos elétricos como elementos de armazenamento. O autor desenvolve um modelo de previsão para tratar dois pontos de grande incerteza nas redes elétricas inteligentes, o consumo/disponibilidade de energia elétrica das baterias de veículos elétricos e a geração de energia

fotovoltaica. Em termos de resposta da demanda, a abordagem do autor é em relação a uma precificação da energia em tempo real, de forma a sensibilizar os consumidores a um menor consumo em momentos de menor oferta. O autor não aborda a proposta de uma estruturação de resposta da demanda, tampouco entra no assunto de análises de qualidade da energia elétrica.

Santos (2016) utiliza um sistema *fuzzy* para determinar o perfil da curva de carga residencial. A autora destaca que não se tem conhecimento profundo das curvas de carga no Brasil e que seu estudo poderia contribuir para o gerenciamento da demanda e à eficiência do consumo. Neste sentido, a tese apresentada pode colaborar com futuros trabalhos de gerenciamento de resposta da demanda. A correlação do trabalho desta autora com a presente tese de doutorado é a aplicação de um sistema *fuzzy* no contexto do gerenciamento da demanda. Contudo, as propostas não possuem outras similaridades além de abordarem o mesmo tema e empregarem a lógica *fuzzy*.

Uma revisão literária sobre a resposta da demanda em nível residencial é realizada por Shareef et al. (2018). Os autores abordam os sistemas domésticos de gerenciamento de energia (HEMS, do inglês *Home Energy Management System*), e citam os diferentes tipos de programas de resposta da demanda (baseado em preços e em benefícios), equipamentos e sensores que possibilitam a implementação destes sistemas, bem como trazem uma comparação de controladores baseados em diferentes técnicas de inteligência computacional, entre elas redes neurais artificiais, lógica *fuzzy* e *neuro-fuzzy*. Comparativamente, é citado como vantagens da utilização da lógica *fuzzy* sua estrutura simples e a não necessidade de treinamento quando do desenvolvimento do controlador. Este trabalho fortalece, portanto, a escolha da lógica *fuzzy* para o desenvolvimento do controlador previsto nesta tese. Não há, contudo, qualquer correlação em termos práticos entre a proposta dos autores e a proposta apresentada nesta tese.

Hasan et al. (2018) desenvolveram um controlador de vazão de irrigação para lavouras de arroz, utilizando a lógica *fuzzy*, objetivando a eficiência de utilização da água. O trabalho não aborda a resposta da demanda. São utilizadas como variáveis de entrada a umidade do solo, que é adquirida via sensores de umidade, a posição da válvula e a estratégia de irrigação do agricultor. Os resultados mostram uma redução média de 12,3% no consumo de água. Este trabalho possui certa correlação com o controlador desenvolvido nesta tese, contudo não utiliza variáveis

meteorológicas ou informações do solo e a atuação dá-se sobre uma válvula controladora de vazão, o que não contribui para redução do consumo de energia.

Fierro-Chacón e Torres-Tello (2019) apresentam um sistema de irrigação para lavouras de feijão, utilizando um controle Fuzzy, com o objetivo de reduzir o consumo de água. Os autores consideram a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação solar verificadas em tempo real. Resultados prévios demonstram uma possibilidade de redução de 68% de consumo de água. Este trabalho mostra a relevância de trabalhar com variáveis meteorológicas para a automação da irrigação de lavouras. O trabalho não aborda o tema de resposta da demanda, e de mesma forma não trata da questão da qualidade da energia elétrica.

Said e Hartmann (2018) propõem um controlador *fuzzy* de armazenamento de energia magnético supercondutor (SMES, do inglês *Superconducting Magnetic Energy Storage*) para melhorar a confiabilidade de uma microrede rural com presença de geradores eólicos, quando em ilhamento. Os autores verificam que o controlador proposto confere maior segurança e confiabilidade ao sistema elétrico ao qual está conectado, principalmente em situações de entrada de geração e de rejeição de carga. Durante a pesquisa nas bases de dados, este trabalho obteve relação com três palavras-chave desta tese: *demand response*, *fuzzy logic* e *rural grids*. Percebe-se, contudo, que o trabalho não possui correlação prática direta com esta tese, não abordando a questão do uso de uma estrutura de resposta da demanda para melhoria de qualidade de energia em alimentadores rurais.

Aghajanzadeh e Therkelsen (2019) fazem um estudo teórico sobre serviços que os consumidores rurais irrigantes podem desempenhar em uma rede elétrica. Os autores citam a resposta da demanda como forma de corrigir variações de geração distribuída, que se mostra em crescente difusão entre os consumidores rurais no Estado da Califórnia. A resposta da demanda poderia reduzir os efeitos, no sistema elétrico, como as bruscas variações e outros distúrbios, bem como oferecer uma reserva de energia ao mercado e atender às contingências. Este trabalho reforça a relevância de implementar programas de gerenciamento de resposta da demanda voltados para os sistemas de distribuição rurais.

O Quadro 2.5 apresenta uma condensação dos trabalhos correlacionados a esta tese durante a pesquisa realizada às bases de dados. No quadro é possível visualizar as correlações verificadas entre os trabalhos citados e a proposta desenvolvida nesta tese.

Quadro 2.5 – Quadro-resumo dos trabalhos citados nesta tese

Trabalho	Palavra(s)-chave(s) associadas	Correlação
AGHAJANZADEH; THERKELSEN, 2019	Resposta da demanda; Sistema de irrigação; Redes elétricas rurais	Contribuição teórica sobre benefícios técnicos da implementação de programas de resposta da demanda em redes elétricas rurais.
CAMPOS, 2017	Resposta da demanda	Análise de benefícios econômicos à concessionária através da implementação de programas de resposta da demanda.
FIERRO-CHACÓN; TORRES-TELLO, 2019	Lógica <i>fuzzy</i> ; Sistema de Irrigação	Controle de irrigação utilizando lógica <i>fuzzy</i> e variáveis meteorológicas.
GIRBAU-LLISTUELLA, 2019	Resposta da demanda; Redes elétricas rurais	Contribuição teórica sobre benefícios técnicos da implementação de programas de resposta da demanda em redes elétricas rurais.
HASAN et al., 2018	Lógica <i>fuzzy</i> ; Sistema de Irrigação	Controle de irrigação de lavouras de arroz utilizando lógica Fuzzy.
LEVY, 2013	Resposta da demanda; Lógica <i>fuzzy</i>	Análise de benefícios técnicos (qualidade da energia e eficiência) da implementação de programas de resposta da demanda.
MENTA, 2015	Resposta da demanda	Nenhuma correlação com esta tese.
MOREIRA, 2017	Resposta da demanda	Nenhuma correlação com esta tese.
MULLER, 2016	Resposta da demanda; Lógica <i>fuzzy</i>	Impacto de um programa de resposta da demanda sobre a demanda média e a demanda máxima de um sistema elétrico.
SAID; HARTMANN, 2018	Resposta da demanda; Redes elétricas rurais; Lógica <i>fuzzy</i>	Nenhuma correlação com esta tese.
SANTOS, 2016	Resposta da demanda; Lógica <i>fuzzy</i>	Nenhuma correlação com esta tese.
SHAREEF et al., 2018	Resposta da demanda; Lógica <i>fuzzy</i>	Revisão literária de programas de resposta da demanda, de técnicas de programação dos controladores de RD.
SILVA, 2017	Resposta da demanda	Nenhuma correlação com esta tese.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

De forma geral, verifica-se que muitos dos trabalhos que foram filtrados nas bases de dados consultadas, a partir dos termos-chave centrais desta tese, não apresentaram relações práticas de similaridade com o trabalho aqui proposto. Alguns trabalhos de ordem teórica, como os casos de Aghajanzadeh e Therkelsen (2019), Girbau-Llistuella et al. (2019) e Shareef et al. (2018), reforçaram conceitos desenvolvidos neste capítulo, como o de que a implementação de programas de resposta da demanda pode ser efetiva para a melhoria das condições de fornecimento de energia elétrica.

Alguns trabalhos, como de Muller (2016) e Levy (2013), analisaram os efeitos de aplicação de um programa de resposta da demanda através de simulações. Outros, como de Fierro-Chacón e Torres-Tello (2019) e Hasan et Al. (2018), trouxeram abordagens de controladores de irrigação utilizando lógica fuzzy. Estes foram os que mais se aproximaram, em termos de correlação, com o trabalho desenvolvido nesta tese. Contudo, nenhum dos trabalhos pesquisados tem como escopo a proposta de uma estrutura prática de resposta da demanda, da mesma forma que nenhum dos trabalhos foca na análise da qualidade do fornecimento de energia elétrica em redes elétricas rurais, ou trabalham com as especificidades do consumo dos consumidores irrigantes. Os controles apresentados também não abordam a utilização da previsão do tempo como estratégia, bem como são mais simplificados em termos de quantidade de variáveis consideradas no modelo, além de não focarem na eficiência energética, mas na redução do consumo de água para irrigação.

Durante as buscas de similaridade, foram, ainda, detectados outros 67 trabalhos, que apesar de estarem relacionados com os termos chave buscados, não possuíam qualquer tipo de correlação com esta tese, de forma que não foram mencionados neste tópico.

2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Na revisão bibliográfica apresentada neste capítulo foi realizado o levantamento das principais características das redes rurais de distribuição de energia elétrica, seus problemas e principais necessidades. Foram abordados ainda algumas especificidades dos sistemas de irrigação da cultura do arroz irrigado, que estão inseridos em grande número nas redes elétricas rurais no Rio Grande do Sul.

Em linhas gerais, a metodologia proposta nesta tese abordará uma estrutura de resposta da demanda para estas redes elétricas com presença de consumidores irrigantes, através de um controlador desenvolvido em lógica Fuzzy e um gerenciador de resposta da demanda com atuação sobre os controladores de irrigação. Deste modo, a resposta da demanda e os controladores *fuzzy* foram os outros temas abordados neste capítulo.

Por fim, comprovou-se a originalidade do trabalho proposto nesta tese, a partir da realização da revisão de trabalhos correlatos e do estado da arte. Esta etapa de pesquisa corroborou o ineditismo e a originalidade da proposta desta tese, tendo em vista que alguns dos trabalhos analisados chegam a abordar o tema de resposta da demanda, mas nenhum deles envolve-se na tarefa de gerenciamento da resposta da demanda. Ou seja, não foram encontrados trabalhos publicados que proponham uma estrutura que execute um gerenciamento de resposta da demanda em redes elétricas rurais de distribuição, com vias de melhorar a qualidade de energia elétrica nestas.

No capítulo seguinte é apresentada a metodologia proposta para a execução deste trabalho, contendo a descrição da estrutura de resposta da demanda e as etapas de desenvolvimento do controlador de irrigação e do gerenciador de resposta da demanda.

3 PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA EM REDES ELÉTRICAS RURAIS

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para a estrutura de resposta da demanda voltada para alimentadores rurais com presença de consumidores irrigantes. O capítulo apresenta, inicialmente, uma visão geral sobre a estrutura proposta, passando pela apresentação detalhada do controlador de irrigação com resposta da demanda baseado em lógica *fuzzy* e, finalizando, o gerenciador de resposta da demanda para a inferência da concessionária na operação dos controladores de irrigação, o que completa a estrutura proposta.

3.1 APRESENTAÇÃO GERAL DA ESTRUTURA PROPOSTA

A premissa básica da estrutura proposta consiste em possibilitar a implementação de um mecanismo de resposta da demanda baseada em incentivos, que permita à concessionária de distribuição atuar sobre consumidores rurais de energia elétrica que possuam grandes cargas para irrigação de arroz irrigado. A Figura 3.1 apresenta de forma geral a estrutura de resposta da demanda proposta.

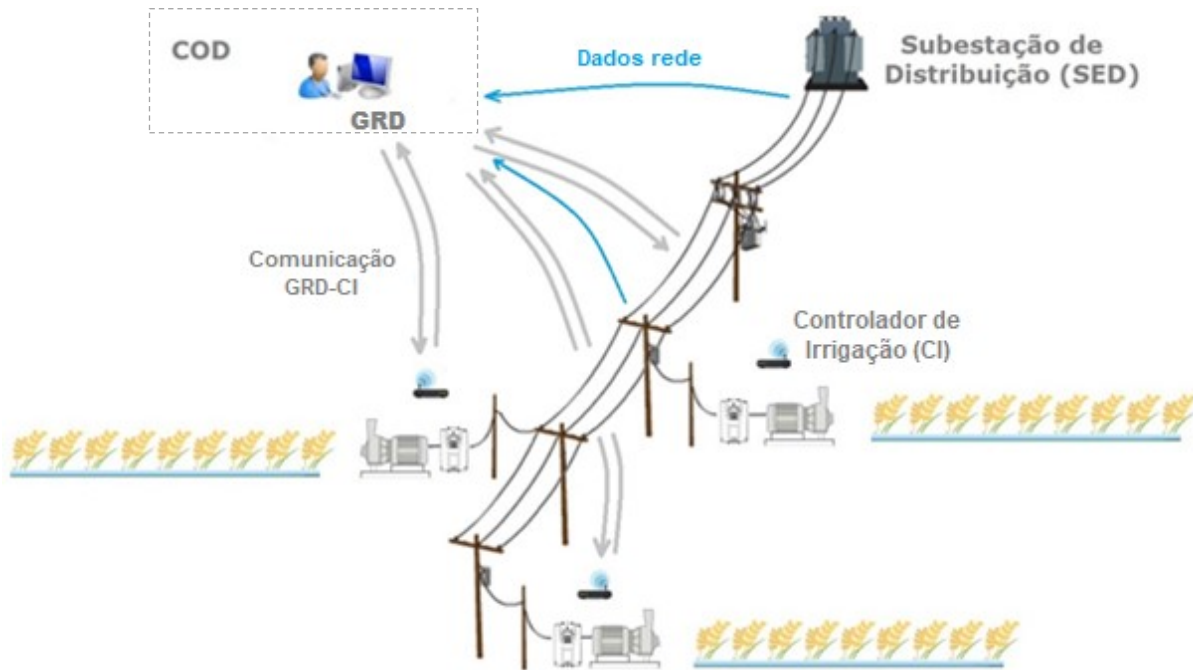
O Controlador de Irrigação (CI) é desenvolvido com a lógica *fuzzy* e permite a influência da concessionária, realizando uma resposta do consumidor frente a ocorrências operativas, tais como subtensão ao longo do alimentador, sobrecarga do transformador e contingências na subestação. O equipamento localizado na propriedade do consumidor também tem a funcionalidade de um controlador de nível inteligente, com consumo de energia elétrica otimizado de acordo com as características da lavoura, medição de nível, dados de previsão do tempo e de tarifas ao longo do dia.

A concessionária de distribuição fará o gerenciamento pelo lado da demanda a partir do Gerenciador de Resposta da Demanda (GRD), localizado no Centro de Operação da Distribuidora (COD). Este elemento terá o papel de monitorar os parâmetros elétricos colhidos de equipamentos de medição distribuídos ao longo do alimentador rural, bem como realizar o gerenciamento dos controladores de irrigação.

A atuação do gerenciador sobre os controladores de irrigação poderá ocorrer de forma autônoma, a partir de situações previamente cadastradas, bem como de

forma manual, realizado pelo operador do COD, sempre dentro dos limites previamente estabelecidos com os clientes em contrato.

Figura 3.1 – Organização geral da estrutura de resposta da demanda



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A hipótese levantada é de que a resposta da demanda aplicada a sistemas de levante de arroz irrigado pode contribuir para melhorar a qualidade da energia elétrica e do fornecimento em redes elétricas rurais com concentração destes consumidores. Espera-se, com o desenvolvimento do controlador de irrigação integrado ao gerenciador, comprovar esta hipótese a partir de simulações realizadas com dados de redes elétricas rurais em regiões de grande concentração de cultivo de arroz irrigado.

A proposta desta tese é desenvolver uma metodologia de uma estrutura de resposta da demanda voltada a consumidores rurais irrigantes. Com isto pretende-se contribuir para a qualidade de fornecimento nos alimentadores rurais, a partir da redução dos picos de demanda do sistema, da redução da ocorrência de sobrecarga no transformador da subestação, melhoria do perfil de tensão ao longo da rede, redução das perdas técnicas nos alimentadores rurais, redução dos desligamentos destes alimentadores, e redução do pagamento de compensações aos clientes.

Outros benefícios esperados com a aplicação desta tese são elevar a eficiência dos sistemas de irrigação, reduzindo os custos de energia elétrica paga pelos consumidores rurais irrigantes, elevar a capacidade de atendimento dos alimentadores e possibilitar à concessionária postergar investimentos em reforços, e contribuir para a melhoria geral da qualidade de energia nas redes de distribuição elétricas rurais. A primeira etapa da metodologia proposta é a modelagem do controlador de irrigação.

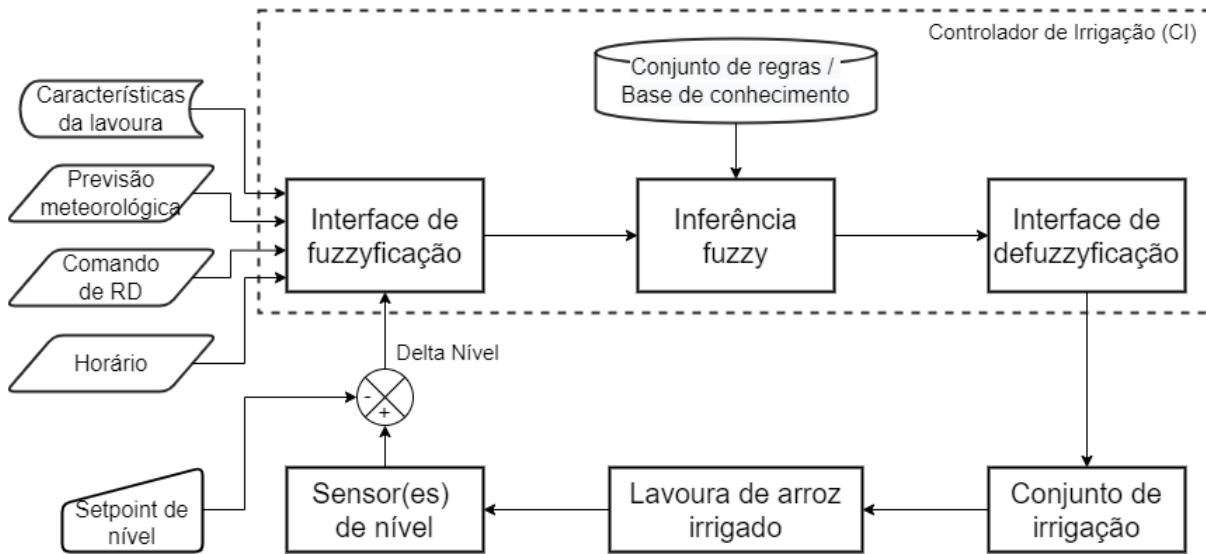
3.2 MODELAGEM DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO

O controlador de irrigação (CI) trata-se de um controlador inteligente de nível de água de lavouras de culturas irrigantes. Seu principal diferencial em relação a um controlador de nível comum é ter resposta à previsão meteorológica, além de considerar características da lavoura e tarifas horárias. Este controlador está hierarquicamente abaixo do gerenciador de resposta da demanda (GRD), localizado no centro de operação da distribuição (COD) da concessionária.

O controlador de irrigação tem seu desenvolvimento apoiado na lógica *fuzzy*, com um sistema especialista baseado em regras. Esta foi escolhida pois possui a capacidade de traduzir em regras o conhecimento empírico de especialistas da área, bem como possibilita a manipulação de diferentes categorias de variáveis, em diferentes escalas e unidades, incluindo variáveis não numéricas. Estas características possibilitam a modelagem de uma lavoura de arroz irrigado.

Considerando entradas como nível de água na lavoura, características do solo e da área a irrigar e dados de previsão meteorológica, propõe-se um modelo de automação de irrigação que interprete a real necessidade de irrigação e que impacte positivamente na redução dos consumos de energia elétrica e de água. A Figura 3.2 apresenta um diagrama de visualização geral da estrutura do controlador de irrigação.

Figura 3.2 – Diagrama geral do controlador de irrigação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

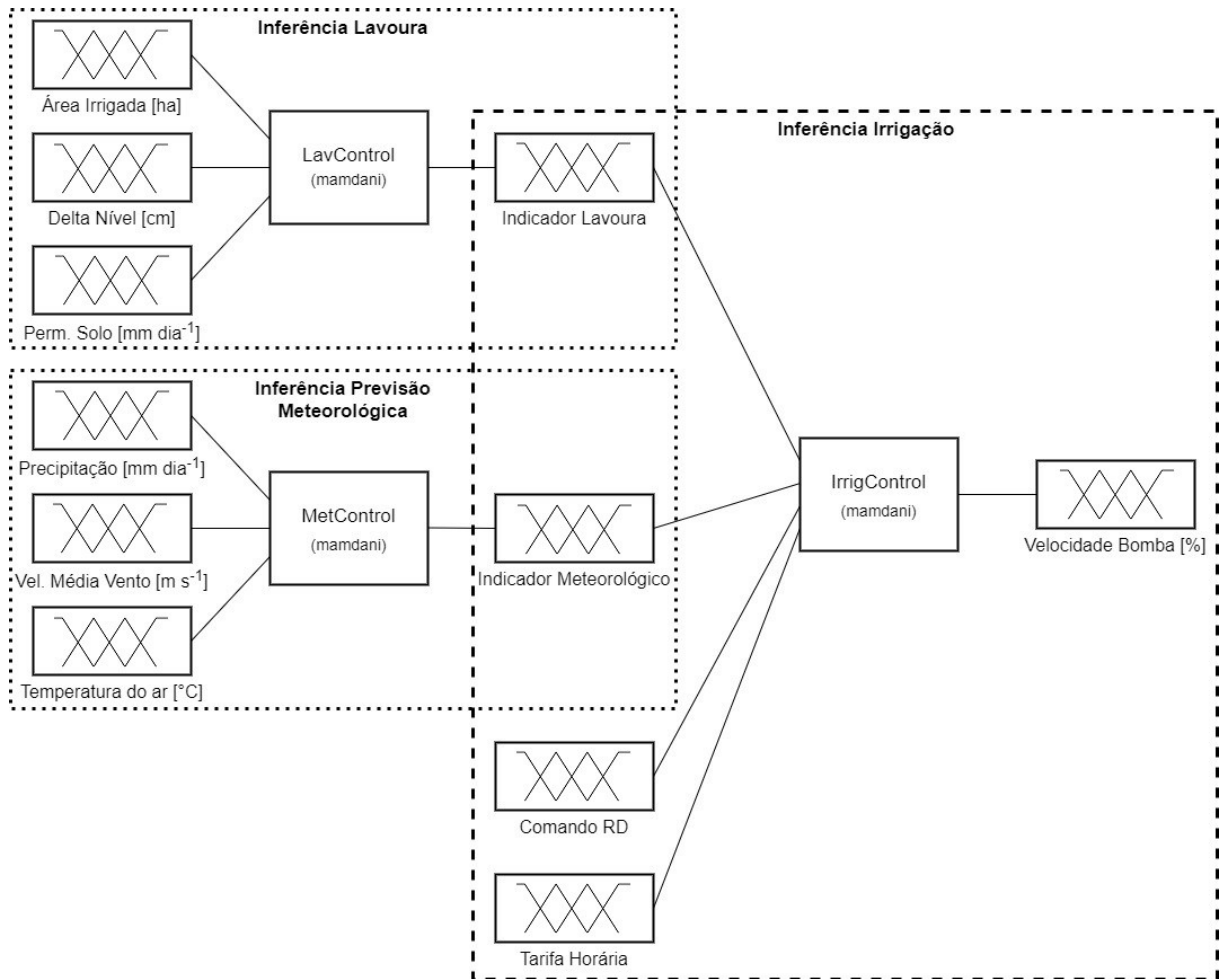
A saída do controlador de irrigação é um sinal de referência de velocidade, que é enviado ao conjunto de irrigação, composto por inversor de frequência, motor de indução e bomba centrífuga. A vazão de água de reposição da lavoura de arroz irrigado é diretamente proporcional à velocidade mecânica do conjunto de irrigação. Assim, quanto maior for o sinal de referência enviado pelo CI, maior será a taxa de reposição de água e o nível de água na lavoura tende a aumentar mais rapidamente.

O controlador de irrigação trata-se de um sistema de controle em malha fechada, pois conta com sensoreamento que realiza a medição de nível da água presente na lavoura, que após a comparação com o ajuste de nível (*setpoint*) selecionado pelo usuário, volta como entrada para o controlador. O *setpoint* de nível foi adicionado ao modelo para permitir a adaptação do CI aos diferentes métodos de manejo de água realizados pelos rizicultores.

São consideradas como informações de entrada do controlador as características pertinentes à lavoura, dados da previsão meteorológica, a diferença (Delta Nível) entre o nível água lido pelo sensor e o ponto de ajuste realizado, os comandos de RD e a tarifa horária. As informações de área cultivada e de permeabilidade média do solo são fixas dentro de uma safra, as demais entradas consideradas são todas variáveis.

O controlador *fuzzy* proposto é composto de duas etapas, que possuem estrutura *fuzzy* completa, com *fuzzyficação*, inferência e *defuzzyficação*, conforme apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Estrutura da modelagem *fuzzy*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na primeira etapa, as variáveis foram agrupadas de acordo com sua origem, lavoura e previsão meteorológica, compondo dois sistemas *fuzzy* distintos, de forma a obter uma melhor relação entre as variáveis para a definição das regras dentro dos blocos de inferência.

As variáveis de saída dos blocos de inferência da primeira etapa, "Indicador Lavoura" e "Indicador Meteorológico", são utilizadas como entradas na etapa de inferência posterior, chamada Inferência Irrigação, em conjunto com as variáveis de

entrada “Comando RD” e “Tarifa Horária”. Após este bloco de inferência, na variável de saída “Velocidade Bomba” é gerado um sinal de 0 a 100%, proporcional à velocidade (rotação) que o conjunto motor-bomba de irrigação deve operar, sendo 100% a rotação nominal.

No controlador de irrigação, são utilizados elementos que relacionados ao balanço hídrico da lavoura monitorada, como a área irrigada, a permeabilidade do solo e as variáveis da previsão meteorológica. Em adição, foram considerados aspectos do sistema elétrico, como a resposta da demanda, que gerará no controlador uma resposta à necessidade operativa do sistema de distribuição, bem como a consideração à tarifa horária, que intensificará ou reduzirá a irrigação de acordo com o custo da energia elétrica. Na sequência deste tópico, cada etapa do controlador de irrigação será detalhada.

3.2.1 Informações de entrada

Na escolha das entradas do controlador, buscou-se compreender a maior quantidade de aspectos relevantes ao balanço hídrico da lavoura, de forma a representar a situação real com a maior fidelidade possível. 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 3.4 ilustra as informações de entrada consideradas em cada natureza.

Figura 3.4 – Variáveis de entrada

DADOS LAVOURA	PREVISÃO DO TEMPO	SIST. ELÉTRICO
* Área Irrigada (ha)	* Precipitação (mm dia-1)	* Resposta da Demanda (comando GRD)
* Permeabilidade do Solo (mm dia-1)	* Temperatura Média (°C)	* Tarifa Horária
* Delta Nível (cm)	* Vel. Média Vento (m s-1)	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

As características da lavoura consideradas foram *área irrigada* (ha), *permeabilidade do solo* (mm dia⁻¹) e *delta nível* (cm). Há cultivares que necessitam de contínua saturação do solo com água, como é o caso do arroz irrigado. Conforme especialista Engenheiro Agrônomo do IRGA (2016), 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. O nível de lâmina d'água desejado é uma escolha de cada produtor. Segundo especialista, 5 cm é um valor médio adotado.

O monitoramento do nível atual da lâmina d'água é lido pelo controlador após a medição desta variável por um sensor de nível posicionado na lavoura. Nos casos de lavouras em terrenos em desnível e alimentação dos tabuleiros inferiores por gravidade, é necessário que a medição ocorra no tabuleiro inferior, de forma a garantir o nível mínimo deste ponto. A variável *delta nível* deve ser gerada externamente a partir da subtração do nível medido com a referência desejada (*setpoint*).

A *área irrigada* é equivalente à área cultivada 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. Esta característica pode alterar de uma safra para outra, em uma mesma lavoura, e deve ser parametrizada pelo usuário a cada novo plantio.

A *permeabilidade do solo* é uma característica física, que reflete na velocidade da percolação vertical. Quanto maior a permeabilidade do solo, maior o volume de água drenado e maior a necessidade de reposição. Com a informação do tipo de solo do local da lavoura, obtida no SOMABRASIL, e o perfil de drenagem deste solo, informação coletada no Quadro 2.3, procede-se à entrada da informação de permeabilidade do solo no controlador. Esta parametrização é realizada uma única vez no início da safra. A fuzzyficação da variável, também realizada de acordo com os dados obtidos do SOMABRASIL e do Quadro 2.3, é detalhada na seção 3.2.3.3.

Pelo lado da previsão do tempo, em todo o território brasileiro as informações meteorológicas são de domínio público e podem ser coletadas no sítio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Dentre as informações disponibilizadas, estão os dados de previsão do tempo para todas as cidades do Brasil, com uma antecipação de até quatro dias. São disponibilizados dados de temperatura do ar, precipitação

pluvial e velocidade do vento (INMET, 2020). As informações meteorológicas disponibilizadas pelo INMET pertinentes ao balanço hídrico agrícola e consideradas neste trabalho são *temperatura média* ($^{\circ}\text{C}$), *precipitação* (mm dia^{-1}) e *velocidade média do vento* (m s^{-1}). A leitura das variáveis de previsão do tempo é considerada com uma antecipação de um dia em relação ao dia atual (previsão do tempo do dia seguinte), por serem estes os dados mais confiáveis disponíveis (INPE, 2020).

A *precipitação* contribui positivamente para a reposição das perdas hídricas por percolação e por evapotranspiração da lavoura. A *temperatura do ar* está associada à evaporação, que representa a transferência de água de uma superfície úmida para a atmosfera. A evaporação acelera a necessidade de reposição de água em uma lavoura. Quando maior a temperatura do ar, maior é a evaporação. 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.

Para que o controlador *fuzzy* compreenda e possa trabalhar com as informações trazidas pelas variáveis de entrada, estas necessitam passar pela etapa chamada *fuzzyficação*.

3.2.2 Fuzzyficação das variáveis de entrada

A etapa de *fuzzyficação* compreende a tradução das informações de entrada, sejam estas numéricas ou não, em termos linguísticos, através de conjuntos de funções de pertinência.

Como auxílio à *fuzzyficação*, foram realizadas, durante o ano de 2016, entrevistas com três especialistas das áreas pertinentes à irrigação em lavouras. Os especialistas entrevistados possuem os seguintes currículos:

- Doutora em Fitotecnia com ênfase em Agrometeorologia, professora colaboradora do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: respondeu questões relacionadas à influência das variáveis meteorológicas sobre a cultura do arroz irrigado e seu impacto na necessidade de reposição da irrigação;

- Mestre em Agronomia, com ênfase em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador em Silvicultura e Especialista em Recursos Naturais e Manejo Florestal de uma multinacional do ramo da celulose: trouxe à luz esclarecimentos sobre os tipos de solo e impactos da percolação dos mesmos sobre as culturas agrícolas irrigadas;
- Engenheiro Agrônomo do Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA): esclareceu questões práticas relacionadas à lavoura do arroz, aos sistemas de irrigação e às práticas mais comuns adotadas pelos produtores;

As informações levantadas nestas entrevistas, acrescidas dos dados encontrados na revisão bibliográfica, formam a base de dados utilizada tanto para a *fuzzyficação* das variáveis de entrada, quanto para a criação dos conjuntos de regras, que é apresentado no tópico 3.2.4.

Por se tratar de um desenvolvimento baseado na opinião de especialistas, como regra para a *fuzzyficação* das variáveis de entrada, definiu-se três conjuntos para realizar uma cobertura do intervalo de cada variável. Este número foi definido de forma a conciliar dois conceitos antagônicos trazidos por Pedrycz e Gomide (2007): deve-se buscar a descrição da variável da forma mais fina possível, o que implica em um número maior de conjuntos; contudo, o número de regras aumenta em ritmo acelerado de acordo com o aumento da quantidade de conjuntos *fuzzy* das variáveis, bem como sua qualidade deteriora-se em ritmo igualmente acelerado nestes casos. Os autores acrescentam, ainda, que, em geral, um excessivo número de conjuntos não agrega vantagens, mas pode desordenar a descrição do fenômeno e impactar negativamente a semântica da descrição da variável.

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

3.2.2.1 Área Irrigada

A variável *Área Irrigada* representa a área total da lavoura cultivada 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.

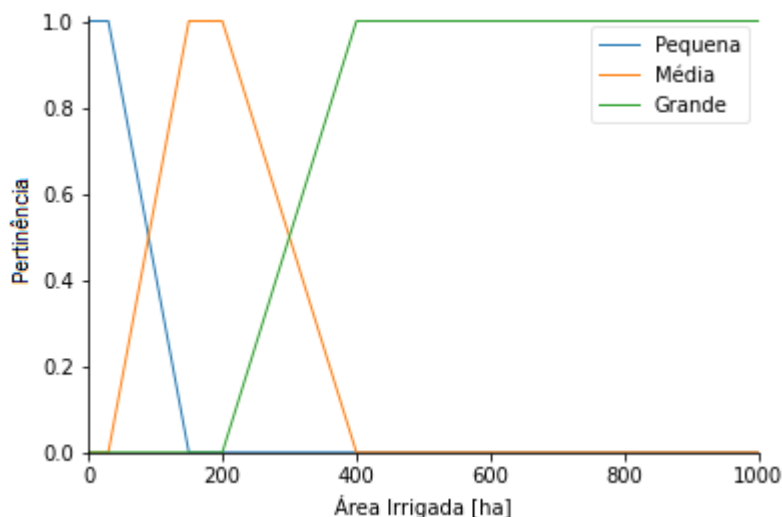
Tabela 3.1 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Área Irrigada*

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, 2022.

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 é nula. Na função trapezoidal os parâmetros *m* e *n* indicam o intervalo onde os valores de pertinência são máximos para o subconjunto.

A parametrização dos grupos de pertinência da variável *Área Irrigada* foi realizada 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. A Figura 3.5 apresenta graficamente a variável *Área Irrigada*.

Figura 3.5 – Funções de pertinência da variável *Área Irrigada*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

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.

3.2.2.2 Delta Nível

As informações de leitura do nível atual da lavoura e de ajuste de nível (*setpoint*), realizado pelo produtor rural de acordo com a técnica de irrigação praticada, são utilizadas para o cálculo do *Delta Nível* (diferença entre os dois valores). Esta diferença, ou delta, é encaminhada para a entrada da lógica Fuzzy.

Para traduzir as informações das referências citadas, foram utilizados três grupos de pertinência à variável *delta nível*: *Negativo*, *Baixo* e *Alto*, parametrizados de acordo com a Tabela 3.2. A unidade mais utilizada para nível de lâmina d'água, no campo é o centímetro (cm). Todos os parâmetros foram definidos em escala de centímetros.

Tabela 3.2 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Delta Nível*

Subconjunto	Função	Parâmetros (cm)			
		a	m	n	b
Negativo	Trapezoidal	-15	-15	-2	1
Baixo	Triangular	-2	1	NA	4
Alto	Trapezoidal	1	4	15	15

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Neste caso, a variável foi modelada a partir de um ponto de ajuste, que é definido por cada produtor, de acordo com a técnica de irrigação adotada. Isto justifica a existência de valores negativos para esta variável. Considera-se delta nível baixo os valores entre -1 e 1 cm, e alto os valores acima de 4 cm.

3.2.2.3 Permeabilidade do Solo

A *Permeabilidade do Solo* corresponde à velocidade de percolação vertical de água de acordo com o tipo de solo da região em que o cultivo é realizado. Como já abordado na seção 3.2.2, a proposta, nesta tese, é o cruzamento das informações

de tipo de solo, coletadas no SOMABRASIL (EMBRAPA, 2020), com a avaliação qualitativa das características de permeabilidade (drenagem) dos diferentes tipos de solo de Rezende (1986), ilustradas no Quadro 2.3. Trabalhos como o de Tabbal et al. (2002) e o de Singh et al. (1993), por sua vez, trazem quantitativamente, em mm dia^{-1} , os valores para drenagem considerada muito lenta, lenta ou rápida. O cruzamento de todas estas informações gera a parametrização dos subconjuntos na *fuzzyficação* da variável *Permeabilidade do Solo*, que é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Funções e parâmetros da variável *Permeabilidade do Solo*

Subconjunto	Função	Parâmetros (mm dia^{-1})			
		a	m	n	b
Muito Lenta	Trapezoidal	0	0	2	5
Lenta	Trapezoidal	2	5	7	12
Rápida	Trapezoidal	7	12	30	30

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

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

3.2.2.4 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 variável foi representada por três subconjuntos: Baixa, Média e Alta. Para definir sua escala tomou-se como base a normal climática de precipitação do Rio Grande do Sul, entre os anos de 1981 e 2010 (INMET, 2019). O dia de maior chuva no período, considerando apenas os meses típicos de safra do arroz irrigado (outubro a abril) totalizou 200 mm, este foi ajustado como fundo de escala. Para um montante de chuva médio, considerou-se 12 mm, valor que compensaria as perdas de um solo com permeabilidade lenta, característico das

áreas de cultivo do arroz irrigado, sendo este o critério adotado. Os parâmetros dos subconjuntos que definem esta variável são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Precipitação*

Subconjunto	Função	Parâmetros (mm dia ⁻¹)			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0	0	3	11
Média	Trapezoidal	3	11	14	25
Alta	Trapezoidal	14	25	200	200

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Previsões de precipitação nula ou abaixo de 3 mm dia⁻¹ serão classificadas como precipitação baixa, assim como previsões de chuva entre 8 e 20 mm dia⁻¹ serão consideradas como de precipitação média e valores previstos acima de 25 mm dia⁻¹ serão considerados de alta precipitação.

3.2.2.5 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 e possui sua normal para o Estado do Rio Grande do sul disponibilizada pelo INMET. A média da velocidade do vento entre 1981 e 2010, nos meses típicos de safra de arroz irrigado (outubro a abril) é de 2,5 m s⁻¹ (INMET, 2019), valor definido como central da escala de *Velocidade Média do Vento*. A Tabela 3.5 apresenta a parametrização dos conjuntos de pertinência Fuzzy.

Tabela 3.5 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Velocidade Média do Vento*

Subconjunto	Função	Parâmetros (m s ⁻¹)			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0	0	1,0	2,3
Média	Trapezoidal	1,0	2,3	2,7	4,0
Alta	Trapezoidal	2,7	4,0	6,0	6,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Velocidades do vento entre 2,3 e 2,7 m s⁻¹ são consideradas no subconjunto Média, enquanto que velocidades abaixo de 1,0 m s⁻¹ e acima de 4,0 m s⁻¹ são consideradas, respectivamente, nos subconjuntos Baixa e Alta. Os valores intermediários entre dois subconjuntos, ou seja, entre 1,0 e 2,3 m s⁻¹ e entre 2,7 e 4,0 m s⁻¹ possuem pertinências parciais nestes subconjuntos.

3.2.2.6 Temperatura do ar

A *Temperatura do ar* contribui à evaporação, que representa a transferência de água de uma superfície úmida para a atmosfera. A evaporação acelera a necessidade de reposição de água em uma lavoura. A temperatura média compensada possui sua normal, das décadas entre 1981 e 2010, para o Estado do Rio Grande do Sul, disponibilizada pelo INMET. A média da temperatura nos meses típicos de safra (outubro a abril) é de 20,96°C (INMET, 2019). Definiu-se 21°C como ponto central da escala de *Temperatura do ar*. A Tabela 3.6 apresenta a parametrização dos subconjuntos de pertinência *fuzzy* desta variável.

Tabela 3.6 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Temperatura do ar*

Subconjunto	Função	Parâmetros (°C)			
		a	m	n	b
Baixa	Trapezoidal	0	0	8	20
Média	Trapezoidal	8	20	24	32
Alta	Trapezoidal	24	32	40	40

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Temperaturas entre 20 e 24°C são consideradas no subconjunto Média, enquanto valores abaixo de 8°C e acima de 32°C são consideradas, respectivamente, nos subconjuntos Baixa e Alta. Os valores intermediários entre dois subconjuntos, ou seja, entre 8 e 20°C e entre 24 e 32°C possuem pertinências parciais para estes subconjuntos.

3.2.2.7 Resposta da Demanda (RD)

Foram definidos, de acordo com os propósitos desta tese, cinco possibilidades de comando do gerenciamento da concessionária pelo lado da demanda. Os comandos e suas funções no controlador de irrigação são os seguintes:

- Desligar: realiza o desligamento do controlador da lavoura e a interrupção da irrigação mecânica da lavoura;
- Atenuar 1: realiza a redução da velocidade de referência do conjunto motor-bomba em cerca de 20%, de forma a reduzir sua demanda;
- Atenuar 2: realiza a redução da velocidade de referência do conjunto motor-bomba em cerca de 40%, de forma a reduzir a demanda de forma intensificada;
- Manter: não interfere no funcionamento do controlador de irrigação.
- Ligar: eleva a referência de velocidade da saída do controlador para a velocidade máxima do conjunto motor-bomba.

A Tabela 3.7 apresenta a parametrização dos subconjuntos desta variável.

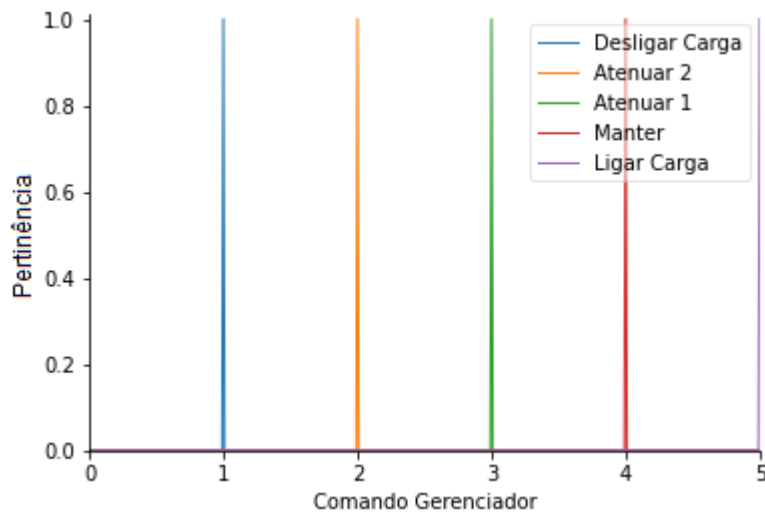
Tabela 3.7 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável RD

Subconjunto	Função	a	m	b
Desligar	Triangular	1	1	1
Atenuar 2	Triangular	2	2	2
Atenuar 1	Triangular	3	3	3
Manter	Triangular	4	4	4
Ligar	Triangular	5	5	5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Cada subconjunto representa um comando possível do GRD para o controlador de irrigação. A Figura 3.6 auxilia no entendimento através de uma representação gráfica desta variável.

Figura 3.6 – Modelagem da variável *RD*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A modelagem desta variável, que cumpre a integração dos comandos de resposta da demanda com o controlador de irrigação, foi realizada como um seletor como pode ser visto na Figura 3.6. Os valores inteiros no intervalo [1,5] representam distintamente os comandos recebidos para: 1 – desligar totalmente a carga, 2 – atenuar a carga no patamar 2, reduzindo a velocidade de forma intensificada, 3 – atenuar a carga no patamar 1, reduzindo a velocidade de forma menos intensão, 4 – manter a carga, conforme controle *fuzzy* feita com as demais variáveis, e 5 – ligar a carga, com velocidade nominal.

O comando de ligar a carga tem o intuito de disponibilizar esta opção ao operador do programa de resposta da demanda em uma implementação futura, possibilitando uma reposição antecipada de nível nas lavouras em situações de necessidade de desligamento do alimentador, como por exemplo, em uma manutenção programada.

3.2.3.8 Tarifa horária

A grande maioria dos consumidores rurais irrigantes é enquadrada no subgrupo A4 (tensão entre 2,3 e 25 kV), grupo tarifário horossazonal verde. Uma das explicações, além da potência instalada desses consumidores, é o benefício tarifário de redução nas tarifas aplicáveis ao consumo destinado às atividades de irrigação, que garante um desconto mínimo de 70% sobre a tarifa fora de ponta (ANEEL, 2010). Nas concessionárias de distribuição que atendem ao Rio Grande do Sul, o benefício tarifário compreende a faixa de horários entre 21:30 e 06:00, totalizando 8,5 horas diárias.

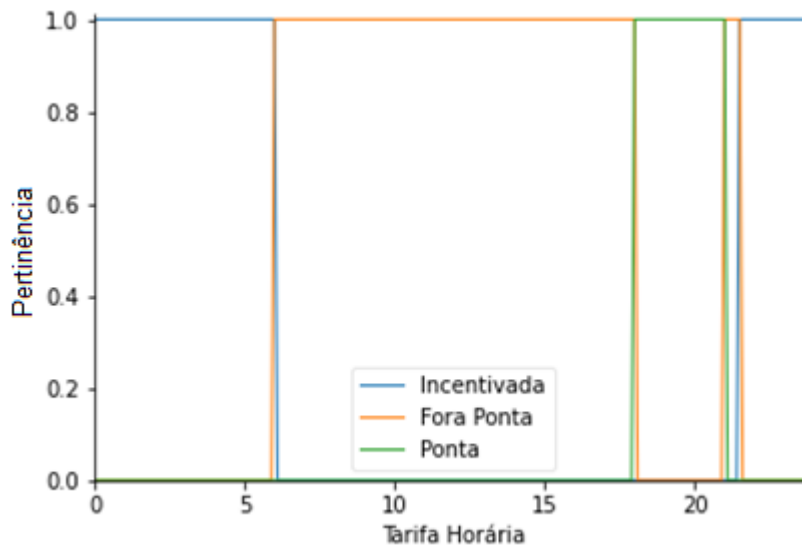
Como custo e horário do dia estão associados, a variável de entrada *Tarifa Horária* foi modelada em relação ao tempo. A Tabela 3.8 apresenta os parâmetros da modelagem realizada para esta variável.

Tabela 3.8 – Funções e parâmetros da variável *Tarifa horária*

Subconjunto	Função	Parâmetros (h)			
		a	m	n	b
Incentivada I	Trapezoidal	0	0	6	6
Fora da Ponta I	Trapezoidal	6	6	18	18
Ponta	Trapezoidal	18	18	21	21
Fora da Ponta II	Trapezoidal	21	21	21,5	21,5
Incentivada II	Trapezoidal	21,5	21,5	24	24

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os subconjuntos “Incentivada I” e “Incentivada II”, assim como os conjuntos “Fora Ponta I” e “Fora Ponta II” foram agregados através do algoritmo em conjuntos únicos denominados “Incentivada” e “Fora Ponta”, respectivamente, como observa-se na modelagem gráfica da variável apresentada na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Funções de pertinência da variável *Tarifa horária*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A variável denominada *Tarifa Horária*, na verdade, recebe como entrada apenas o horário atual. A *fuzzyficação* da variável encarrega-se de prover ao bloco de inferência a relação entre o horário com o seu custo da tarifa de energia. A informação relevante, e que chega na etapa de inferência, é a condição da tarifa: do horário de ponta, do horário fora de ponta, ou do horário incentivado.

Com todas as variáveis de entrada *fuzzyficadas*, a etapa seguinte do controlador é a etapa de inferência, onde são realizadas as relações entre as variáveis através de regras.

3.2.3 Inferência *fuzzy*

A etapa de inferência *fuzzy*, de forma geral, realiza a relação entre cada variável dentro de uma regra, bem como a agregação das diferentes regras. 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*). Para este controlador, adotou-se 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).

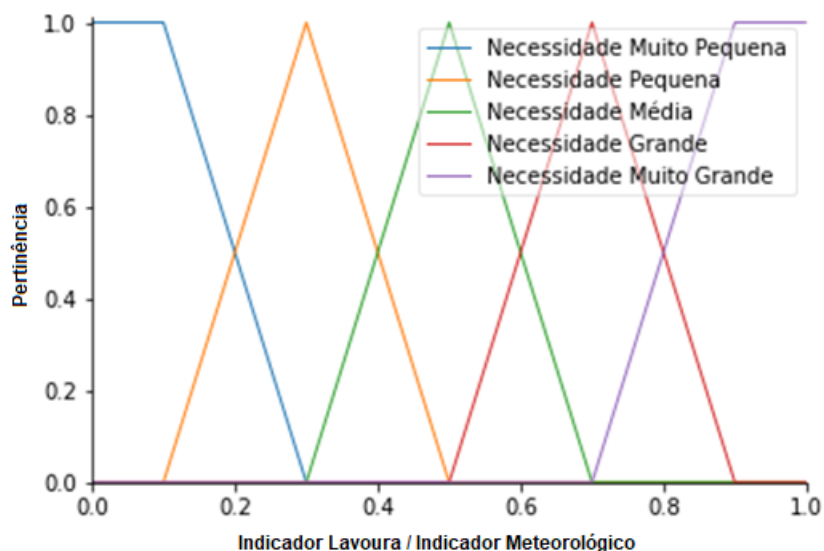
Como auxílio à elaboração das regras, foram realizadas, durante o ano de 2016, entrevistas com três especialistas das áreas pertinentes à irrigação em lavouras, como já citado no tópico 3.2.2. De forma a preservar as relações entre as variáveis e facilitar a criação das regras, as variáveis de mesma natureza foram divididas em inferências *fuzzy* distintas. Desta forma, foram agrupadas as variáveis de natureza meteorológicas em uma mesma inferência *fuzzy* denominada “*MetControl*”. Semelhantemente, as variáveis características do cenário da lavoura constituem a inferência denominada “*LavControl*”. As saídas destes controladores são representadas em variáveis de *defuzzyficação*, que foram replicadas como entradas da etapa de inferência final, chamada “*IrrigControl*”, que conta ainda com as entradas “Resposta da Demanda” e “Tarifa Horária”, como apresentado na Figura 3.3, e de onde se origina o sinal de referência de velocidade para o inversor de frequência do conjunto motor-bomba de irrigação.

3.2.3.1 Inferência Lavoura (*LavControl*)

As variáveis relativas às características da lavoura de arroz irrigado são avaliadas no controlador denominado *LavControl*. Esta etapa de inferência possui três variáveis de entrada que influenciam na quantidade de água a ser bombeada pelo sistema de irrigação, conforme pode ser visualizado na Figura 3.3. 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.

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 Lavoura*.

A variável de saída é um indicador com escala entre 0 e 1, como é observado na Figura 3.8. Cinco conjuntos *fuzzy* preenchem totalmente a escala: *Necessidade Muito Pequena*, *Necessidade Pequena*, *Necessidade Média*, *Necessidade Grande* e *Necessidade Muito Grande*.

Figura 3.8 – Variáveis de saída *Indicador Lavoura* e *Indicador Meteorológico*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os parâmetros de cada função de pertinência da variável são apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Funções e parâmetros dos subconjuntos da variável *Indicador Lavoura*

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

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A variável *Indicador Lavoura* expressa a necessidade de irrigação de acordo com as principais características da lavoura. Valores mais próximos de 1,0 denotam uma maior necessidade de reposição artificial de água na lavoura, enquanto valores mais próximos de zero indicam uma menor necessidade.

3.2.3.2 Inferência Previsão Meteorológica (MetControl)

As variáveis climáticas que influenciam em uma necessidade maior ou menor de reposição de água na lavoura são interpretadas pelo controlador denominado *Previsão Meteorológica*. As três variáveis consideradas, por serem de fácil aquisição, são *Temperatura média do ar*, *Precipitação* e *Velocidade média do vento*. A estrutura deste controlador é verificada na Figura 3.3.

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 Meteorológico*. A variável de saída deste controlador, *Indicador Meteorológico* 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*, idêntica à parametrização da variável *Indicador Lavoura*, apresentada na Figura 3.8 e na Tabela 3.9. Esta variável expressa a necessidade de irrigação de acordo com as principais características da previsão do tempo. Valores mais próximos de 1,0 denotam uma maior necessidade de reposição artificial de água na lavoura de acordo com a condição meteorológica prevista para o dia seguinte, enquanto os valores mais próximos de zero indicam uma menor necessidade, tendo em vista a previsão de uma reposição natural para as próximas horas.

3.2.3.3 Inferência Irrigação (IrrigControl)

Esta etapa de inferência, em uma segunda camada, realiza as relações entre as variáveis de saída dos controladores anteriores, *Lavoura* e *Previsão Meteorológica*, bem como a variável *Comando Resposta da Demanda* e a variável *Tarifa Horária*. A Figura 3.3 apresenta a estrutura do a etapa de inferência de *Irrigação*, bem como sua relação com os outros blocos de inferência. O estabelecimento das relações entre estas gera na saída uma indicação da velocidade com que o sistema de irrigação deve operar.

A base de regras deste controlador prevê todas as possibilidades combinatórias viáveis das entradas. A variável *Velocidade* possui escala entre 0 e 100%, 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 *defuzzificação*, são apresentados na seção 3.2.4.

3.2.3.4 Princípios norteadores para a criação do conjunto de regras

A criação do conjunto de regras envolve a utilização de toda a base de conhecimento levantada ao longo da construção da revisão bibliográfica, bem como das opiniões dos especialistas entrevistados. É a etapa que irá definir as relações entre as diversas combinações possíveis das entradas com as conclusões possíveis (consequentes) na saída.

Foram utilizadas algumas premissas básicas para a definição das regras cadastradas nas etapas de inferência do controlador de irrigação. Trata-se de princípios norteadores, que foram elaborados previamente à criação do conjunto de regras, e que foram obedecidos ao longo de todo o processo, no intuito de se obter um comportamento da saída coerente e de acordo com a base de conhecimento construída nesta tese. Ao todo, foram definidos nove princípios norteadores, apresentados a seguir.

1. A saída do controlador de irrigação (velocidade do equipamento de irrigação) deve ser maior quanto maiores forem as variáveis área irrigada e permeabilidade do solo, de forma a compensar via irrigação complementar a maior necessidade hídrica;
2. A saída do controlador de irrigação deve ser menor quanto maior for o nível de água da lavoura;
3. A velocidade do equipamento de irrigação deve ser maior, quanto maiores forem, na previsão meteorológica, a temperatura média do ar e a velocidade média do vento, características que elevam evapotranspiração da lavoura e acarretam uma necessidade de compensação maior via irrigação complementar;
4. A saída do controlador de irrigação deve ser menor quanto maior for a previsão de precipitação. O equipamento de irrigação deve desligar, em caso de previsão de alta precipitação e nível alto de água na lavoura;
5. A saída do controlador de irrigação deve ser reduzida durante o horário de ponta, a título de redução da demanda no horário de energia mais

cara. O equipamento de irrigação deve desligar neste intervalo horário em todos os casos, a não ser quando o nível de água da lavoura esteja no subconjunto “Negativo” e os indicadores Lavoura e Meteorológico estejam no subconjunto “Necessidade Grande” ou superior;

6. A irrigação deve ser intensificada nos intervalos horários de tarifa incentivada, garantindo uma maior irrigação da lavoura em momentos de menor carregamento do sistema elétrico e de energia mais barata;
7. Os comandos do gerenciador de resposta da demanda de ligar e desligar devem se sobrepor à lógica do controlador de irrigação;
8. A regra que envolva o comando “Atenuar 1” do gerenciador de resposta da demanda deve ter como consequente o próximo subconjunto de menor valor em relação à regra correspondente que envolva o comando “Manter” (por exemplo, em uma regra com o comando de “Manter” que possua como consequente a “Rotação Alta”, na regra equivalente em que se altere apenas a variável comando RD para “Atenuar 1” a consequente deve ser reduzida para “Rotação Média”);
9. A regra que envolva o comando “Atenuar 2” do gerenciador de resposta da demanda deve ter como consequente o próximo subconjunto de menor valor em relação à regra correspondente que envolva o comando “Atenuar 1” (por exemplo, em uma regra com o comando de “Atenuar 1” que possua como consequente a “Rotação Média”, na regra equivalente em que se altere apenas a variável comando RD para “Atenuar 2” a consequente deve ser reduzida para “Rotação Baixa”).

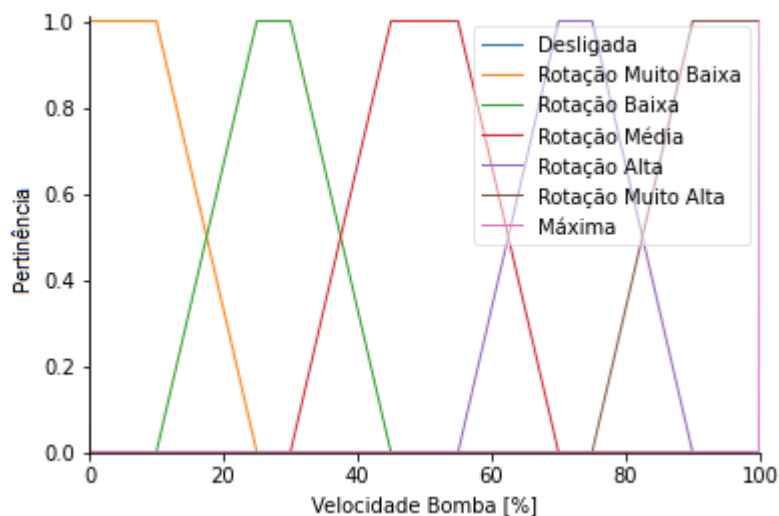
Os princípios norteadores apresentados são considerados regras básicas de funcionamento do controlador de irrigação. A observação a estes princípios esteve presente na criação de cada uma das regras cadastradas nas etapas de inferência do controlador de irrigação, de forma a se ter uma saída condizente com esta necessidade básica de funcionamento. Com a definição de etapa de inferência do controlador *fuzzy*, o próximo passo é a realização da interpretação dos resultados das regras e cálculo do valor de saída, etapa conhecida como *defuzzyficação*.

3.2.4 Defuzzyficação e interpretação dos resultados

A última etapa da implementação da lógica *fuzzy* é a *defuzzyficação* da variável proveniente da saída da inferência *Irrigação*. 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. A *defuzzyficação* é realizada sobre a variável de saída *Velocidade Bomba*, que é ilustrada na Figura 3.9. Esta variável possui sete funções de pertinência: *Desligada*, *Rotação Muito Baixa*, *Rotação Baixa*, *Rotação Média*, *Rotação Alta*, *Rotação Muito Alta* e *Máxima*.

Figura 3.9 – Variável de saída *Velocidade Bomba*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

As funções dos sete subconjuntos que descrevem esta variável foram parametrizadas conforme apresentado na Tabela 3.10.

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

Subconjunto	Função	Parâmetros			
		a	m	n	b
Desligada	Trapezoidal	0	0	0	0
Rotação M. Baixa	Trapezoidal	0	0	10	25
Rotação Baixa	Trapezoidal	10	25	30	45
Rotação Média	Trapezoidal	30	45	55	70
Rotação Alta	Trapezoidal	55	70	75	90
Rotação M. Alta	Trapezoidal	75	90	100	100
Máxima	Trapezoidal	100	100	100	100

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A variável de saída do modelo *fuzzy* é um sinal proporcional à velocidade com que deve girar o conjunto motor-bomba de irrigação, devendo ser utilizada para o controle do inversor de frequência que aciona o motor. Um comando do gerenciador de resposta da demanda no sentido de redução da velocidade do motor, por exemplo, pode-se provocar uma redução na potência demandada pelo sistema de irrigação.

3.3 MODELAGEM DO GERENCIADOR DE RESPOSTA DA DEMANDA

O gerenciador de resposta da demanda (GRD) é um sistema com capacidade de interagir com os controladores de irrigação, atuando sobre esses de forma autônoma, em condições especificadas.

A resposta da demanda planejada para este sistema é baseada em incentivos com controle direto de carga. Logo, um acordo prévio deve ocorrer entre a empresa distribuidora de energia e os clientes consumidores irrigantes.

O GRD possui como requisito de funcionamento as leituras realizadas por equipamentos distribuídos ao longo da rede, bem como recebimento de informações dos medidores inteligentes (*smart meters*) e dos controladores de irrigação. Em uma etapa posterior a esta tese, com a aplicação real desta metodologia, deverá ser prevista uma comunicação apropriada entre os dispositivos de campo e o GRD, levando em consideração as características das regiões rurais.

Este monitoramento permite ao gerenciador de resposta da demanda a visão sistemática das condições da rede rural e, em caso de transgressões de limites operativos, a atuação sobre aqueles controladores de irrigação que tragam o melhor resultado para a resolução do problema constatado. As informações necessárias ao gerenciamento e que deverão ser lidas dos equipamentos situados na rede de distribuição são:

- Correntes dos alimentadores rurais (A), na saída da subestação;
- Tensões ao longo da rede rural (kV);
- Potência do transformador da subestação (kVA).

Também são necessárias algumas informações sobre as lavouras, colhidas a partir da comunicação com os controladores de irrigação e com os medidores inteligentes:

- Estados do controlador de irrigação (velocidade de referência dos equipamentos de irrigação);
- Delta nível (cm);
- Demanda atual (kVA).

A partir da leitura destas informações, o gerenciador avalia a condição operativa do alimentador rural e, em caso de transgressões dos limites operativos, define as ações necessárias para reestabelecer a condição de operação segura e indicada pelo PRODIST (ANEEL, 2017b).

A atuação do gerenciador de resposta da demanda será o envio de comandos para os controladores de irrigação das unidades consumidoras participantes do programa de resposta da demanda. Os possíveis comandos do GRD são:

- Ligar Carga: eleva a referência de velocidade dos equipamentos de irrigação para o máximo (100% da velocidade nominal), independentemente da condição das demais variáveis lidas pelo controlador de irrigação;
- Manter: mantém a velocidade dos equipamentos de irrigação de acordo com o controle *fuzzy* do controlador de irrigação;
- Atenuar 1: reduz a velocidade dos equipamentos de irrigação em cerca de 20% sobre a velocidade já definida pelo controlador de irrigação;
- Atenuar 2: reduz a velocidade dos equipamentos de irrigação em cerca de 40% sobre a velocidade já definida pelo controlador de irrigação;

- Desligar Carga: desliga os equipamentos de irrigação, a despeito da decisão do controlador de irrigação.

Os comandos realizam variações na velocidade dos equipamentos de irrigação, a partir de um inversor de frequência. As Equações 2.1 e 2.2 demonstram o comportamento da variação da potência mecânica e da vazão de uma bomba centrífuga em função de uma variação de velocidade de rotação, e que justificam o ganho de eficiência energética da utilização de inversor de frequência para variar a velocidade destes equipamentos.

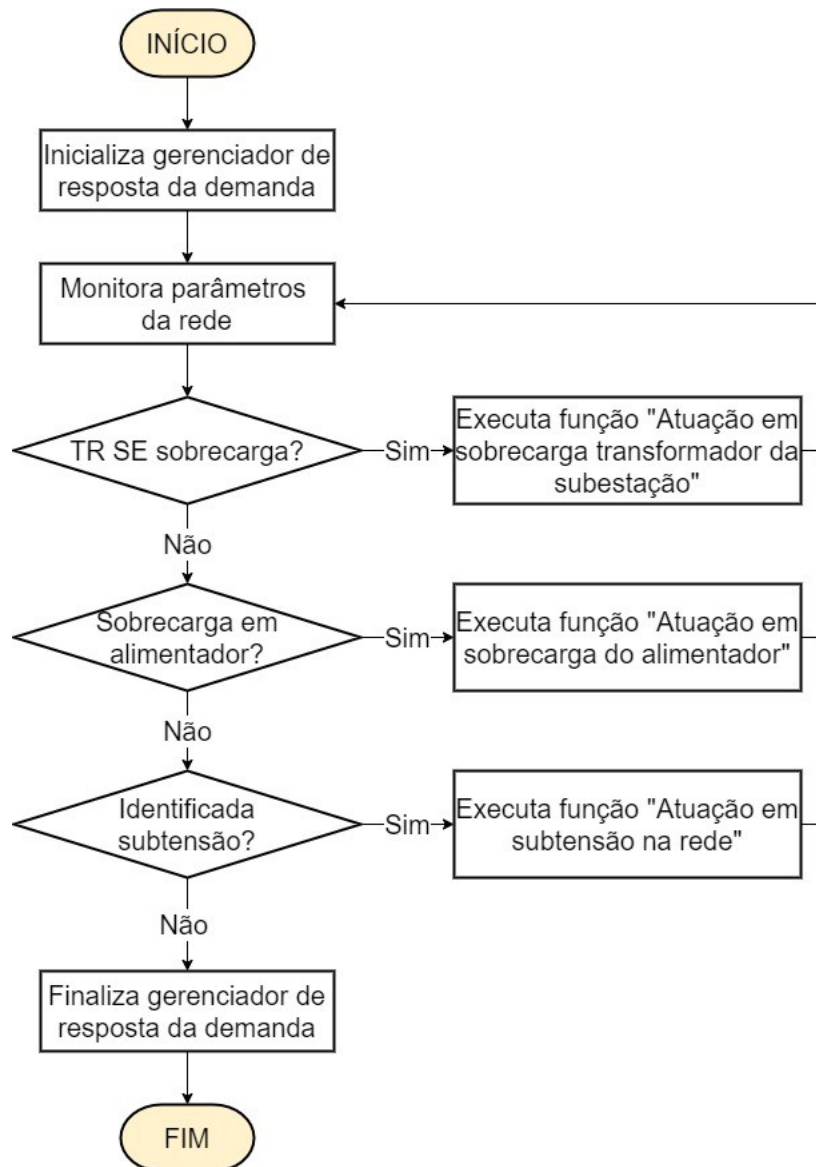
Nesta tese, para contabilizar as perdas elétricas do inversor de frequência, é utilizado um fator de acréscimo de consumo de 0,10 sobre o valor de potência reduzida da bomba, calculado de acordo com a Equação 2.1. A Equação 3.1 descreve o método utilizado nesta metodologia para calcular a potência consumida pelo sistema de levante após uma atuação do GRD.

$$P_2 = (1 + 0,1) \cdot \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \cdot P_1 \quad (3.1)$$

O acréscimo de 10% inserido na Equação 3.1 é uma forma de representar as perdas introduzidas nos equipamentos do conjunto de irrigação pela variação da velocidade e estimar uma variação de potência elétrica de entrada mais realista nas simulações.

A Figura 3.10 apresenta, a partir de um fluxograma, a idealização da tomada de ações realizada pelo gerenciador de resposta da demanda, baseada em condições de transgressões comumente identificadas em redes elétricas rurais.

Figura 3.10 – Atuações do gerenciador de resposta da demanda



Legenda: TR SE – Transformador da subestação.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O fluxograma apresentado na Figura 3.10 foi adotado como base para o desenvolvimento do algoritmo do gerenciador de resposta da demanda. Ele evidencia a prioridade de execução das ações do GRD, caso mais de uma transgressão ocorra simultaneamente. Ou seja, as transgressões serão tratadas na ordem: sobrecarga do transformador da subestação, sobrecarga no alimentador e subtensão (transgressão do limite inferior de tensão adequada em pontos ao longo da rede). A definição desta ordem de atuação do GRD é justificada pela estratégia

de se atuar primeiro nos equipamentos mais importantes no contexto geral da rede de distribuição. Em outras palavras, priorizar a operação dentro dos limites seguros daquele equipamento que mais impactaria nos indicadores de continuidade da região, caso o equipamento entrasse em falha ou sofresse uma avaria.

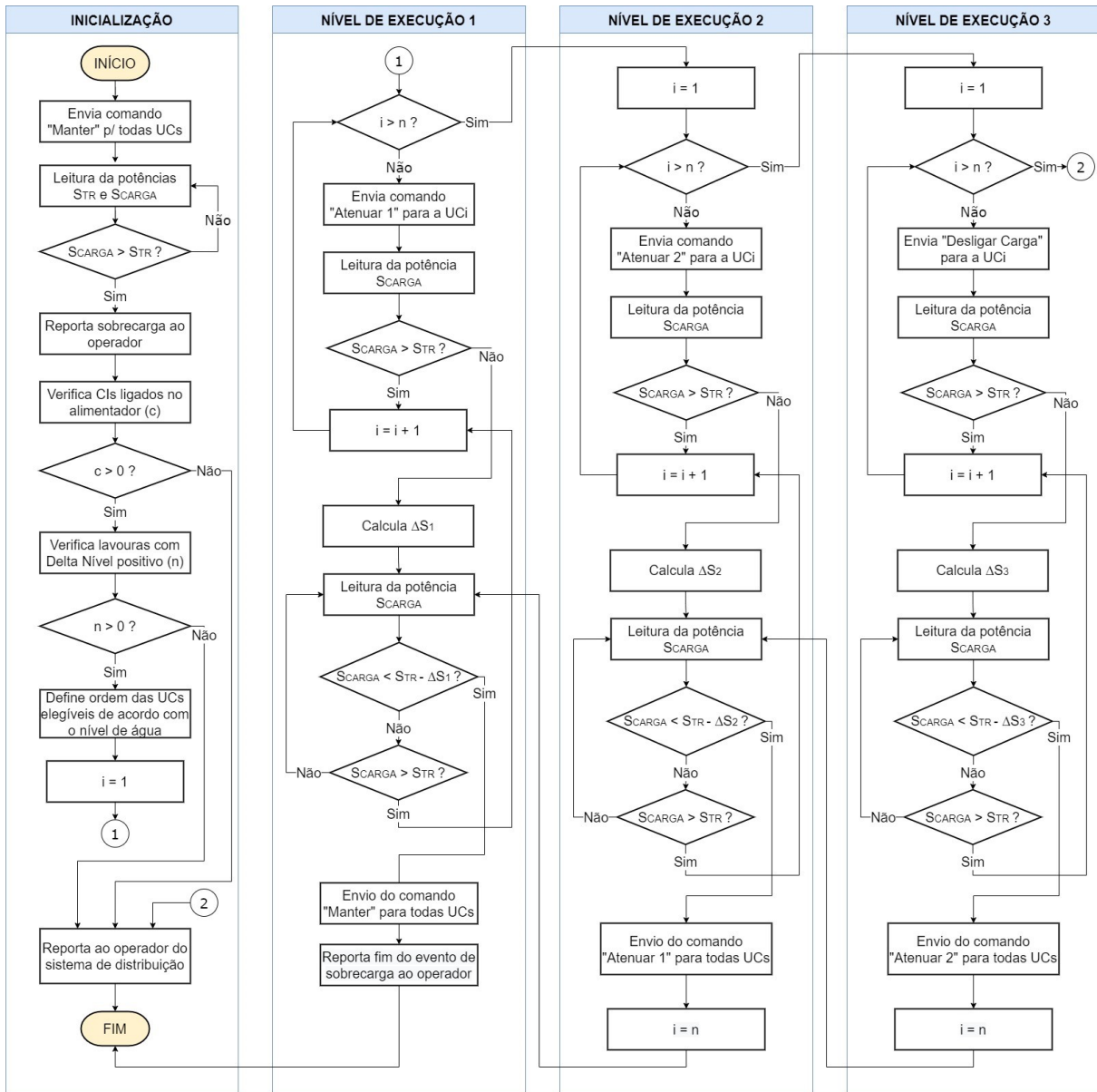
Na sequência deste tópico são apresentadas com mais detalhes as tomadas de decisão do GRD em cada função de atuação proposta, apresentadas no fluxograma, que ocorrem a partir da identificação das transgressões dos limites operativos das redes elétricas rurais.

3.3.1 Atuação em caso de sobrecarga do transformador da subestação

O transformador de subestação é o equipamento mais importante e mais caro do sistema de distribuição. Sua vida útil e sua confiabilidade de atendimento dependem da operação do equipamento dentro das condições nominais fornecidas pelo fabricante (VASCONCELLOS, ZANETTA Jr., 2006). Deste modo, evitar que este equipamento opere acima de sua capacidade de potência nominal (sobrecarga) é de suma importância para o operador do sistema de distribuição. Apesar disso, observa-se com certa frequência, situações de sobrecarga dos transformadores de subestações em regiões rurais.

Como forma de reduzir este tipo de ocorrência, o gerenciador de resposta da demanda foi implementado de forma a identificar a transgressão da potência nominal do transformador e atuar sobre as unidades consumidoras participantes do programa de resposta da demanda. A Figura 3.11 apresenta de forma visual como ocorre essa tomada de decisão.

Figura 3.11 – Atuação em caso de sobrecarga do transformador da subestação



Legenda: CIs – Controladores de Irrigação; UCs – Unidades Consumidoras.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A heurística proposta identifica a sobrecarga do transformador da subestação, a partir da comparação da especificação de potência aparente nominal do transformador (S_{TR}) com o valor de potência aparente instantâneo da carga (S_{CARGA}). Caso a potência da carga seja superior ao valor nominal do transformador ($S_{CARGA} > S_{TR}$), o gerenciador inicia a seguinte sequência de operações:

1. Seleção das unidades consumidoras participantes do programa de resposta da demanda que estejam com seu controlador de irrigação (CI) com o estado ligado (potência aparente diferente de zero);
2. Verificação do nível de água das lavouras das unidades que estão com seu respectivo controlador de irrigação ligado e seleção daquelas que tiverem o “Delta Nível” positivo;
3. Definição do número de unidades consumidoras elegíveis (n) no momento;
4. Definição da ordem de prioridade das unidades consumidoras elegíveis para atuação, de acordo com a variável “Delta Nível”;
5. Atuação nos controladores de irrigação de acordo com o nível de execução até que a transgressão seja sanada.

O Quadro 3.1 apresenta a sequência de execução codificada no algoritmo do gerenciador de resposta da demanda para corrigir a sobrecarga do transformador da subestação.

Quadro 3.1 – Níveis de execução de comandos do gerenciador

NÍVEL	EXECUÇÃO
0	Envio do comando “Manter” para todos os controladores de irrigação Corresponde ao nível “Inicialização” da Figura 3.11
1	Envio do comando “Atenuar 1” para os controladores das unidades consumidoras elegíveis
2	Envio do comando “Atenuar 2” para os controladores das unidades consumidoras elegíveis
3	Envio do comando “Desligar Carga” para os controladores das unidades consumidoras elegíveis

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Cada nível de execução é cumprido atuando-se nos controladores de irrigação, de forma individual, cumprindo a ordem de prioridade definida a partir da variável “Delta Nível” de cada lavoura elegível. Em outras palavras, atua-se primeiro no controlador de irrigação da lavoura com “Delta Nível” maior.

O gerenciador realiza uma nova leitura da potência aparente instantânea (S_{CARGA}) após cada envio de comandos individual, a fim de verificar a necessidade de atuar sobre o próximo controlador. De forma prática, deverá ser ajustado um atraso (*delay*) que garanta tempo suficiente para a estabilização das variáveis do sistema elétrico antes de uma nova atuação.

Um nível de execução subsequente só é ativado após todas as unidades consumidoras elegíveis terem sido atuadas pelo gerenciador no nível anterior, caso ainda persista ou ocorra uma nova sobrecarga.

Para retornar ao nível de execução anterior, o gerenciador realiza o cálculo do valor de potência aparente que foi reduzido dentro de cada nível de atuação, ΔS_2 e ΔS_3 , comparando o valor de S_{CARGA} antes e após sua atuação. Após a atuação do gerenciador, caso ocorra uma redução de S_{CARGA} de um montante maior que ΔS no nível de execução atual, o GRD identificará esta como condição cumprida para retornar ao nível de execução anterior. Quando isto ocorrer no nível de execução 1, marcará o fim do evento de sobrecarga, e o GRD retornará a enviar o comando de “Manter” para os controladores de irrigação que haviam sido atuados anteriormente. As condições que indicam que o carregamento do transformador diminuiu a ponto de retornar para o nível de atuação anterior são apresentados nas Equações 3.2, 3.3 e 3.4.

$$S_{CARGA} < S_{TR} - \Delta S_1 \quad (3.2)$$

$$S_{CARGA} < S_{TR} - \Delta S_2 \quad (3.3)$$

$$S_{CARGA} < S_{TR} - \Delta S_3 \quad (3.4)$$

Na condição de o gerenciador estar no nível de execução 1, independentemente da quantidade de controladores atuados, e a potência medida no secundário do transformador da subestação (S_{CARGA}) for inferior à diferença entre a potência nominal do transformador e a potência reduzida no nível 1, conforme a Equação 3.2, o algoritmo indicará o fim da sobrecarga e retornará o controle da irrigação aos controladores locais através do envio do comando “Manter” a todos os controladores atuados. Ou seja, o fim do evento de sobrecarga, para o gerenciador,

só ocorrerá a partir do momento em que o carregamento do transformador reduzir, através de outras cargas, o montante de potência reduzida pelo gerenciador.

Caso todas as unidades consumidoras elegíveis estiverem atuadas com o comando “Atenuar 1” e a carga do transformador (S_{CARGA}) continuar acima ou subir acima de sua potência nominal (S_{TR}), o gerenciador iniciará o nível de execução 2, enviando o comando de “Atenuar 2” para os controladores de irrigação pela ordem de prioridade anteriormente definida, até que a sobrecarga seja sanada.

O nível de execução 2 permanecerá ativado até que uma das duas condições aconteça: uma redução da carga do transformador que satisfaça a Equação 3.3, ou uma sobrecarga do transformador que não foi possível sanar neste nível. Uma redução do carregamento do transformador de um montante igual à ΔS_2 indica ao gerenciador que é possível retornar ao nível de atuação anterior. Já, caso todos os controladores de irrigação estejam atuados, e a sobrecarga permanecer ou retornar, a sequência do algoritmo indica o início do nível de execução 3, onde as cargas serão desligadas pela ordem de prioridade já definida.

O nível de execução 3 é o último recurso do GRD para contornar uma situação de sobrecarga do transformador da subestação. Neste nível, o comando de “Desligar Carga” é enviado para os controladores de irrigação locais, seguindo a ordem de prioridade de acordo com o nível de água da lavoura. Na hipótese de todos os controladores elegíveis serem desligados e a sobrecarga do transformador persistir, um aviso é enviado para o operador do sistema de distribuição relatando a ocorrência. Neste caso, apesar da sobrecarga permanecer, ela ao menos foi atenuada pelo gerenciador de resposta da demanda.

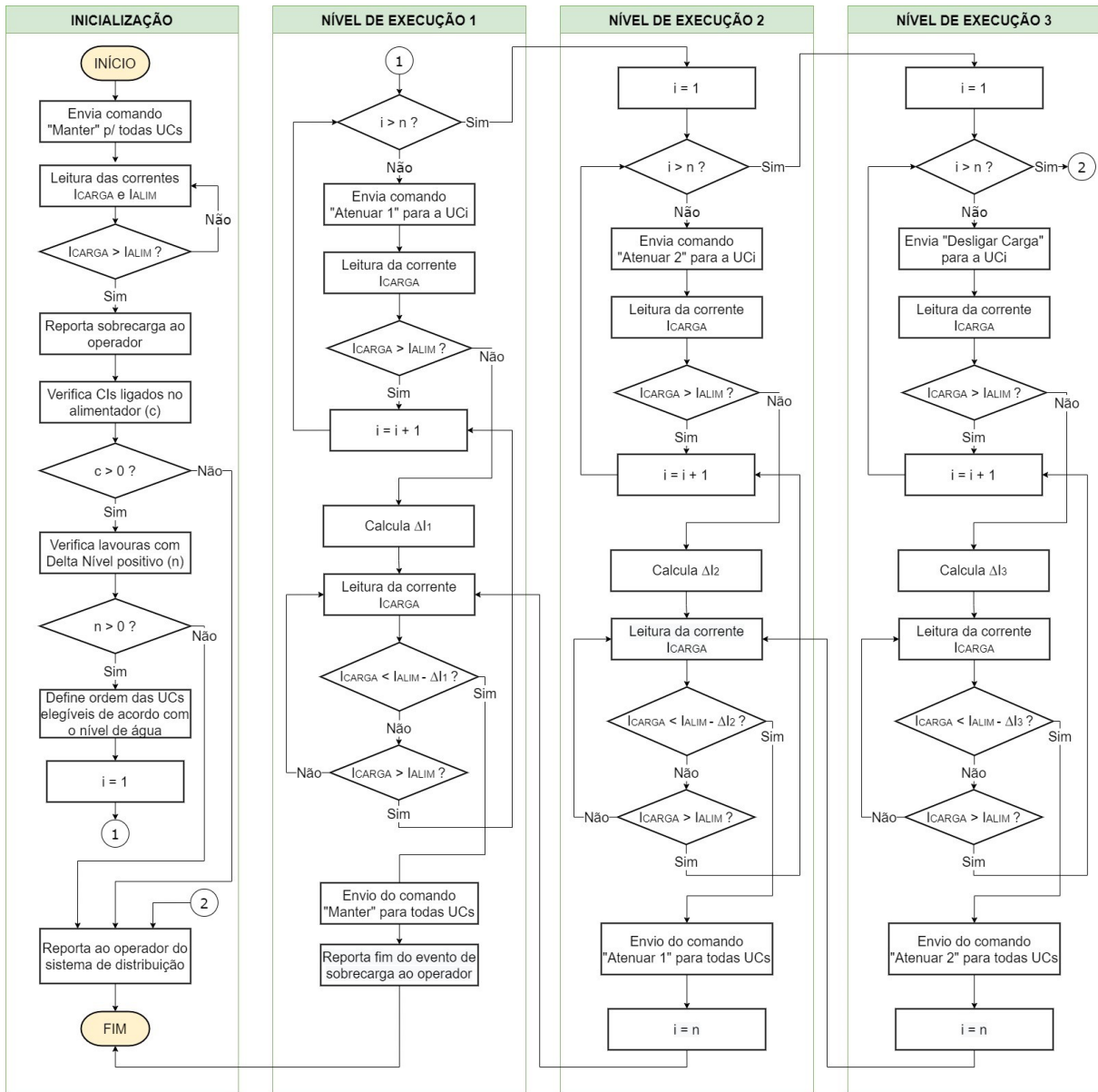
O nível de execução 3 permanecerá ativado até que a condição da Equação 3.4 seja satisfeita, ou seja, caso ocorra uma redução do carregamento do transformador em um montante igual à ΔS_3 . Nesta situação, o retorno ao nível de execução 2 é possível sem gerar uma nova sobrecarga ao transformador da subestação.

3.3.2 Atuação em caso de sobrecarga no alimentador

A sobrecarga em um circuito alimentador é identificada através da medição da corrente na saída da subestação (I_{CARGA}) e de sua comparação com a corrente máxima deste alimentador (I_{ALIM}). Ambas as correntes são coletadas do primeiro

trecho da linha troncal do alimentador. A partir da identificação da sobrecarga do alimentador, quando $I_{CARGA} > I_{ALIM}$, o gerenciador de resposta da demanda (GRD) realiza atuações nos controladores de irrigação (CIs) das unidades consumidoras (UCs) participantes do programa de resposta da demanda presentes no respectivo alimentador. A Figura 3.12 descreve a heurística para atuação do gerenciador no sentido de sanar a ocorrência de uma sobrecarga no alimentador.

Figura 3.12 – Atuação em caso de sobrecarga em alimentador de distribuição rural



Como pode ser observado na Figura 3.12, o algoritmo para a identificação e atenuação de sobrecargas nos alimentadores rurais possui lógica muito semelhante ao algoritmo para sanar sobrecarga no transformador da subestação. O mesmo conceito de execução em níveis, como descrito no Quadro 3.1, é adotado. Desta forma, há uma progressão de ações do gerenciador até que a sobrecarga do alimentador seja solucionada.

Inicialmente, após constatada a sobrecarga do alimentador, todos os controladores de irrigação elegíveis no alimentador são identificados e organizados em ordem de prioridade de acordo com o nível de água da lavoura, através da leitura da variável “Delta Nível”, do maior para o menor. Na sequência, o gerenciador ativa o nível de execução 1, enviando comando de “Atenuar 1” para os controladores de irrigação elegíveis existentes no alimentador, de acordo com a ordem de prioridade. Os níveis de execução 2 e 3 são ativados caso o nível de execução anterior não tenha sido capaz de contornar a transgressão.

Da mesma forma, caso o gerenciador esteja em qualquer dos níveis de atuação e o carregamento do alimentador reduza, devido a alterações de outras cargas, é possível retornar ao nível de execução anterior, a partir do momento em que sejam satisfeitas as condições das Equações 3.5, 3.6 e 3.7. As variáveis auxiliares ΔI_1 , ΔI_2 e ΔI_3 armazenam o valor de corrente reduzida pelo gerenciador em cada nível de execução.

$$I_{CARGA} < I_{ALIM} - \Delta I_1 \quad (3.5)$$

$$I_{CARGA} < I_{ALIM} - \Delta I_2 \quad (3.6)$$

$$I_{CARGA} < I_{ALIM} - \Delta I_3 \quad (3.7)$$

A execução dos níveis 2 e 3 são finalizadas a partir do momento em que as condições das Equações 3.6 e 3.7, respectivamente, são satisfeitas, retornando, em todos os casos, ao nível de execução anterior. O fim do evento de sobrecarga do alimentador ocorre quando a condição descrita na Equação 3.5 é satisfeita. Neste caso, o retorno da corrente cortada neste nível de execução não gera uma nova sobrecorrente no alimentador, de forma que o GRD envia o comando “Manter” aos

controladores de irrigação atuados, e um aviso de fim do evento ao operador do sistema de distribuição.

Na hipótese de que não haja unidades consumidoras elegíveis, o gerenciador de resposta da demanda não executa o algoritmo de atuação em caso de sobrecarga do alimentador e essa ocorrência é relatada ao operador do sistema de distribuição. De forma semelhante, caso todas as atuações disponíveis para o gerenciador sejam realizadas e a sobrecarga não seja corrigida, o fato também é relatado ao operador do sistema de distribuição. Contudo, neste cenário, apesar de não sanar totalmente a sobrecarga, o algoritmo reduz a magnitude da mesma.

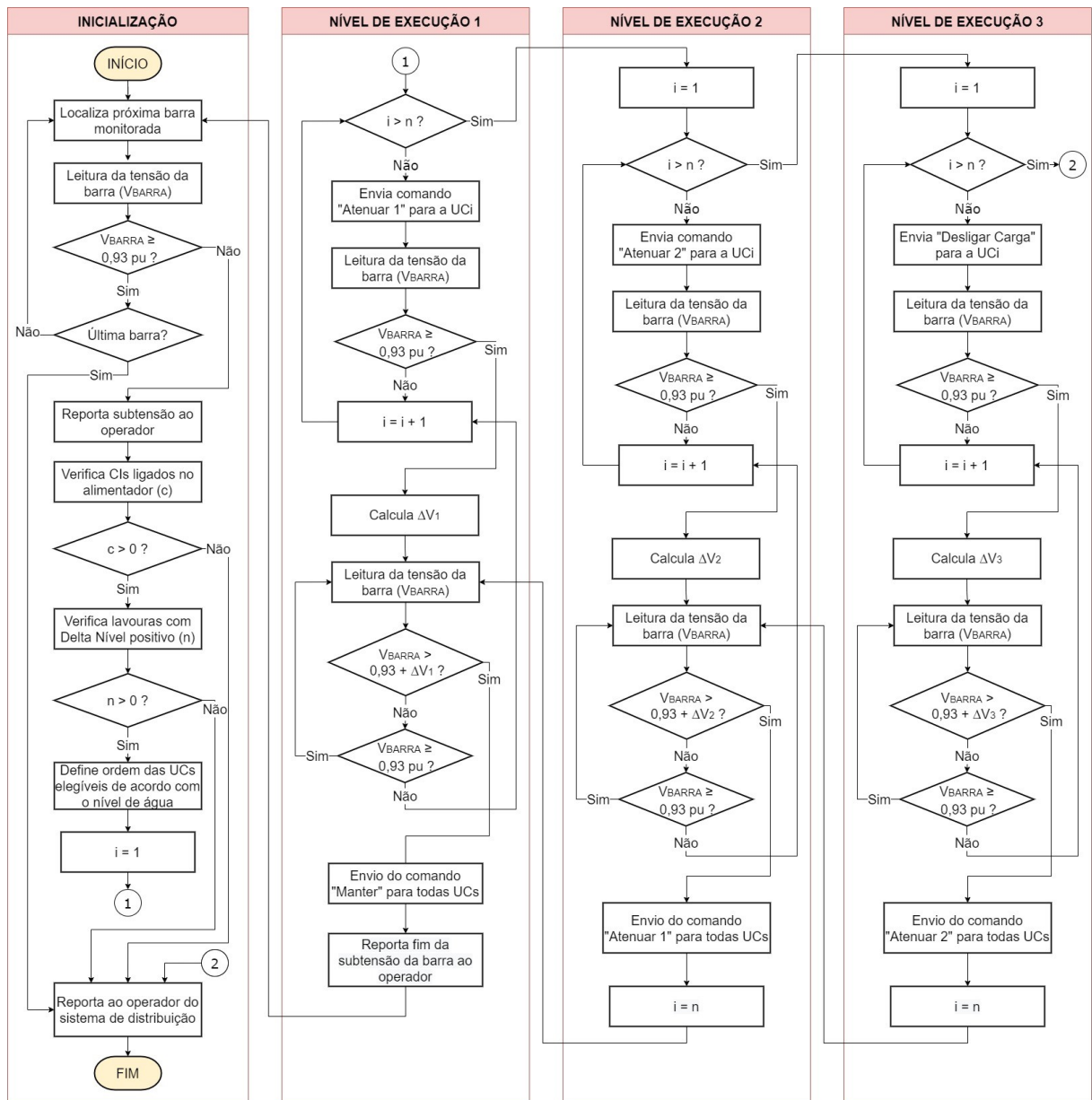
3.3.3 Atuação em caso de transgressão de tensão da rede de distribuição rural

As transgressões dos limites de tensão definidos pelo PRODIST ocasionam obrigação à concessionária de distribuição de pagamento de compensações aos clientes afetados, de acordo com os indicadores DRP e DRC. O limite inferior para a tensão adequada é de 0,93 p.u. para tensões nominais de fornecimento entre 2,3 e 69 kV (ANEEL, 2017b). Evitar estas transgressões é, portanto, uma forma de, não só melhorar a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores, como também de reduzir custos provenientes do não cumprimento dos padrões técnicos exigidos pelos órgãos reguladores à concessionária de distribuição.

A ocorrência de subtensões (transgressões do limite inferior de tensão adequada), em redes de distribuição, ocorrem, normalmente, devido à elevadas quedas de tensão nos condutores da rede, ocasionados pelo alto carregamento (corrente elétrica elevada) da rede. Normalmente, as subtensões ocorrem nos pontos mais distantes do alimentador (KUSKO, THOMPSON, 2007).

O gerenciador de resposta da demanda proposto possui atuação no sentido de reduzir o tempo das ocorrências de subtensão em qualquer uma das barras de média tensão monitoradas da rede elétrica rural, a partir da redução de carga das unidades consumidoras participantes do programa de resposta da demanda. A redução de carga provocada reduz a corrente nos condutores e, conseqüentemente, sua queda de tensão. A Figura 3.13 mostra representação do algoritmo implementado para o gerenciador de resposta da demanda responder às ocorrências de subtensão nas barras monitoradas.

Figura 3.13 – Atuação em caso de subtensão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O algoritmo realiza uma varredura nas barras existentes no alimentador, realizando a comparação da tensão de cada barra (V_{BARRA}), em p.u., com o limite de tensão adequada de referência (0,93 p.u.). A identificação de uma barra com subtensão desencadeia ações do gerenciador de resposta da demanda para corrigir a transgressão. De forma semelhante às ações do gerenciador para solução de sobrecargas, a redução da subtensão também foi dividida em níveis de execução, conforme o Quadro 3.1.

Inicialmente, a tentativa de tratar a subtensão é realizada através do comando “Atenuar 1” para todos os controladores de irrigação (CIs) elegíveis (controlador ligado e Delta Nível positivo) no alimentador da barra com subtensão, por ordem de prioridade, da lavoura de maior nível para a de menor. Caso este nível de execução não corrija a subtensão, o próximo nível é executado, enviando o comando “Atenuar 2” para os controladores de irrigação até que se verifique o fim da subtensão. O nível de execução seguinte é iniciado a partir do momento em que o anterior não realize o fim da subtensão. Neste caso, haverá o comando “Desliga Carga” do gerenciador para os controladores de irrigação até que a condição de subtensão seja corrigida. Na hipótese de todas as ações serem tomadas pelo gerenciador e a subtensão persistir, um alerta é enviado para o operador do sistema de distribuição, relatando o ocorrido. Alertas também são enviados ao operador ao no início e no final de cada evento de subtensão.

Ao haver uma elevação dos níveis de tensão, devido à redução do carregamento da rede, de forma geral, o GRD realiza o retorno ao nível de execução anterior, na medida em que as Equações 3.8, 3.9 e 3.10 sejam satisfeitas.

$$V_{BARRA} > 0,93 + \Delta V_1 \quad (3.8)$$

$$V_{BARRA} > 0,93 + \Delta V_2 \quad (3.9)$$

$$V_{BARRA} > 0,93 + \Delta V_3 \quad (3.10)$$

em que ΔV_1 , ΔV_2 e ΔV_3 são, respectivamente, os incrementos de tensão observados nos níveis de execução 1, 2 e 3.

A condição descrita na Equação 3.8, se satisfeita, indica o fim do evento de subtensão, onde o gerenciador retorna a enviar o comando “Manter” para os CIs atuados, e um aviso de fim do evento é enviado para o operador do sistema de distribuição.

3.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo, buscou-se apresentar as principais características e definições adotadas no desenvolvimento dos componentes da estrutura proposta de resposta

da demanda para redes elétricas rurais com concentração de consumidores irrigantes.

Inicialmente, apresentou-se o controlador de irrigação, desenvolvido através da lógica *fuzzy*. Foram apresentadas as fuzzyficações de todas as variáveis, bem como as etapas de inferência e de defuzzyficação. Um controlador de irrigação nos moldes apresentados nesta tese é algo inédito, de acordo com a revisão bibliográfica realizada. Os pontos em que se baseiam o ineditismo deste controlador são tanto as variáveis utilizadas no modelo, como as variáveis de previsão do tempo, por exemplo, quanto a própria fuzzyficação das variáveis e a construção das regras, que só foram possíveis graças à robusta revisão bibliográfica realizada e à consideração da opinião de especialistas da área.

O gerenciador de resposta da demanda, por sua vez, foi apresentado na sequência deste capítulo. O algoritmo do gerenciador foi desenvolvido em linguagem Python. Aqui, foram apresentadas as heurísticas bases para a construção do algoritmo, divididos de acordo com a atuação do gerenciador em cada tipo de atuação prevista: sobrecarga do transformador da subestação, sobrecarga do alimentador e transgressão do limite inferior de tensão ao longo da rede.

A estrutura proposta, baseada nestes dois componentes, controlador de irrigação e gerenciador de resposta da demanda, configura algo inédito e inovador. A comprovação da hipótese levantada nesta tese, de que este mecanismo de resposta da demanda pode contribuir para a melhoria da qualidade da energia em redes rurais com concentração de consumidores irrigantes, será abordada no próximo capítulo. O teste da hipótese será realizado a partir de simulações no software OpenDSS, onde será trabalhado com modelos de redes de distribuição rurais reais de regiões com concentração de produção de arroz irrigado.

4 VALIDAÇÃO DA TESE E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os testes e simulações realizados para validar a tese proposta, de que uma estrutura de resposta da demanda pode contribuir para a qualidade de energia e para o fornecimento dentro dos limites seguros de operação dos equipamentos das redes rurais de distribuição de energia elétrica com concentração de produtores irrigantes.

O capítulo apresenta, inicialmente, testes de funcionamento e testes de sensibilidade realizados com o controlador de irrigação, bem como uma análise do impacto de sua inserção nas redes de teste. Na sequência, é apresentada a aplicação e a verificação de funcionamento da estrutura de resposta da demanda, e a análise da qualidade de energia nas redes rurais a partir de sua inserção. O capítulo apresenta, ainda, uma caracterização das redes elétricas rurais e das lavouras de arroz irrigado adotadas na realização dos testes.

4.1 DADOS DE LAVOURAS E DADOS METEOROLÓGICOS UTILIZADOS

Para a realização dos testes de funcionamento do controlador de irrigação, foram coletadas informações de três lavouras de arroz irrigado. Estas lavouras são geograficamente próximas e estão localizadas em uma região de grande produção de arroz do Estado do Rio Grande do Sul. A Tabela 4.1 apresenta as informações destas lavouras, que servirão de entradas para o controlador de irrigação.

Tabela 4.1 – Características das lavouras adotadas para os testes

	Lavoura A	Lavoura B	Lavoura C
Área Irrigada [ha]	50	90	300
Permeabilidade média do solo [mm dia⁻¹]	3	3	3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Como pode-se visualizar na Tabela 4.1, as lavouras possuem permeabilidade média do solo idênticas. Isto ocorre pois localizam-se em uma mesma região, onde os solos são majoritariamente de drenagem ruim, característica típica das regiões

destinadas ao plantio do arroz irrigado. Segundo Embrapa (2020), o solo da região tratada é composto, principalmente, por *planossolos*. Por outro lado, as características de área irrigada são inerentes a cada lavoura, e por isso distintas.

Para as variáveis meteorológicas, os dados considerados nos testes de funcionamento do controlador de irrigação, por sua vez, foram buscados no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022). Foram selecionados, da estação meteorológica mais próxima das lavouras, dados históricos de quatro dias distintos que ocorreram na safra de 2021/2022, conforme apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados meteorológicos adotados para os testes

	Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
Precipitação [mm dia⁻¹]	56,8	22,1	0	0
Velocidade média do vento [m s⁻¹]	1,55	1,25	1,78	1,49
Temperatura do ar [°C]	27,6	25,5	24,4	30,7

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para uma observação do comportamento do controlador em diversas situações de previsão do tempo, selecionou-se dados de um dia com ausência de precipitação e temperatura média do ar muito elevada, denominado “dia muito seco”, um dia sem precipitação e temperatura média do ar elevada, denominado “dia seco”, um dia com presença de precipitação, denominado “dia chuvoso” e um dia com alta precipitação, denominado de “dia muito chuvoso”. Para a variável precipitação foi coletada a precipitação acumulada em cada um dos dias, enquanto para as variáveis de velocidade média do vento e temperatura do ar foram realizadas as médias dos registros horários destas variáveis de acordo com os dados disponibilizados pelo INMET (2022).

Ressalta-se que o controlador de irrigação foi planejado para funcionar com os dados de previsão do tempo e não com dados históricos. A reposição de água na lavoura é intensificada ou reduzida de acordo com a evaporação ou reposição natural, respectivamente, que está para ocorrer no próximo dia. Para os dados de previsão, nos ensaios do controlador, optou-se por utilizar cenários meteorológicos

que já ocorreram, de forma a não ocorrer desvios das características de clima da região adotada para os testes.

4.2 FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO

O funcionamento do controlador de irrigação será evidenciado a partir da realização de testes de funcionamento, de sensibilidade e de aplicação em redes elétricas rurais através de simulação. O objetivo é demonstrar o funcionamento coerente do controlador, bem como seu impacto para as condições elétricas das redes elétricas, de forma independente do gerenciador de resposta da demanda.

4.2.1 Verificação de funcionamento

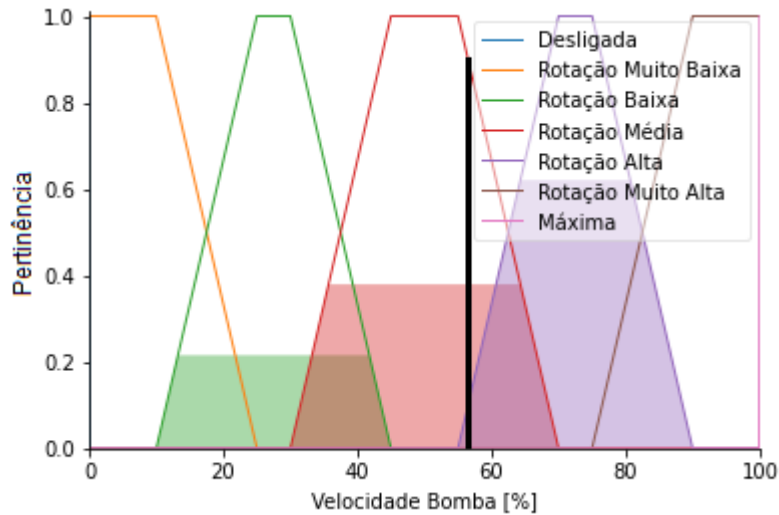
O controlador de irrigação proposto nesta tese é capaz de verificar a real necessidade de irrigação de uma lavoura de arroz irrigado, baseado em características da lavoura e na previsão do tempo. A validação inicial do controlador desenvolvido ocorre a partir de testes de coerência de funcionamento. Neste teste, o intuito é verificar se a resposta da saída acompanha a variação das entradas, de acordo com os princípios norteadores. Para incrementos das entradas que elevam a necessidade de irrigação, espera-se incrementos do sinal de saída de velocidade da bomba, por exemplo.

O teste de coerência de funcionamento do controlador foi realizado simulando-se todos os cenários provenientes do cruzamento dos dados de lavouras apresentados na Tabela 4.1 e os dados meteorológicos constantes na Tabela 4.2. A variável *Comando RD* foi mantida no valor “4 – Manter” em todos os testes. A variável *Tarifa Horária* foi variada entre as três opções possíveis, escolhendo-se um horário dentro da faixa fora de ponta, um horário dentro da faixa de ponta e um terceiro horário dentro da faixa de tarifa incentivada.

As simulações foram realizadas executando-se o algoritmo *fuzzy* do controlador de irrigação em um interpretador Python. Durante as simulações, é possível realizar o acompanhamento e a verificação do funcionamento de cada etapa de execução do código, através da visualização das variáveis envolvidas de forma gráfica. A Figura 4.1 Apresenta a visualização da variável de saída,

Velocidade Bomba, durante uma das simulações, enquanto as demais visualizações são apresentadas no Apêndice A.

Figura 4.1 – Exemplo de visualização da variável *Velocidade Bomba* nas simulações



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

No exemplo apresentado, foram utilizados nas entradas os valores da Lavoura A e do Dia Seco, bem como Delta Nível de 0 cm, tarifa horária fora de ponta e comando de resposta da demanda de “Manter”. As áreas hachuradas dos subconjuntos da variável de saída, apresentadas na Figura 4.1, correspondem às regras ativadas na etapa de inferência, a partir da composição máximo dos mínimos. A linha preta vertical representa o cálculo do centroide destas áreas, calculado na etapa de *defuzzyficação*. Nesta simulação, o valor de referência para o conjunto de irrigação, calculado pelo controlador, foi 56,47%.

As Figuras A.1 à A.8, apresentadas no Apêndice A, demonstram os valores atribuídos a cada uma das oito entradas do controlador de irrigação. É possível notar em cada uma delas, os subconjuntos e as pertinências que são ativadas ao recebimento de cada valor numérico, ou seja, a tradução do valor numérico em termos *fuzzy*, na etapa conhecida como *fuzzyficação*. As Figuras A.9 e A.10 demonstram o comportamento das variáveis intermediárias, Indicador Lavoura e Indicador Meteorológico, respectivamente. Nestas variáveis, é possível verificar a etapa de *defuzzyficação*, que ocorre após as inferências Lavoura e Previsão Meteorológica. O valor numérico é calculado pelo método do centroide,

semelhantemente à etapa final de *defuzzyficação* descrita no parágrafo anterior. Estes valores numéricos são, então, atribuídos às variáveis Indicador Lavoura e Indicador Meteorológico, e servirão de entradas para a próxima etapa, a Inferência Irrigação.

Um resumo das velocidades calculadas pelo controlador de irrigação para a lavoura A, nas quatro condições meteorológicas, e com diferentes valores de Delta Nível, são apresentados na Tabela 4.3. Os valores de velocidade da bomba para as lavouras B e C são apresentadas no Apêndice B, nas Tabelas B.1 e B.2, respectivamente.

Tabela 4.3 – Resultados do controlador de irrigação para a Lavoura A

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	20,27	20,27	34,34	40,92
	Incentivada	39,48	39,53	51,34	60,17
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	21,88	26,29	40,78	48,77
	Incentivada	41,38	47,66	59,23	69,60
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	26,40	31,56	45,41	53,55
	Incentivada	44,62	52,78	64,00	73,96
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	32,03	37,46	49,89	58,25
	Incentivada	49,23	57,59	67,27	77,29
0,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	38,33	45,37	56,47	66,60
	Incentivada	55,74	66,02	73,61	84,89
- 1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	41,40	50,00	62,37	73,03
	Incentivada	61,44	72,50	81,13	90,60
- 2,0	Ponta	0	0	49,88	52,00
	Fora Ponta	49,23	57,59	67,27	77,29
	Incentivada	66,43	77,29	81,13	90,60

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os resultados apresentados na Tabela 4.3 e no Apêndice B evidenciam o comportamento do controlador de irrigação de acordo com as variações das variáveis envolvidas. De forma geral, verifica-se uma maior velocidade do conjunto de irrigação em condições de previsão meteorológica de dias mais secos, bem como em situações de níveis mais baixos de água da lavoura e nos horários de tarifa incentivada.

Acompanhando os valores das tabelas no sentido horizontal, dentro de uma mesma linha, é possível verificar o comportamento do sinal de referência de velocidade do controlador de irrigação para diferentes situações meteorológicas, com as demais variáveis fixadas. As colunas foram organizadas de forma que, da esquerda para a direita, se tivesse a condição meteorológica de dia de maior precipitação para a de dia mais seco.

As tabelas foram organizadas para que demonstrem as respostas do controlador de irrigação frente a variações do nível de água da lavoura, indo de níveis altos (delta nível positivo) na parte superior, para níveis mais baixos (delta nível negativo) na parte inferior das tabelas. Também é possível visualizar as alterações provocadas pela mudança tarifária ao longo do dia sobre o sinal de referência de velocidade, estas visualizadas dentro de uma mesma divisão (divisões brancas e cinzas). Com o Delta Nível de 4 cm ou superior, as velocidades encontradas não se alteram, assim como com os valores da variável de saída para Delta Nível abaixo de - 2 cm também não se alteram.

Em uma análise ampla, é possível primeiramente verificar o cumprimento dos princípios norteadores, apresentados no tópico 3.4.4, que guiaram a elaboração do conjunto de regras cadastrados na etapa de inferência *fuzzy*. A variável de saída do controlador de irrigação, que representa a velocidade de referência para os equipamentos de irrigação, eleva-se de acordo com situações que demandam maior reposição de água na lavoura, como é o caso de menor disponibilidade de reposição natural (precipitação), de aumento de fatores que elevam a evapotranspiração da lavoura, como temperatura do ar e velocidade do vento, de aumento da área irrigada ou de redução do nível de água lido na plantação.

Ainda em relação aos princípios norteadores, no que diz respeito à saída do controlador em relação às diferentes tarifas horárias, pode-se perceber que também foram respeitados. Em comparação à determinada condição da lavoura em horário

fora de ponta, a saída em horário de tarifa incentivada comporta-se sempre com um incremento. Já no horário de ponta, a irrigação é suspensa a não ser que a situação da lavoura indique ser severamente necessária a irrigação neste horário, ou seja, em casos de previsão meteorológica de um próximo dia seco, somados a um delta nível negativo.

Ao analisar com maior detalhe os valores da Tabela 4.3, observa-se que para uma previsão do tempo para um dia muito chuvoso, o controlador de irrigação reduz significativamente a velocidade do conjunto de irrigação, variando a saída de 20,27%, para Delta Nível de 4 cm ou superior, a 49,23%, para Delta Nível de – 2 cm ou inferior, em horários fora de ponta, de acordo com o nível de água da lavoura, e de 41,38% a 66,43% em horários de tarifa incentivada. Para uma previsão de dia também chuvoso, mas com precipitação menos intensa que o primeiro, o sinal de referência para a irrigação é superior ao primeiro caso, como forma de compensar essa diferença de expectativa de precipitação, variando entre 26,29% e 57,59% em horários de ponta, e 47,66% e 77,29% em horários de tarifa incentivada. Com a previsão de dias chuvosos não há existência de irrigação no período de ponta.

Para os dias secos apresentados na Tabela 4.3, verificam-se comportamentos coerentes em relação aos dias chuvosos, com incrementos maiores da velocidade quanto mais seco for o dia seguinte. Para o caso de previsão de um dia seco, a saída do controlador indica velocidades de irrigação entre 34,34%, para Delta Nível de 4 cm ou superior, e 67,27%, para Delta Nível de – 2 cm ou inferior, no horário fora de ponta, e entre 51,34% e 81,13% para o horário de tarifa incentivada, variação de acordo com o nível de água lido na lavoura. Em situações de previsão de dias muito secos, caracterizados pela ausência de precipitação, elevadas temperaturas e presença de ventos intensos, a velocidade de irrigação varia entre 40,92% e 77,29% no horário fora de ponta, e entre 60,17% e 90,60% no horário de tarifa incentivada. A previsão de dias secos combinada a um Delta Nível de – 2 cm ou inferior leva o controlador de irrigação a manter a irrigação durante o horário de ponta, em valores próximos a 50%, de acordo com os testes realizados.

As reduções de velocidade propostas pelo controlador de irrigação no dia atual se baseiam em informações de previsão do tempo do dia seguinte. Verifica-se, portanto, reduções expressivas na velocidade do conjunto de irrigação, em casos de previsão de dias úmidos e chuvosos. Apesar da grande confiabilidade da previsão meteorológica de curto prazo, que para o próximo dia pode chegar a 100% (INPE,

2020), a previsão pode não se confirmar. Caso isso aconteça, o nível de água da lavoura irá reduzir, onde o controlador de irrigação atuará elevando gradualmente a velocidade de irrigação, de forma a compensar uma eventual reposição menor que o previsto. O movimento contrário também é possível, de uma previsão de dia de muita evapotranspiração da lavoura não se confirmar. Neste cenário, o nível de água da lavoura tende a subir, provocando uma redução na velocidade de irrigação na saída do controlador.

As Tabelas B.1 e B.2, do Apêndice B, relacionadas ao comportamento do controlador de irrigação para as lavouras B e C, respectivamente, apresentam comportamento semelhante, com aumento da velocidade de irrigação conforme mais seca for a previsão meteorológica e mais baixo for o nível de água da lavoura. Também é possível observar comportamento semelhante em relação às diferentes tarifas horárias verificadas no comportamento da Tabela 4.3, com incremento da velocidade de irrigação no horário de tarifa incentivada, em comparação com a tarifa fora de ponta. Em relação ao horário de ponta, verifica-se também a velocidade de irrigação ir a zero, salvo condições combinadas de baixo nível (Delta Nível negativo) e previsões meteorológicas de dias secos.

Comparando os resultados apresentados nas tabelas 4.3, B.1 e B.2, entre si, é possível verificar o efeito da área irrigada sobre a saída do controlador de irrigação. Fica evidenciado que as velocidades dos testes realizados para a lavoura C, apresentados na Tabela B.2, são maiores que as velocidades simuladas para a lavoura B, apresentadas na Tabela B.1. Ambas as tabelas também apresentam valores de velocidade superiores aos da Tabela 4.3, para condições de simulação idênticas. Por exemplo, com a previsão de dia seco, Delta Nível = 0 cm e tarifa fora de ponta, a velocidade de referência para a lavoura C, de maior área irrigada, é de 64,67%, para a lavoura B, de área intermediária, é de 58,27% e para a lavoura A, de menor área irrigada, é de 56,47%.

Os testes de funcionamento do controlador de irrigação demonstraram um funcionamento coerente, verificado a partir dos resultados analisados. Ficou evidenciado o comportamento da variável de saída de acordo com a alteração das variáveis de entrada, no sentido de repor mais ou menos água na lavoura de acordo com a necessidade de irrigação que tal variável provoca. Também pôde-se constatar a observância do comportamento do controlador de irrigação aos princípios

norteadores traçados no início do seu desenvolvimento. A seguir, serão apresentados os resultados do teste de sensibilidade do controlador.

4.2.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade consiste em verificar o efeito que variação de um dado de entrada pode ocasionar na saída. Trata-se de uma técnica que permite não apenas analisar a influência das variáveis de entrada no resultado, mas também quais variáveis representam maiores impactos à saída (SALTELLI et al., 2008).

Conforme Saltelli et al. (2008), um dos formatos de análise de sensibilidade mais adotados é a verificação de dependência de parâmetro único, onde a saída é verificada a cada variação de um único parâmetro. Em outras palavras, varia-se uma entrada de cada vez, e analisa-se o comportamento da saída. Foram utilizadas como entradas as informações de lavouras descritos na Tabela 4.1 e as informações meteorológicas da Tabela 4.2, de forma a se adquirir pontos de operação do controlador de irrigação para estes dados. De forma a se verificar a sensibilidade em mais de um ponto de operação, realizou-se a seguinte combinação entre dados de lavoura e meteorológicos:

- a. Lavoura A e dia chuvoso;
- b. Lavoura B e dia seco;
- c. Lavoura C e dia muito seco;

em que o item *a* apresentará um ponto de operação de baixa Velocidade da Bomba, pois utilizaram-se dados da menor lavoura (lavoura A), com dados de uma previsão meteorológica chuvosa; o item *c* apresentará um ponto de operação de alta velocidade, uma vez que foram utilizados os dados da maior lavoura disponível com os dados meteorológicos de previsão de um dia muito seco; e o item *b* apresentara um ponto intermediário de operação.

Uma vez definidos os dados de entradas, estes foram alterados, um de cada vez, para patamares de +10%, +50%, -10% e -50%, em relação aos valores iniciais. Os valores de velocidade verificados nos ensaios da lavoura A, com dia chuvoso, são apresentados na Tabela 4.4. Os resultados dos demais ensaios são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.4 – Teste de sensibilidade para a lavoura A e previsão de dia chuvoso

Variação da Velocidade [%]					
Variável Alterada	Percentual de Alteração				
	-50%	-10%	0%	+10%	+50%
Área Irrigada	31,64	31,66	31,66	31,66	31,80
Delta Nível	37,47	32,75		30,57	26,25
Permeabilidade Média do Solo	24,51	29,32		33,36	39,66
Temperatura média	28,77	29,91		32,21	33,86
Precipitação	36,62	31,91		31,66	22,71
Vel. Média do Vento	29,85	31,56		31,81	32,66

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de velocidade verificados na saída do controlador de irrigação a partir das variações de +10%, +50%, -10% e -50% impostas a cada uma das entradas. Com os dados originais das Tabelas 4.1 e 4.2 verificou-se a resposta do controlador de irrigação em 31,66% da velocidade nominal do conjunto motor-bomba. De forma qualitativa, verifica-se que a variável de saída possui comportamento proporcional às variáveis área irrigada, permeabilidade do solo, temperatura e velocidade do vento, enquanto possui comportamento inversamente proporcional às variáveis delta nível e precipitação. Também, verifica-se que variações grandes da variável de entrada tendem a provocar variações maiores na saída do que as pequenas variações, denotando um comportamento coerente do controlador. O mesmo comportamento ocorre para os demais testes de sensibilidade realizados e apresentados nas Tabelas C.1 e C.2, no Apêndice C.

Em termos quantitativos, foram realizados os cálculos de variações percentuais em relação ao valor central para cada caso, de forma a possibilitar uma melhor análise. As informações de variação percentual dos testes de sensibilidade são apresentadas na Tabela 4.5, para a lavoura A, e Tabelas C.3 e C.4, localizadas no Apêndice C, para as lavouras B e C, respectivamente.

Tabela 4.5 – Variação percentual da velocidade, em relação à velocidade de referência, para a lavoura A e previsão de dia chuvoso

Variável Alterada	Variação da velocidade [%]			
	-50%	-10%	+10%	+50%
Área Irrigada	-0,06	0,00	0,00	0,44
Delta Nível	18,35	3,44	-3,44	-17,09
Permeabilidade Média do Solo	-22,58	-7,39	5,37	25,27
Temperatura média	-9,13	-5,53	1,74	6,95
Precipitação	15,67	0,79	0,00	-28,27
Vel. Média do Vento	-5,72	-0,32	0,47	3,16

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Em relação às variações da lavoura A, é possível verificar que a variável de saída possui maior sensibilidade às variações de permeabilidade do solo, precipitação e delta nível, onde variações de 50% de cada entrada podem ocasionar alterações entre 15 e 30% na saída. As variações de temperatura média e velocidade do vento impactam de forma menos expressiva na saída, nestas condições, sendo observadas variações de até 10% no valor da saída. Neste cenário, verifica-se que a variável área irrigada não possui impacto significativo. A explicação para isso é que o valor inicial de área considerada (50 ha) é muito baixo e, portanto, variações sobre este valor são similarmente baixos, não alterando significativamente o resultado do controlador.

No caso do ponto de operação de rotação intermediária, usando dados da Lavoura B e dia seco, inicialmente, nota-se que variações de 10% de qualquer uma das variáveis resulta em uma variação da variável de saída. Nas variações de 50% em relação ao valor original, verifica-se comportamentos levemente diferentes na sensibilidade das variáveis, em comparação com o cenário anteriormente apresentado. As variáveis que mais demonstram sensibilidade sob a variável de saída são temperatura média, velocidade média do vento e permeabilidade do solo, com alterações de até 30% sobre o valor do sinal de saída. As variações das

variáveis área irrigada e delta nível apresentaram impactos menores sobre a saída nestas condições.

No cenário de operação em rotação alta, onde foram utilizados os dados da Lavoura C e dia muito seco, verificou-se, novamente, que as variações de 10% de qualquer variável resultam em uma variação da saída, demonstrando uma boa sensibilidade do controlador. Variações maiores provocam impactos maiores na saída. Desta vez, as variáveis que apresentaram maior impacto foram temperatura média e área irrigada.

O comportamento observado é próprio da lógica nebulosa. Os subconjuntos das variáveis não são padronizados, possuem intervalos maiores ou menores e formatos diferentes, adotados para tentar traduzir ao algoritmo o comportamento de cada variável na realidade. Isto provoca, na operação do controlador de irrigação, que alguns valores de variáveis de entrada, ao serem variados, alternem significativamente a pertinência a mais de um subconjunto, provocando a ativação de regras que no valor original não eram ativadas, e alterando mais expressivamente o valor de saída. Em outros pontos, uma variação nem provocaria uma alteração de pertinência dos subconjuntos que compõem a variável, não alterando a saída. A este tipo de comportamento, exemplifica-se: uma área irrigada de 200 ha é considerada uma área média pela análise humana, assim como é uma área de 150 ha; logo, como a lógica *fuzzy* busca traduzir o conhecimento humano para a inteligência computacional, é de se esperar que nesta também não haja grandes diferenciações entre estes dois valores de área.

4.2.3 Verificação do comportamento sob atuação do GRD

Além de funcionar a partir da leitura das informações coletadas da lavoura e dos dados de previsão meteorológica, o controlador de irrigação foi projetado para receber comandos do gerenciador de resposta da demanda (GRD). A atuação deste gerenciador pode ocorrer de forma automatizada, a partir da identificação de uma transgressão operativa ocorrida na rede de distribuição rural.

A variável desenvolvida para permitir a interação do GRD com o controlador de irrigação é a *Resposta da Demanda*. A partir desta variável é possível que o gerenciador de resposta da demanda, ou o operador do sistema de resposta da demanda, interaja com cada controlador de irrigação, enviando um dos comandos:

1. Desligar Carga;
2. Atenuar 2;
3. Atenuar 1;
4. Manter;
5. Ligar Carga.

O comando “4. Manter” é o padrão de envio do GRD, de forma a manter o controle da irrigação de acordo com as variáveis “de campo”, ou seja, variáveis da lavoura, meteorológicas e tarifa horária. Contudo, em caso de necessidade do sistema, os comandos de atenuação e de desligamento foram desenvolvidos para reduzirem a velocidade do conjunto de irrigação, via inversor de frequência, reduzindo a demanda da instalação conforme a Equação 3.1.

Conforme os princípios norteadores traçados no início do desenvolvimento do controlador de irrigação, os comandos para ligar e desligar a carga devem se sobrepor à lógica de controle. Já os comandos de atenuação reduzirão o sinal de saída do controlador, em relação à condição de envio do comando “Manter”, deslocando a conclusão das regras em 1 subconjunto, no caso de “Atenuar 1”, e em 2 subconjuntos, no caso de “Atenuar 2”. Como a distribuição dos subconjuntos da variável *Velocidade Bomba* não é uniforme no universo da variável (conforme observado na Figura 3.9), a expectativa de redução do sinal de saída, é de 15 a 25% para “Atenuar 1” e de 30 a 45% para “Atenuar 2”, variando de acordo com o ponto de operação inicial que esteja o sinal de saída sem a interferência do gerenciador. Este é o comportamento esperado de acordo com os princípios norteadores.

Para verificar o comportamento do controlador de irrigação em diversas condições e validar a atuação da resposta da demanda, inicialmente, foram repetidos os testes realizados no tópico 4.2.1, substituindo o valor da variável *Resposta da Demanda* de “Manter” para “Atenuar 1” e “Atenuar 2”. Foram novamente utilizadas as informações de lavoura da Tabela 4.1 e os dados meteorológicos da Tabela 4.2. A Tabela 4.6 apresenta um resumo das velocidades calculadas pelo controlador de irrigação para a lavoura A, nas quatro condições meteorológicas, com diferentes valores de Delta Nível, e comando de “Atenuar 1” na entrada de *Resposta da Demanda*. Os valores de velocidade da bomba para as lavouras B e C são apresentadas no Apêndice D, nas Tabelas D.1 e D.2, respectivamente.

Tabela 4.6 – Resultados para a Lavoura A com comando de “Atenuar 1”

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	10,81	10,81	20,27	22,25
	Incentivada	20,27	20,27	34,34	40,92
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	11,50	13,49	22,59	27,96
	Incentivada	21,88	26,29	40,78	48,77
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	14,58	16,70	27,00	33,50
	Incentivada	26,40	31,56	45,41	53,55
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	18,85	21,88	32,50	38,97
	Incentivada	32,03	37,46	49,89	58,25
0,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	21,88	24,89	39,14	46,55
	Incentivada	38,33	45,37	56,47	66,60
- 1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	26,40	27,50	42,26	51,09
	Incentivada	41,40	50,00	62,37	73,03
- 2,0	Ponta	0	0	27,42	30,35
	Fora Ponta	32,03	37,47	49,89	58,25
	Incentivada	49,23	57,59	67,27	77,29

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Observa-se, na comparação dos valores apresentados na Tabela 4.6 com os da Tabela 4.3, que os valores da saída *Velocidade Bomba* sofrem uma redução em todas as condições de operação do controlador, devido a atuação do comando de resposta da demanda “Atenuar 1”. Verifica-se uma variação média no sinal de saída em 17,92% e máxima de 22,50%, comparando-se os valores das Tabelas 4.3 e 4.6. O mesmo efeito é verificado na comparação entre os valores das Tabelas D.1 e A.1, e das Tabelas D.2 e A.2. Na comparação ponto a ponto, todos os valores variaram dentro do comportamento esperado, de acordo com os princípios norteadores, com exceção às situações em que o sinal de saída do controlador inicialmente estava no patamar dos 20% de rotação, onde verificou-se uma atenuação levemente inferior

ao esperado, na ordem de 10%. Isto acontece devido à menor distância entre os subconjuntos “Rotação Muito Baixa” e “Desligada”, da variável *Velocidade Bomba*, que é de 10%.

A Tabela 4.7 apresenta um resumo dos sinais de saída do controlador de irrigação, verificados nas simulações com os dados da lavoura A, nas quatro condições meteorológicas, com diferentes valores de Delta Nível, e comando de “Atenuar 2” na entrada de *Resposta da Demanda*. Os valores de velocidade da bomba para as lavouras B e C são apresentadas no Apêndice D, nas Tabelas D.3 e D.4, respectivamente.

Tabela 4.7 – Resultados para a Lavoura A com comando de “Atenuar 2”

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	0	10,51	10,81	12,81
	Incentivada	10,81	10,81	20,27	22,25
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	0	10,51	12,35	12,90
	Incentivada	11,50	13,49	22,59	27,96
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	11,91	12,51	14,25	15,49
	Incentivada	14,58	16,70	27,00	33,50
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	11,91	12,51	18,45	20,51
	Incentivada	18,85	21,88	32,50	38,97
0,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	11,91	12,51	22,59	26,61
	Incentivada	21,88	24,89	39,14	46,55
- 1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	11,91	12,51	25,98	29,16
	Incentivada	26,40	27,50	42,26	51,09
- 2,0	Ponta	0	0	11,16	13,55
	Fora Ponta	18,83	18,83	32,50	38,97
	Incentivada	32,03	37,47	49,89	58,25

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na comparação dos valores apresentados na Tabela 4.7 com os da Tabela 4.6, verificam-se atenuações dos valores de referência de velocidade na saída do controlador com média de 15,02%. Esta redução acontecerá na situação de o gerenciador de resposta da demanda alterar seu comando para o controlador de irrigação de “Atenuar 1” para “Atenuar 2”, buscando reduzir a demanda da unidade consumidora irrigante. Comparando os valores da Tabela 4.7 com os da Tabela 4.3 é possível verificar que a capacidade total de atenuação do GRD sobre o sinal de saída do controlador, antes de desligar totalmente a carga, fica em um patamar de 32,69%, variando de acordo com o ponto de operação em que o controlador se encontra, podendo chegar a um máximo de variação de 45%. Para as Lavouras B e C observa-se comportamento com reduções médias similares. A Tabela 4.8 resume os valores médios encontrados, em termos de redução de velocidade, para cada lavoura, ao receber os comandos de atenuação, em relação aos valores iniciais.

Tabela 4.8 – Reduções médias de velocidade provocadas pelos comandos de atenuação

	Redução Média de Velocidade [%]	
	Atenuar 1	Atenuar 2
Lavoura A	17,92	32,69
Lavoura B	18,40	33,60
Lavoura C	17,90	34,27

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Utilizando os valores da redução média de velocidade da Tabela 4.8 na Equação 3.1, obtém-se os valores médios de redução de demanda esperados em cada nível de atenuação, obtendo-se reduções médias de 40% e 67% na demanda para os comandos “Atenuar 1” e “Atenuar 2”, respectivamente. O tópico 4.3 abordará com mais detalhes as expectativas de redução de demanda provocada pela redução de velocidade das atuações do GRD.

Em relação aos princípios norteadores, no que se refere às atuações destes comandos de atenuação do GRD, fica evidenciado que o comportamento corresponde ao inicialmente traçado para o controlador de irrigação. Com as variações dos subconjuntos da variável de saída, provocada pela atuação do GRD,

o controlador de irrigação reduzirá o sinal de saída em uma porção próxima a 18%, em média, para o comando “Atenuar 1”, e 33,5%, em média, para o comando “Atenuar 2”, pois cada comando faz deslocar, no sentido de redução, um subconjunto da variável de saída.

O Gerenciador de Resposta da Demanda possui, ainda, os comandos destinados a realizar a interrupção da irrigação, reduzindo a velocidade do conjunto de irrigação à zero (comando “Desligar Carga”), ou elevar a velocidade da irrigação para 100% da velocidade nominal (comando “Ligar Carga”). Este último poderia ser utilizado para reposição antecipada de água na lavoura, em uma situação de manutenção programada na rede de distribuição. A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos em todas as simulações realizadas com os estes dois comandos.

Tabela 4.9 – Resultados dos comandos “Desligar Carga” e “Ligar Carga”

Comando	Velocidade Bomba [%]
Desligar Carga	0
Ligar Carga	100

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os resultados apresentados na Tabela 4.9 demonstram que os comandos de interrupção da irrigação e de elevação para a velocidade nominal, enviados pelo GRD, se sobrepõem à decisão do controlador de irrigação. Este foi um dos princípios norteadores traçados para formatar o comportamento do controlador de irrigação e que foi seguido durante a implementação do conjunto regras no bloco de inferência. Foram realizadas simulações envolvendo os dados das três lavouras e os dados das quatro previsões meteorológicas, e os resultados repetiram-se de acordo com o que é observado na Tabela 4.9, de forma que se obteve a comprovação de que os comandos funcionam independentemente da configuração das demais entradas do controlador.

Com os testes dos comandos para ligar e desligar a carga, conclui-se a etapa de verificação da atuação do GRD sobre o controlador de irrigação, de forma que se verifica uma resposta apropriada e dentro do planejado nos princípios norteadores do conjunto de regras. Na sequência, será demonstrado o possível ganho de

eficiência energética no uso do controlador de irrigação em lavouras de arroz irrigado.

4.3 POSSÍVEIS GANHOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA IRRIGAÇÃO

O ganho de eficiência energética na irrigação da cultura do arroz, a partir do uso do controlador de irrigação proposto nesta tese, baseia-se não somente em utilizar a variação de velocidade dos equipamentos de irrigação, através de um inversor de frequência, mas nas variáveis consideradas no controle. Aqui destacam-se as variáveis de área irrigada, permeabilidade do solo e de previsão meteorológica, que impactam diretamente na necessidade de reposição de água na lavoura. A consideração às variáveis de previsão do tempo busca antever uma possível reposição natural a partir da precipitação, o que traz possibilidades ainda maiores de redução do consumo de energia elétrica e de água.

Como abordado anteriormente nesta tese, uma variação de velocidade em uma bomba centrífuga provoca uma variação de igual magnitude na vazão, e uma variação cúbica na potência motriz demandada. A Equação 3.1 pode ser utilizada para avaliar a redução de potência elétrica solicitada pelo conjunto de irrigação. Para avaliar os possíveis ganhos de eficiência energética, foram calculadas as reduções de potência demandada, nos cenários de simulação apresentados no tópico 4.3, a partir do funcionamento do controlador de irrigação, sem a atuação do gerenciador de resposta da demanda. Ou seja, foram analisados, pelo viés de redução de demanda, os cenários cujos resultados são apresentados nas Tabelas 4.3, B.1 e B.2. A Tabela 4.10 apresenta os percentuais de redução de potência da Lavoura A, calculados a partir da Equação 3.1. Os percentuais de redução de potência das lavouras B e C são apresentados no Apêndice E.

Tabela 4.10 – Percentuais de redução de potência de irrigação – Lavoura A

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Redução de potência [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Fora Ponta	99,08	99,08	95,55	92,46
	Incentivada	93,23	93,21	85,11	76,04
3,0	Fora Ponta	98,85	98,00	92,54	87,24
	Incentivada	92,21	88,09	77,14	62,91
2,0	Fora Ponta	97,98	96,54	89,70	83,11
	Incentivada	90,23	83,83	71,16	55,50
1,0	Fora Ponta	96,39	94,22	86,34	78,26
	Incentivada	86,88	78,99	66,51	49,21
0,0	Fora Ponta	93,81	89,73	80,19	67,51
	Incentivada	80,95	68,35	56,13	32,71
- 1,0	Fora Ponta	92,19	86,25	73,31	57,16
	Incentivada	74,49	58,08	41,26	18,20
- 2,0	Fora Ponta	86,88	78,99	66,51	49,21
	Incentivada	67,75	49,21	41,26	18,20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Tabela 4.10 apresenta a possível redução de potência elétrica demandada em cada uma das condições consideradas para a Lavoura A. Verifica-se que para as previsões meteorológicas de dias chuvosos e condições Delta Nível positivo, as reduções de potência superam os 94% em relação à potência nominal dos equipamentos de irrigação, fora do horário de ponta. Estes seriam os pontos de menor necessidade de irrigação e teriam velocidades de operação do conjunto de irrigação abaixo de 40% da velocidade nominal. No horário de tarifa incentivada, como a resposta do controlador é elevar a rotação para aproveitar a energia a um custo menor, a redução de potência não é tão acentuada, porém mantém-se acima de 78% da potência nominal, nas condições de dias chuvosos e nível alto da lavoura.

Mesmo nas condições de maior necessidade de irrigação, com previsões de dias secos e com nível baixo de água na lavoura, as reduções de potência elétrica demandada ficam acima de 49% no horário fora de ponta e 18% no horário de tarifa incentivada, demonstrando que pequenas reduções na velocidade nominal, podem

gerar um bom retorno em termos de eficiência energética na irrigação de lavouras de arroz. Por exemplo, uma redução de 49,21% na potência demandada, foi atingida com uma redução de apenas 22,71% da rotação da bomba centrífuga, de 100% para 77,29%. Uma redução de 18,20% na potência é auferida com uma redução de 9,40% na rotação da bomba, de 100% para 90,60%.

Para as lavouras B e C, os resultados das simulações são similares aos verificados na Lavoura A. A Tabela E.1 apresenta os valores de redução de potência para a Lavoura B e a Tabela E.2 para a Lavoura C. Nestas simulações observam-se também reduções mais acentuadas de potência, em patamares acima de 88% de redução no horário fora de ponta, e 64% de redução no horário de tarifa incentivada, em condições de previsão meteorológica de dias chuvosos e Delta Nível positivo. Já em condições mais críticas de irrigação, observa-se ao menos 33,58% de redução no horário fora de ponta e 18,20% no horário de tarifa incentivada.

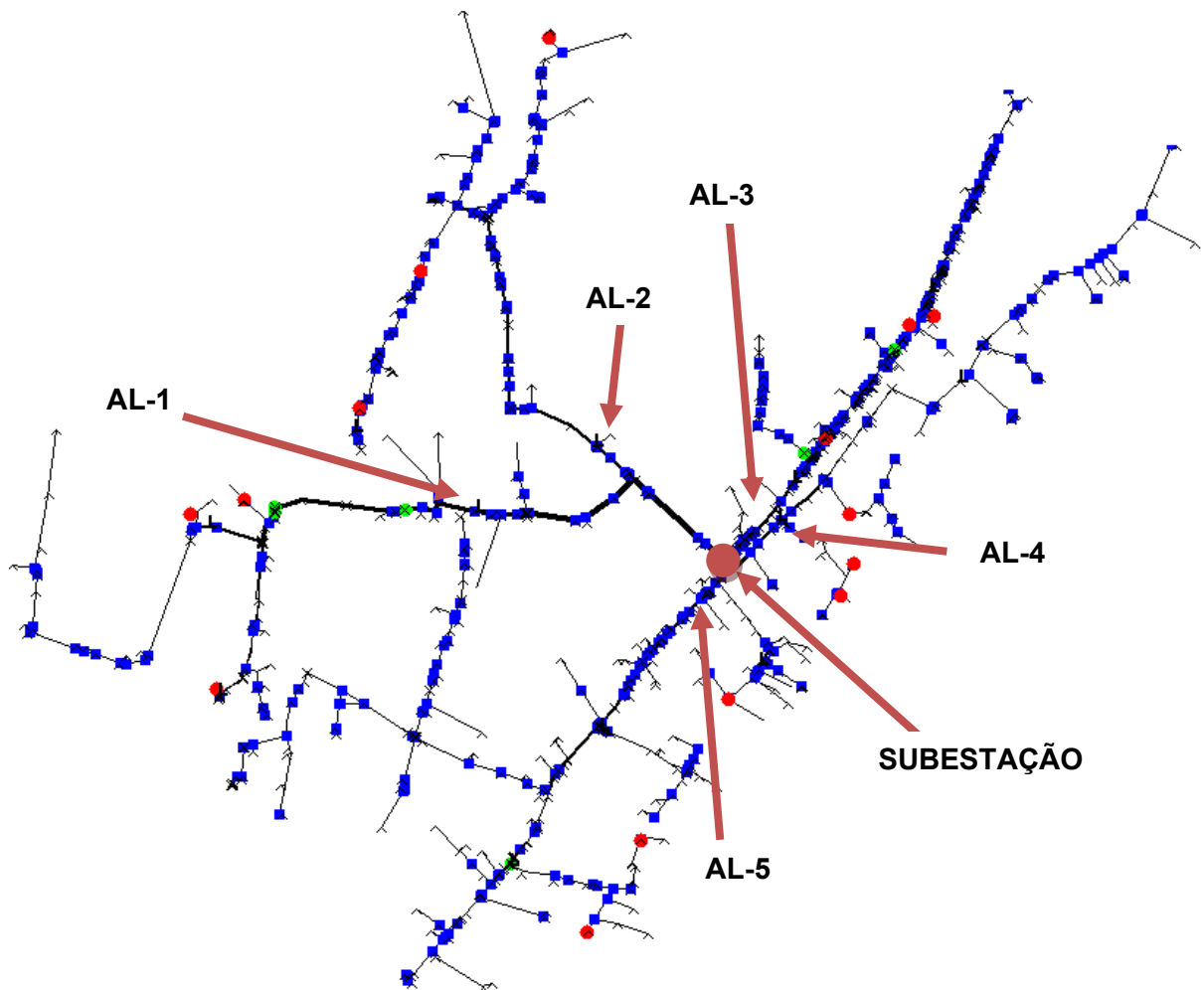
De forma geral, com a previsão de dia chuvoso, a possibilidade de redução de potência demandada para a irrigação é maior que nos dias em que há previsão de dias secos e quentes. Este comportamento é coerente, uma vez que a velocidade da bomba, calculada pelo controlador de irrigação é reduzida em condições em que há previsão de reposição natural de água na lavoura através da precipitação. Percebe-se, portanto, a grande influência da previsão meteorológica no comportamento do controlador de irrigação e em uma possível redução de consumo de energia elétrica, e, conseqüente, aumento da eficiência energética dos sistemas de irrigação de arroz. Ressalta-se que o controlador de irrigação proposto nesta tese possui esta característica como um diferencial aos demais encontrados nos trabalhos correlatos. Este ganho de eficiência, baseado na previsão de uma reposição natural de água na lavoura no dia seguinte, é um dos pontos de originalidade e de contribuição deste trabalho.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES ELÉTRICAS RURAIS UTILIZADAS

As redes rurais de distribuição que serão utilizadas para a realização dos testes da estrutura de resposta da demanda são de uma subestação localizada em região do Rio Grande do Sul, conhecida pela grande produção de arroz irrigado e alta concentração de consumidores irrigantes. Trata-se de uma subestação com dois transformadores com potência nominal de 25 MVA e 30 MVA, e tensão de

distribuição de 23,1 kV. Desta subestação, originam-se cinco ramais alimentadores, todos em 23,1 kV, que atendem a regiões geográficas distintas. Destes ramais alimentadores, os quatro primeiros (AL-1 a AL-4) estão conectados ao secundário do transformador de 25 MVA, enquanto apenas o AL-5 é alimentado pelo segundo transformador. A Figura 4.2 ilustra a distribuição geográfica da subestação e de seus circuitos alimentadores.

Figura 4.2 – Rede de distribuição de uma região produtora de arroz



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na Figura 4.2, o círculo maior de cor vermelha marca a posição da subestação. As linhas representam a distribuição e a ramificação de cada um dos cinco alimentadores. Cada alimentador atende a uma região geográfica diferente, em relação à subestação. O alimentador 1 (AL-1) atende aos clientes da região

oeste da subestação. A contagem dos demais alimentadores está no sentido horário, até chegar no alimentador 5 (AL-5), que atende aos consumidores da região sul desta subestação. Foi ocultada, na Figura 4.2, qualquer informação que possibilitasse a identificação da localização desta rede. Segundo informações de cadastro da concessionária que atende à região, são cerca de 79 unidades consumidoras (UCs) cadastradas como irrigantes e que são alimentadas pela subestação. As demandas de cada unidade consumidora variam de acordo com a área total a irrigar e a dimensão dos equipamentos de irrigação. A Tabela 4.11 apresenta características gerais da rede elétrica rural utilizada nas simulações, dividida por alimentador.

Tabela 4.11 – Características dos alimentadores rurais

	AL-1	AL-2	AL-3	AL-4	AL-5
Corrente máxima (A)	419	419	419	419	419
Potência máxima (kVA)	16,64	16,64	16,64	16,64	16,64
Ponto mais distante (km)	49,96	50,74	66,45	36,48	44,25
Total de clientes	73	102	221	74	225
Clientes irrigantes	12	14	18	16	19
Demanda do maior cliente irrigante (kW)	1910	1133	552	578	1039
Reguladores de tensão (quantidade)	2	2	1	1	2
Bancos capacitivos – potência total (kvar)	1800	1200	1200	1200	1800

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Cada alimentador é constituído com a mesma capacidade nominal de corrente elétrica na saída da subestação, de 419 A. Esta capacidade vai sendo alterada de acordo com a característica de distribuição de carga de cada alimentador, conforme a rede se distancia da subestação. Esta rede possui um total de 695 clientes cadastrados, dos quais 79 são clientes irrigantes, 11,37% do total. O alimentador 4 (AL-4) é o que possui maior concentração de consumidores irrigantes,

com 21,62% em relação ao total. O AL-3 é o que concentra menor quantidade relativa de consumidores irrigantes, com 8,14% do total de consumidores do alimentador.

Em relação ao comprimento da rede, verificam-se grandes distâncias nos cinco alimentadores, uma das características mais marcantes das redes elétricas rurais. Devido à estas elevadas distâncias, estas redes são susceptíveis a problemas de subtensão nos pontos mais afastados da subestação. O alimentador 3 (AL-3) é o que possui maior comprimento de rede, encontrando-se o ponto de atendimento mais distante a 66,45 km da subestação. A rede do AL-4 é a mais concentrada geograficamente, e possui o ponto de atendimento mais distante a 36,48 km da subestação.

Em relação à demanda de potência registrada pelos consumidores irrigantes, a maior unidade consumidora localizada nesta rede encontra-se no AL-1 e registra demanda de potência ativa de 1910 kW no período de safra. Há outras UCs de porte similar a esta, bem como consumidores de pequeno e médio portes. A demanda média das UCs irrigantes desta subestação é de 217 kW.

Devido às grandes extensões de rede e possíveis problemas de queda de tensão ao longo da rede, os cinco alimentadores estudados contam com reguladores de tensão e bancos capacitivos para auxiliar na melhora dos níveis de tensão. Cada alimentador conta com, de um a dois, reguladores de tensão, capazes de alterar sua tensão de secundário entre 0,9 e 1,1 p.u. em relação à tensão primária. Também são instalados, ao longo dos alimentadores, bancos capacitivos, com potência total entre 1200 e 1800 kvar, de acordo com o alimentador, como auxílio na tarefa de melhorar os perfis de tensão.

Dentre os consumidores irrigantes encontrados nas redes elétricas rurais, acredita-se que nem todos estariam dispostos a participar de um programa de resposta da demanda, pois implicaria em ceder o controle de seu sistema de irrigação à concessionária, a partir de um contrato específico. Desta forma, foram arbitradas três unidades consumidoras, dentre as cadastradas como irrigantes, por alimentador, para a realização dos testes e simulações. Este número representa uma participação do público irrigante de 25% no AL-1 e 15,79% no AL-5, alimentadores com menor e maior número de consumidores irrigantes cadastrados, respectivamente. As marcações menores, em cor vermelha, ao longo das redes de distribuição, apresentadas na Figura 4.2, sinalizam a posição destas unidades

consumidoras irrigantes selecionadas para receberem o controlador de irrigação e possibilitarem o estudo. A Tabela 4.12 apresenta as características das unidades consumidoras selecionadas para a realização das simulações.

Tabela 4.12 – Características das UCs consideradas nas simulações

UC	Alimentador	Demanda (kW)	Representatividade (%)	Distância da SE (km)
1-1	1	376	7,26	27,42
2-1	1	1910	36,89	30,86
3-1	1	1107	21,38	35,06
1-2	2	605	9,77	36,13
2-2	2	512	8,27	45,45
3-2	2	1133	18,30	48,20
1-3	3	301	5,94	19,48
2-3	3	368	7,27	35,92
3-3	3	552	10,90	39,18
1-4	4	529	8,64	10,33
2-4	4	578	9,44	10,80
3-4	4	366	5,98	11,01
1-5	5	954	11,71	11,83
2-5	5	1039	12,75	32,96
3-5	5	786	7,64	34,64

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

No processo de seleção, foram identificadas as UCs com maiores demandas em cada alimentador e, dentre estas, foram escolhidas 3. Verificou-se, contudo, que o perfil dos consumidores irrigantes é heterogêneo entre os alimentadores. No AL-1, por exemplo, duas das três UCs selecionadas possuem demandas acima de 1000 kW, enquanto no AL-3 e no AL-4, as UCs selecionadas possuem demandas máximas na casa dos 500 kW. De mesma forma, os distanciamentos das UCs em relação à subestação (SE) são bastante distintos. Tais características serão

benéficas para as análises, pois será possível verificar o impacto da instauração de um programa de resposta da demanda para redes elétricas rurais com diferentes perfis de consumidores irrigantes.

A representatividade da demanda das UCs selecionadas em relação à demanda máxima do alimentador também pode ser observada na Tabela 4.12. A UC com carga mais representativa em relação ao seu alimentador é a UC2-1, que concentra próximo a 37% da demanda do AL-1. As demais UCs apresentam representatividade de 5 a 22% em relação à demanda máxima de seu respectivo alimentador. As demandas das UCs selecionadas no AL-1 somam cerca de 65,54% da demanda máxima do alimentador, enquanto nos alimentadores 2 a 5, verifica-se 36,35%, 24,11%, 24,06% e 34,10%, respectivamente. Em outras palavras, a instalação de uma estrutura de resposta da demanda nestas redes possibilitará uma alteração destes percentuais de carga em cada alimentador, havendo um controle sobre 65,54% da carga total do AL-1, em um extremo, e sobre 24,06%, no outro.

4.5 IMPACTOS DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO EM REDES ELÉTRICAS RURAIS

A análise dos impactos provocados pelo controlador de irrigação (CI) nas redes elétricas rurais consiste em comparar os efeitos e possíveis benefícios da adoção do controlador proposto nesta tese pelas unidades consumidoras (UCs) irrigantes das redes elétricas rurais utilizadas nas simulações, fora do contexto da resposta da demanda. Estima-se que a adoção do controlador pelas UCs representará melhorias ao perfil de tensão da rede, bem como redução de perdas técnicas, devido ao menor carregamento provocado pela ação da modulação da velocidade e consequente redução da demanda dos equipamentos de irrigação dos irrigantes considerados.

Nos testes apresentados nos próximos tópicos, são verificadas, inicialmente, as condições de operação dos alimentadores rurais, considerando uma condição de grande necessidade hídrica para as lavouras, onde todas UCs irrigantes do alimentador encontram-se ligadas, com sua demanda nominal, durante 21 horas do dia, com exceção do horário de ponta, situação de ocorrência normal em dias secos durante a safra.

No segundo cenário, é realizada a alteração dos perfis de carga das três UCs selecionadas como participantes do programa de resposta da demanda de cada alimentador, descritas na Tabela 4.12, de acordo com os efeitos de redução de demanda dos controladores de irrigação para uma previsão meteorológica de dia muito seco, e área irrigada grande. São, portanto, considerados os sinais de referência de velocidade para o conjunto de irrigação, lido na saída do controlador de irrigação, com os dados da Lavoura C, em dia muito seco e Delta Nível = 0, conforme originalmente apresentados na Tabela B.2. A Tabela 4.13 reapresenta estes valores, bem como as demandas reduzidas esperadas para os equipamentos de irrigação, em relação à potência nominal, calculados segundo Equação 3.1.

Tabela 4.13 – Reduções de velocidade e demanda de irrigação das UCs controladas

Tarifa	Velocidade bomba (%)	Demanda reduzida (%)
Incentivada	90,25	80,86
Fora Ponta	74,58	45,63
Ponta	51,69	15,19

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

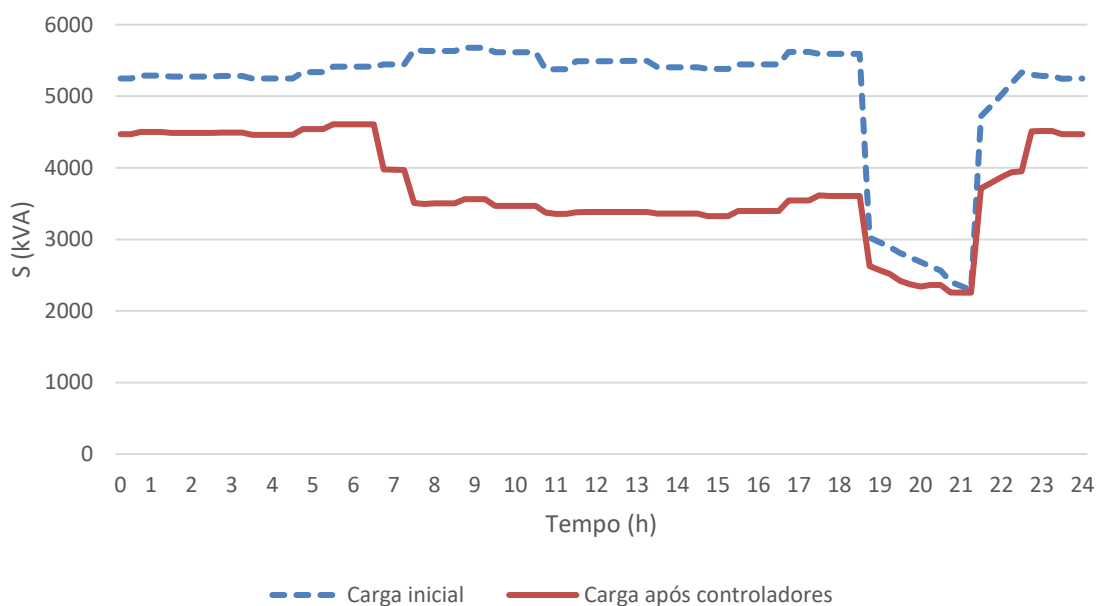
As demandas reduzidas apresentadas na Tabela 4.13 foram aplicados ao carregamento das três UCs nos horários ao longo do dia. Trabalha-se, portanto, com estimativa de redução de demanda dos equipamentos de irrigação de 19,14%, 54,37% e 84,81%, para os horários de tarifa incentivada, fora ponta e ponta, respectivamente. O teste é realizado nos cinco alimentadores disponíveis, obtendo-se impactos diferentes, devido às peculiaridades de cada alimentador.

4.5.1 Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 1

O Alimentador 1 (AL-1) atende a 73 unidades consumidoras (UCs). Destas, 12 UCs são irrigantes, segundo o cadastro da concessionária de distribuição. Juntas as três UCs que receberão o controlador de irrigação representam cerca de 65,53% da demanda máxima registrada no alimentador, ou seja, a atuação do controlador de irrigação ocorrerá sobre, aproximadamente, dois terços de toda a demanda do

alimentador. A Figura 4.3 apresenta os resultados dos perfis de carga do alimentador ao longo do dia, nos cenários inicial e após a inserção dos controladores de irrigação.

Figura 4.3 – Curvas de carga inicial e com os controladores de irrigação no AL-1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 4.3 apresenta o carregamento total no AL-1, no ponto de saída da subestação, com medições a cada 15 minutos, ao longo de um dia, antes e após a aplicação dos efeitos dos controladores de irrigação. A curva tracejada apresentada na cor azul demonstra o carregamento inicial do alimentador ao longo do dia. A curva contínua em tom vermelho apresenta o carregamento do AL-5 após a aplicação dos efeitos do controlador de irrigação sobre as UCs irrigantes previamente selecionadas.

Na curva de carga inicial, verifica-se um carregamento máximo total de 5,683 MVA (soma das três fases), às 9h. O carregamento oscila ao longo do dia mantendo-se em um patamar de alta demanda até alcançar o horário de ponta. Durante o intervalo do horário de ponta, verifica-se uma redução acentuada na demanda, devido ao desligamento das UCs irrigantes deste alimentador. O registro de menor carregamento do sistema ocorre por volta das 21h, quando se chega ao patamar de 2,291 MVA.

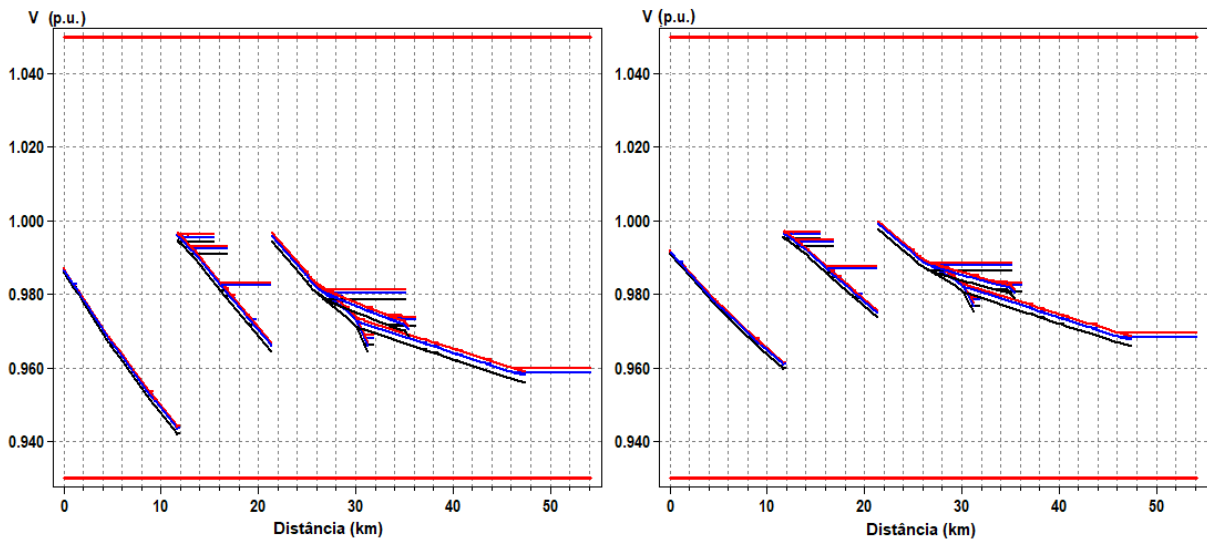
A análise comparativa da curva de carga após os efeitos do controlador de irrigação com a curva de carga inicial, demonstra que o perfil de carregamento do alimentador 1 (AL-1), ao longo do dia, é alterado de forma significativa. No período do horário fora de ponta, ocorre uma expressiva redução na potência total do AL-1. A velocidade estabelecida pelo controlador neste intervalo foi de 74,58% da velocidade nominal, o que leva a uma redução de 54,37% na potência demandada pelos sistemas de irrigação. Observa-se uma redução próxima a 2,11 MW no antigo horário de maior carregamento (9h), o que representa uma redução de 37,24% na demanda total do alimentador, neste horário.

No intervalo entre as 21h30 e as 06h30, o impacto do controlador de irrigação sobre a rede é menor, pois durante este intervalo está vigente a tarifa incentivada, sendo o momento em que o controlador realiza a reposição de água na lavoura de forma intensificada, estabelecendo a velocidade do conjunto de irrigação em 90,25% da velocidade nominal e reduzindo a demanda de potência em 19,14% da nominal. No intervalo do horário de ponta, não são verificadas variações significativas no carregamento do alimentador, mesmo com a entrada das três UCs consumindo cerca de 15,19% de sua potência nominal.

Uma observação importante é que a ação do controlador de irrigação é capaz de alterar o perfil de carga diário do alimentador, diminuindo a demanda ao longo do dia, e, inclusive, alterando o horário de maior consumo do sistema. Nas simulações apresentadas, o horário de maior demanda foi deslocado das 9h para as 6h. O intervalo da noite, durante o horário de tarifa incentivada, passa a ser o de maior demanda no alimentador, uma vez que as cargas controladas possuem maior demanda neste horário. Destaca-se que, neste alimentador, cerca de 65% da carga está nas três UCs que estão sendo controladas, o que justifica as elevadas alterações visualizadas no horário fora de ponta, onde ocorre a maior redução da irrigação destes clientes irrigantes.

A Figura 4.4 demonstra o perfil da tensão, ao longo da rede, nos dois cenários simuladores, nos respectivos horários de maior carregamento.

Figura 4.4 – Perfis de tensão inicial e com os controladores de irrigação no AL-1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Na Figura 4.4, o diagrama da esquerda representa o perfil de tensão inicial ao longo do AL-1, de acordo com o afastamento da subestação. Percebe-se que a tensão se mantém na faixa de tensão adequada, delimitada pelas linhas vermelhas horizontais posicionadas em 1,05 p.u. e 0,93 p.u.. As discontinuidades observadas são devido à ação dos dois reguladores de tensão localizados ao longo do alimentador. Além dos reguladores de tensão, o AL-1 conta com três bancos capacitivos que totalizam injeção de 1800 kvar à rede. O resultado é que não são verificadas situações de transgressão dos limites de tensão adequada, ao longo de toda a rede, mesmo no horário de maior carregamento. A barra de menor tensão ao longo da rede, nas condições iniciais, atinge 0,94 p.u., no horário de maior carregamento do sistema.

O diagrama da direita, por sua vez, apresenta o perfil de tensão registrado ao longo da rede do AL-1, no horário de maior carregamento, após a inserção dos controladores de irrigação. A redução no carregamento faz diminuir a queda de tensão nas linhas, melhorando o perfil de tensão ao longo do alimentador. A menor tensão, neste caso, atinge o patamar de 0,960 p.u.. Há, portanto, uma melhora no perfil de tensão, mesmo que neste alimentador não houvesse previamente situações de transgressão dos limites operativos.

Outra avaliação possível, na simulação com o OpenDSS, é o levantamento das perdas técnicas presentes na rede, a partir de um medidor de energia monitorando o ponto inicial do alimentador. A Tabela 4.14 apresenta o comparativo das perdas antes e após a inserção dos controladores de irrigação no Alimentador 1.

Tabela 4.14 – Comparativo de perdas técnicas no AL-1

	Carga inicial	Carga reduzida
Energia diária (MWh)	116,834	85,301
Perdas diárias (MWh)	9,683	4,950
Percentual da energia diária (%)	8,29	5,80
Perdas na demanda máxima do alimentador (kW)	473,7	314,9
Perdas em relação à carga máxima (%)	9,15	7,33

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

As perdas técnicas encontradas, inicialmente, ao longo do AL-1 totalizaram 9,683 MWh em um período de 24h, cerca de 8,29% da energia total (116,834 MWh) do AL-1 no período. As perdas no momento de maior carregamento da rede (9h) somam cerca de 473,7 kW, ou cerca de 9,15% da potência total registrada no alimentador.

Com a inserção dos controladores de irrigação, as perdas técnicas encontradas ao longo do alimentador sofrem uma redução para 4,950 MWh no período de 24h, ou 5,80% da energia total do alimentador (85,301 MWh) no período. Este valor representa uma redução bruta de 4,733 MWh de perdas de energia, em período de 24h, ou seja, uma redução de 48,88% em termos relativos às perdas técnicas totais do alimentador. Em relação ao instante de demanda máxima do alimentador, observa-se perdas de 314,9 kW, ou 7,33% da carga total (4292,6 kW), valores também inferiores ao encontrado no cenário inicial.

Em termos de redução do carregamento do alimentador, ao longo do dia, somam-se os efeitos de menor carga das UCs controladas e de menor quantidade de perdas técnicas ao longo do alimentador (o que é consequência do primeiro).

Considerando-se o horário das 9h, por exemplo, onde percebia-se o maior carregamento inicial do alimentador, verifica-se uma redução total de 2114,49 kW de demanda do AL-1, valor próximo a 37,24% da demanda total do alimentador. De mesma forma, observa-se uma redução de 26,99% na energia total consumida pelo alimentador, no período de 24h.

A aplicação do controlador de irrigação no AL-1 ocorreu em três UCs, que juntas representam cerca de 65% da demanda máxima registrada inicialmente no alimentador. Como apenas três consumidores representam grande parte da demanda de toda a rede, as alterações de suas potências impactam fortemente nos parâmetros elétricos da rede, incluindo as perdas de energia nos condutores. Esta observação prática reforça a proposta de que haja, inicialmente, e além da estrutura de resposta da demanda, um controle de irrigação inteligente para os consumidores rurais irrigantes, que considere variáveis como condições meteorológicas e tarifas de energia elétrica para determinar a reposição de água na lavoura. Cenários semelhantes a este, de forte impacto das UCs irrigantes no comportamento de toda a rede, ocorrem nos demais alimentadores simulados, assim como em outras redes rurais.

A condição simulada neste tópico prevê um dia muito seco, sem precipitação e, portanto, com grande necessidade de irrigação, o que eleva a demanda das UCs irrigantes. Caso a previsão meteorológica do dia seguinte fosse mais favorável, contemplando uma reposição natural a partir da precipitação, a redução de demanda das UCs controladas seria ainda mais acentuada, reduzindo ainda mais o carregamento do alimentador, bem como melhorando o perfil de tensão desta rede e reduzindo as perdas técnicas observadas.

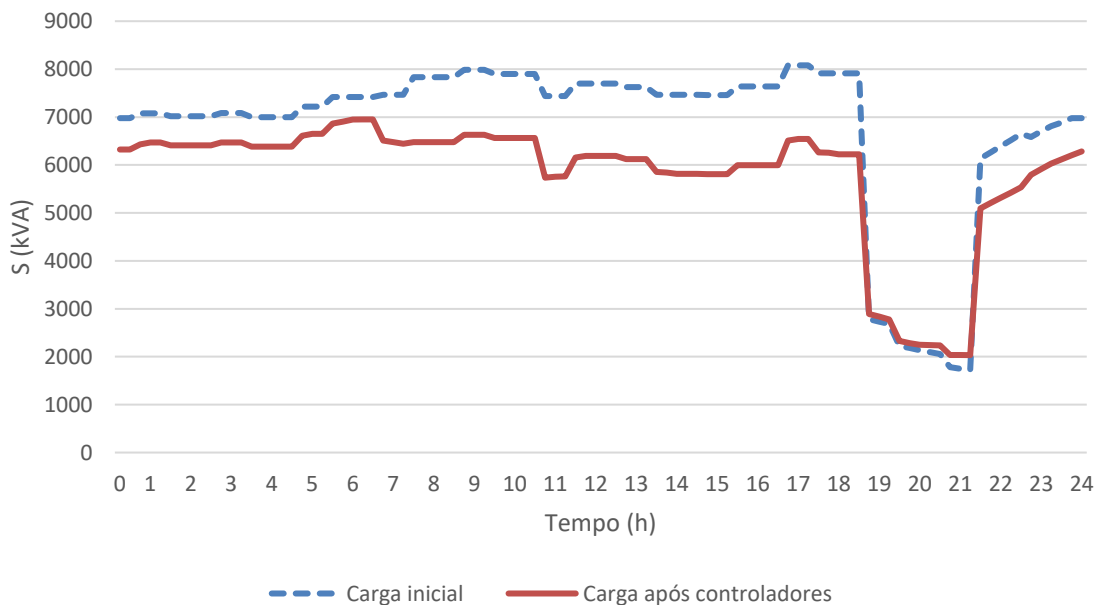
Uma limitação nas simulações aqui apresentada é a fixação do valor da variável *Delta Nível*, considerando-se que o controlador a manteve em zero durante todo o dia. Apesar de ser este o papel de qualquer controlador, oscilações ao longo do dia poderão ocorrer, devido a perturbações e ações de variáveis não contempladas no modelo do controlador. Em cenários reais, variações na demanda, sobre as verificadas nas simulações, podem ocorrer, de acordo com estas variações de nível de água da lavoura.

4.5.2 Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 2

O Alimentador 2 (AL-2) trata-se de um alimentador mais robusto em relação ao AL-1, possuindo um maior número de clientes conectados (102), e um maior número de clientes irrigantes (14), em relação ao AL-1. Além disso, as demandas das UCs irrigantes são mais equilibradas, não há a presença de um grande consumidor que destoe dos demais. As três UCs irrigantes consideradas representam cerca de 36,34% da demanda máxima registrada no alimentador.

Inicialmente, realizou-se o comparativo dos perfis de carga do alimentador, ao longo do dia, nos cenários inicial e após a inserção dos controladores de irrigação. A Figura 4.5 apresenta os resultados das simulações.

Figura 4.5 – Curvas de carga inicial e com controladores de irrigação no AL-2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A linha azul tracejada apresenta o perfil de carga inicial do alimentador, enquanto a linha vermelha contínua apresenta o perfil após a inserção dos controladores de irrigação.

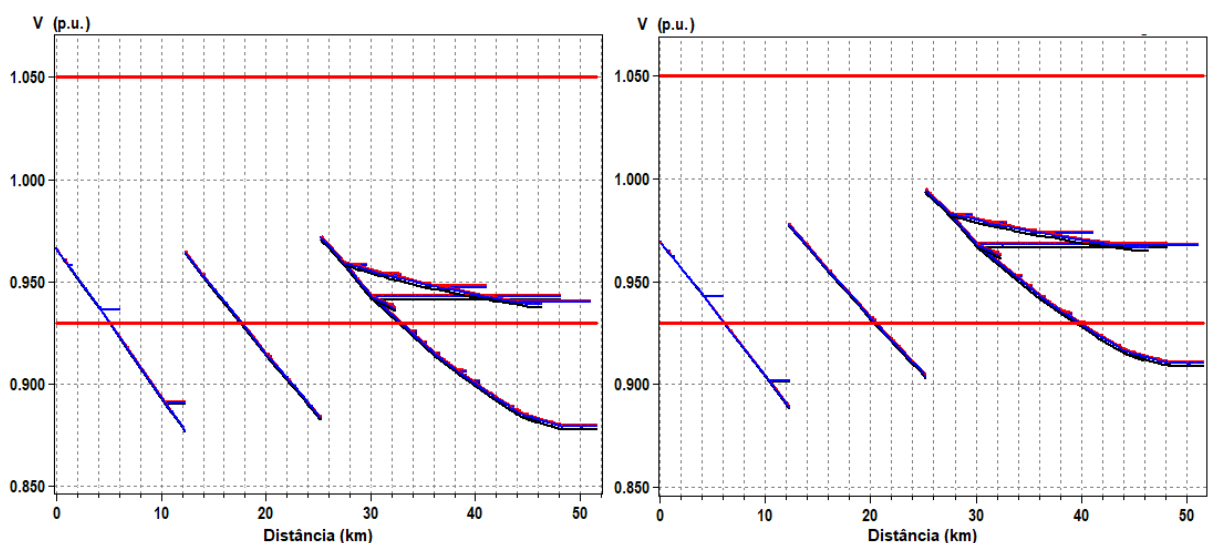
O carregamento máximo inicial deste alimentador ocorre às 17h, com potência total de 8,079 MVA. O carregamento fora do horário de ponta varia ao longo do dia, mantendo-se acima de 6,136 MVA. Durante o horário de ponta, há

uma forte redução na demanda, causada pelo desligamento das UCs irrigantes e pela redução das demais cargas, onde registra-se 1,724 MVA, às 21h (limite do horário de ponta).

A inserção dos controladores de irrigação provoca uma redução do carregamento do AL-2, em comparação com a curva inicial, principalmente, no período do horário fora de ponta. Observa-se que o antigo horário de maior carga (17h) reduziu a potência para 6,546 MVA, uma redução próxima a 19%. No intervalo de tarifa incentivada, observa-se uma redução menos acentuada, de cerca de 8,90%. Durante o horário de ponta, observa-se uma elevação média de 16,11% na carga do alimentador.

A inserção dos controladores de irrigação trouxe o efeito de deslocar o horário de maior demanda do AL-2 das 17h para as 6h. Neste horário, a potência observada é de 6,947 MVA. Este novo maior carregamento é 14,01% menor que o inicial. Novamente, o intervalo noturno, durante o horário de tarifa incentivada, passa a ser o de maior demanda no alimentador, uma vez que as cargas controladas possuem maior demanda neste horário. A redução do carregamento das UCs controladas, acarreta uma alteração na queda de tensão ao longo da rede, melhorando o perfil de tensão do alimentador. A Figura 4.6 apresenta os perfis da tensão, ao longo da rede, para os respectivos horários de maior carregamento do AL-2.

Figura 4.6 – Perfis de tensão ao longo do AL-2 nos horários de maior carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O diagrama da esquerda apresenta o perfil de tensão inicial ao longo do alimentador, enquanto o da direita apresenta o perfil após os controladores de irrigação. Percebe-se, nas duas situações, que, no momento de maior carregamento do sistema, ocorrem transgressões do limite de tensão considerada adequada. Nem mesmo os dois reguladores de tensão, ajustados para ganho de 10% na tensão (descontinuidades observadas nos diagramas), evitam a operação de partes do alimentador em faixa de tensão considerada precária (entre 0,93 e 0,90 p.u.) e crítica (abaixo de 0,90 p.u.).

Contudo, a redução de demanda provocada pelos controladores de irrigação, provoca que uma maior parcela do alimentador se mantenha dentro do limite de tensão adequada, enquanto porções bem menores da rede mantêm-se na faixa de tensão precária e praticamente elimina a operação em faixa de tensão crítica. O ponto de menor tensão da rede, por exemplo, passa de 0,875 p.u. para 0,890 p.u.. Desta forma, no cenário de elevada demanda por parte das UCs irrigantes deste alimentador, poderão ocorrer situações de subtensão ao longo da rede.

A própria aplicação dos controladores, portanto, no cenário analisado, é capaz de melhorar o perfil de tensão do AL-2, porém não de forma suficiente a manter todos os clientes dentro dos limites adequados previstos pelo PRODIST. Neste sentido, a instauração de uma estrutura de resposta da demanda pode vir a atuar sobre os efeitos já impostos pelo controlador de irrigação e adequar os trechos de rede com transgressões de tensão.

Com a condição de menor carregamento, observa-se uma redução nas perdas técnicas ao longo do alimentador. A Tabela 4.15 apresenta o comparativo das perdas antes e após a inserção dos controladores de irrigação no AL-2.

Tabela 4.15 – Comparativo de perdas técnicas no AL-2

	Carga inicial	Carga reduzida
Energia diária (MWh)	149,038	129,322
Perdas diárias (MWh)	23,622	16,713
Percentual da energia diária (%)	15,85	12,92
Perdas na demanda máxima do alimentador (kW)	1224,9	972,3
Perdas em relação à carga máxima (%)	19,79	18,23

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Em termos de perdas de energia ao longo do dia, houve uma redução de 23,622 para 16,713 MWh. A representatividade das perdas em relação à energia total diária do alimentador também reduziu, de 15,85 para 12,92%. Este valor representa uma redução bruta de 6,909 MWh de perdas de energia, em período de 24h. Na comparação com o momento de máxima demanda, também observa-se redução das perdas, de 19,79 para 18,23%, em termos relativos. Em relação à energia total consumida pelo alimentador, no período diário, verifica-se uma redução de cerca de 13,23%.

Trata-se, portanto, de um alimentador com um carregamento mais elevado, apesar da menor participação de consumidores irrigantes, em comparação com o AL-1. Devido ao elevado carregamento, este alimentador sofre com as questões de subtensão e altas parcelas de perdas técnicas distribuídas ao longo da rede, que chegam a valores próximos a 20% da potência ativa total do alimentador.

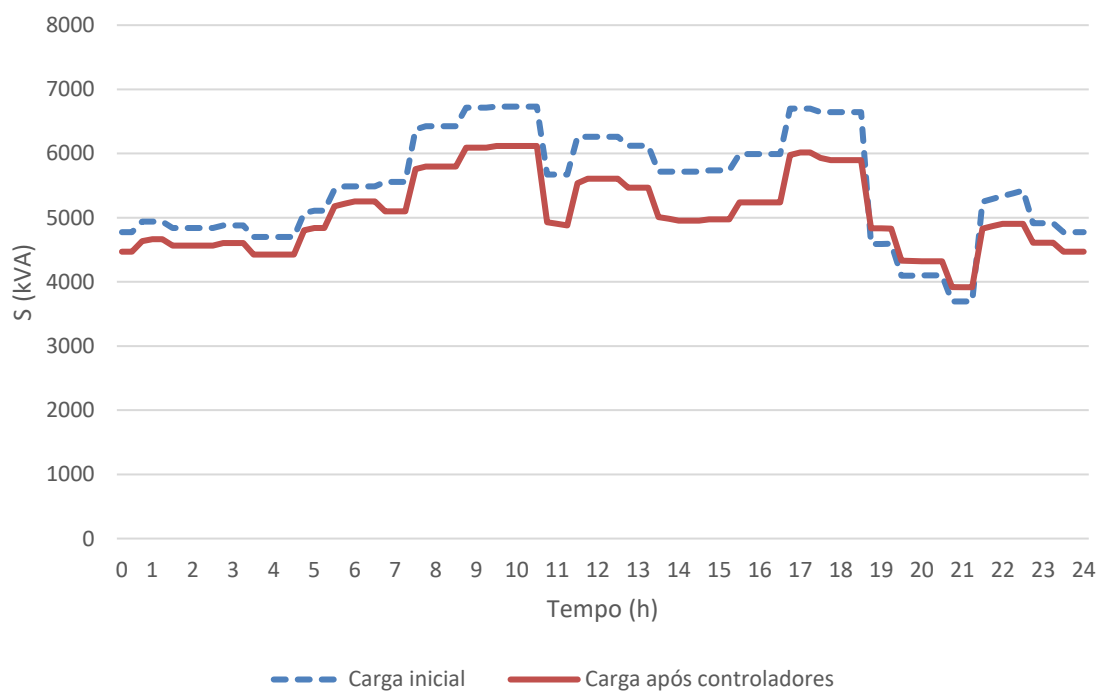
Os valores percebidos no AL-2, em termos de redução de perdas e de demanda do alimentador, são inferiores àqueles verificados na análise dos efeitos da inserção dos controladores de irrigação no AL-1. Isto deve-se à uma menor representatividade das UCs controladas no AL-2, em relação à demanda máxima, em comparação com o AL-1. No cenário analisado no AL-2, a carga “controlável” representa cerca de 36,34% da demanda máxima do alimentador. Os impactos provocados pelo controlador de irrigação, sobre esta parte da carga, serão menos expressivos em comparação com àqueles visualizados no AL-1.

4.5.3 Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 3

O Alimentador 3 (AL-3) possui 221 UCs, das quais 18 são cadastradas como irrigantes junto à concessionária. As UCs irrigantes consideradas participantes do programa de resposta da demanda representam cerca de 24,11% da demanda máxima registrada no alimentador. Este cenário caracteriza-se por uma menor participação das UCs “controláveis”, em comparação com os alimentadores já analisados.

A Figura 4.7 apresenta as curvas de antes (inicial) e após a inserção dos controladores de irrigação nas três UCs do AL-3.

Figura 4.7 – Curvas de carga inicial e com controladores de irrigação no AL-3



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 4.7 apresenta o carregamento total do AL-3, no ponto de saída da subestação, antes e após a aplicação dos efeitos do controlador de irrigação nas UCs participantes do programa de resposta da demanda, em um período de 24h. No cenário de carga inicial, representado pela curva azul tracejada, o carregamento máximo deste alimentador ocorre às 10h, com potência total de 6,731 MVA. O

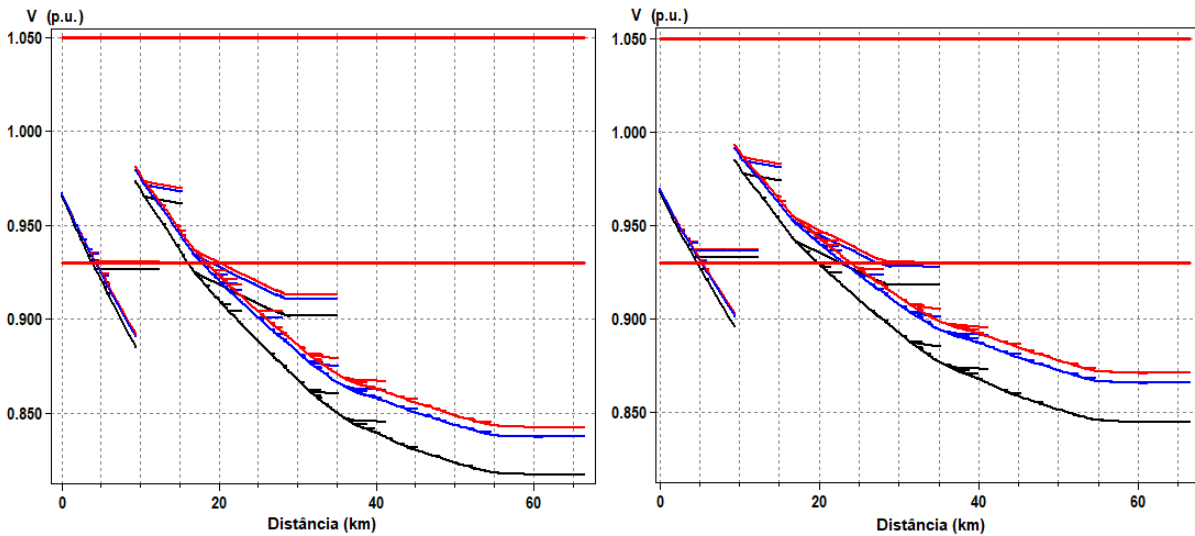
carregamento fora do horário de ponta varia ao longo do dia, entre 4,699 MVA e a potência máxima. Durante o horário de ponta, registra-se, no horário de menor carregamento do alimentador, 3,694 MVA, às 21h (limite do horário de ponta).

A curva vermelha contínua apresenta o perfil de carga do AL-3 após a ação dos controladores de irrigação nas três UCs irrigantes selecionadas. Há uma redução do carregamento do alimentador, em comparação com a curva de carga inicial, principalmente, no período do horário fora de ponta. Observa-se que o horário de maior carga não foi deslocado, permanecendo às 10h. Contudo, registrou-se uma redução na potência, para 6,117 MVA, neste instante; uma redução de 9,12%. No intervalo de tarifa incentivada, a redução observada é menos acentuada, de cerca de 5,48%, devido a, nesta faixa de horários, a redução da potência demanda pelos clientes irrigantes controlados não ser tão expressiva. No horário de ponta, há uma elevação média de 5,53% na carga do alimentador, em função do incremento de carga das UCs controladas, que mantiveram a irrigação devido à uma alta necessidade de irrigação.

No AL-3, a ação dos controladores de irrigação não teve o impacto de alterar o formato do perfil de carga, mantendo-se o comportamento observado na curva inicial, com um maior carregamento durante o período do dia (das 7h às 18h). Isto deve-se ao perfil deste alimentador, onde a concentração de consumidores irrigantes não é tão acentuada, possuindo uma representatividade menor sobre a carga total.

A redução do carregamento do alimentador acarreta uma alteração na queda de tensão ao longo da rede, melhorando o perfil de tensão do alimentador. A Figura 4.8 apresenta o perfil de tensão ao longo da rede no horário de maior carregamento do AL-3 (10h), antes e após a inserção dos controladores de irrigação nas três UCs.

Figura 4.8 – Perfis de tensão ao longo do AL-3 nos horários de maior carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Percebe-se que, em ambas as situações, ocorrem transgressões do limite de tensão considerada adequada pelo PRODIST, mesmo o regulador de tensão, ajustado para ganho de 10% na tensão, chegando, inclusive, ao patamar de tensão crítica (abaixo de 0,90 p.u.). A diferença é que, no cenário com os controladores de irrigação, há uma perceptível melhora nos níveis de tensão, onde, por exemplo, a tensão mais baixa, medida na fase preta ao final da rede, possui 0,845 p.u., ante aos 0,817 p.u., anteriormente encontrados. De forma geral, uma melhora no perfil de tensão ao longo da rede do AL-3 é percebida com a aplicação dos controladores de irrigação, mas não o suficiente para uma total adequação em todas as barras. Neste sentido, a instauração de uma estrutura de resposta da demanda poderá incrementar os efeitos já impostos pelo controlador de irrigação e adequar os trechos de rede com transgressões de tensão.

Em relação às perdas técnicas ao longo do alimentador, a condição de menor carregamento traz uma redução. A Tabela 4.16 apresenta o comparativo das perdas antes e após a inserção dos controladores de irrigação no Alimentador 3.

Tabela 4.16 – Comparativo de perdas técnicas no AL-3

	Carga inicial	Carga reduzida
Energia diária (MWh)	121,523	112,525
Perdas diárias (MWh)	12,820	10,462
Percentual da energia diária (%)	10,55	9,30
Perdas na demanda máxima do alimentador (kW)	744,7	587,0
Perdas em relação à carga máxima (%)	14,71	12,52

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Inicialmente, as perdas técnicas encontradas no AL-3 totalizaram 12,820 MWh em um período de 24h, cerca de 10,55% da energia total, neste período. A potência verificada como perdas técnicas no momento de maior carregamento da rede (10h), totaliza cerca de 744,7 kW, ou cerca de 14,71% da potência máxima observada no alimentador. Este alimentador possui menor participação de consumidores irrigantes, em comparação com os alimentadores 1 e 2, de forma que o impacto observado na redução das perdas técnicas também é menor. É percebida uma redução das perdas totais do dia para 10,462 MWh, ou uma redução de 18,39%. A representatividade das perdas em relação à energia total diária do alimentador também reduziu para 9,30%. Na comparação com o momento de máxima demanda, também se observa redução das perdas, de 14,71 para 12,52%, em termos relativos à carga.

A soma das potências das três UCs irrigantes controladas totalizam 24,11% da potência máxima do AL-3. Observou-se, portanto, um impacto menos expressivo trazido pela inserção dos controladores de irrigação, e consequente redução de carga irrigante das UCs.

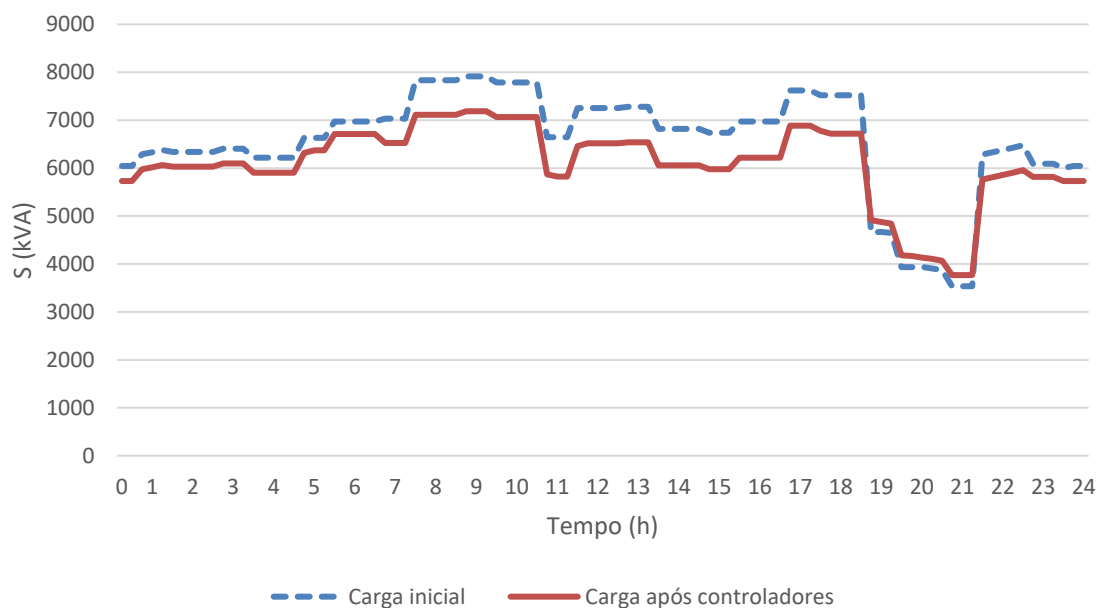
4.5.4 Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 4

O Alimentador 4 (AL-4) possui 74 UCs, das quais 16 são cadastradas como irrigantes junto à concessionária. As UCs irrigantes consideradas participantes do

programa de resposta da demanda representam cerca de 24,06% da demanda máxima registrada no alimentador. O montante de demanda “controlável” neste alimentador é semelhante ao verificado no AL-3. A maior diferença entre estes é que as UCs selecionadas no AL-4 são mais próximas à subestação, em relação ao AL-3.

As curvas de carga das situações inicial e após inserção dos controladores de irrigação são apresentadas na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Curvas de carga inicial e com os controladores de irrigação no AL-4



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

No cenário de carga inicial, representado pela curva azul tracejada, o carregamento máximo deste alimentador ocorre às 9h, com potência total de 7,912 MVA. O carregamento deste alimentador, ao longo do dia, mantém-se sempre em patamares acima de 6 MVA, com redução apenas no horário de ponta, momento de saída da carga irrigante. Durante o horário de ponta, registra-se o valor mínimo de 3,768 MVA, às 21h (limite do horário de ponta).

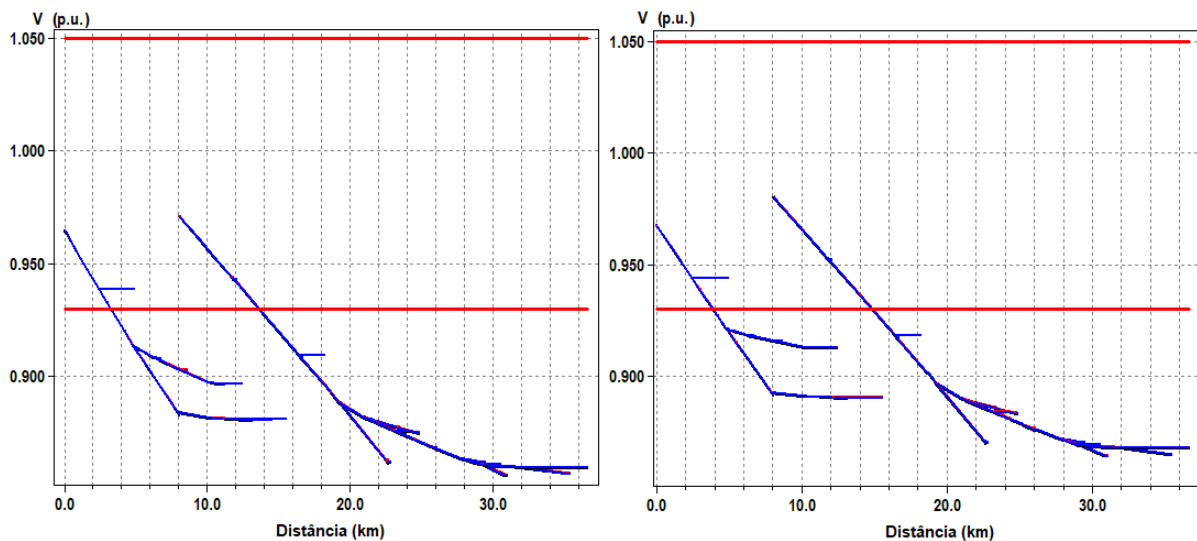
A curva vermelha contínua apresenta o perfil de carga do AL-4 com a ação dos controladores de irrigação nas três UCs irrigantes selecionadas. Percebe-se uma redução do carregamento do alimentador, em comparação com a curva de carga inicial, durante todo o período de ponta, com redução mais acentuada no período do horário fora de ponta. Neste cenário, o horário de maior carga

permanece às 9h, com um registro de 7,187 MVA, representando uma redução de carga de 9,16%, no horário. No horário de ponta, há uma elevação média de 5,47% na carga do alimentador, em função do incremento de carga das UCs controladas, que mantiveram a irrigação devido à uma alta necessidade de irrigação.

O formato do perfil de carga do AL-4, com a ação dos controladores de irrigação, mantém o comportamento observado na curva inicial, com um maior carregamento durante o período do dia (das 7h às 18h). Isto deve-se ao perfil deste alimentador, onde a concentração de consumidores irrigantes não é tão acentuada, possuindo uma representatividade menor sobre a carga total.

A queda de tensão ao longo da rede é reduzida com o menor carregamento observado, o que melhora o perfil de tensão do alimentador. A Figura 4.10 apresenta o perfil de tensão ao longo da rede no horário de maior carregamento do AL-4 (10h), antes e após a inserção dos controladores de irrigação nas três UCs.

Figura 4.10 – Perfis de tensão ao longo do AL-4 nos horários de maior carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O perfil de tensão observado após a ação dos controladores de irrigação, na figura da direita, não é alterado de forma significativa, neste alimentador, em relação ao perfil inicial (figura da esquerda). A razão deste efeito é a posição das três unidades consumidoras em relação à subestação, que além de se localizarem próximas, encontram-se antes do regulador de tensão. As três UCs consideradas

com a operação do controlador de irrigação situam-se fora da rede troncal, em derivações secundárias, que são observadas na Figura 4.10 com os dois “braços” observados por volta da distância de 10 km. É possível observar que a tensão no trecho da rede anterior ao regulador de tensão apresenta uma certa melhora, indo de 0,881 p.u. para 0,890 p.u. na barra de menor tensão. Após o regulador de tensão, também observa-se uma elevação das tensões de fim de rede, do nível de 0,856 p.u. no ponto de tensão mais baixo, para 0,864 p.u..

Apesar de apresentar melhorias, o que se nota é que a grande parte dos consumidores desta rede fica abaixo do limite de tensão adequada em ambos os casos. Portanto, neste tipo de cenário, com baixa representatividade das UCs em relação à potência total do alimentador, faz-se necessário que haja maior participação de clientes irrigantes com controladores de irrigação, bem como a instauração de um gerenciamento pelo lado da demanda, de forma a amplificar os discretos efeitos visualizados.

Outra análise realizada foi sobre os valores de perdas técnicas ao longo da rede de distribuição. A Tabela 4.17 apresenta um comparativo entre os valores observados.

Tabela 4.17 – Comparativo de perdas técnicas no AL-4

	Carga inicial	Carga reduzida
Energia diária (MWh)	143,746	133,544
Perdas diárias (MWh)	16,385	15,288
Percentual da energia diária (%)	11,40	11,45
Perdas na demanda máxima do alimentador (kW)	989,2	917,3
Perdas em relação à carga máxima (%)	16,16	16,57

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Os cenários simulados do AL-4 demonstram um efeito de aumento percentual da energia diária relacionada com as perdas técnicas ao longo da rede, em relação à energia diária total do alimentador, quando da inserção dos controladores de

irrigação nas UCs irrigantes selecionadas. Isto ocorre, uma vez que uma importante quantidade de carga é retirada da rede elétrica rural, com a inserção dos controladores de irrigação. Porém, por esta demanda estar localizada próxima à subestação, a quantidade de perdas evitadas, relativa ao total, não é representativa na mesma proporção. Cargas irrigantes grandes, não participantes do programa de resposta da demanda, estão localizadas no final deste alimentador, provocando perdas técnicas constantes.

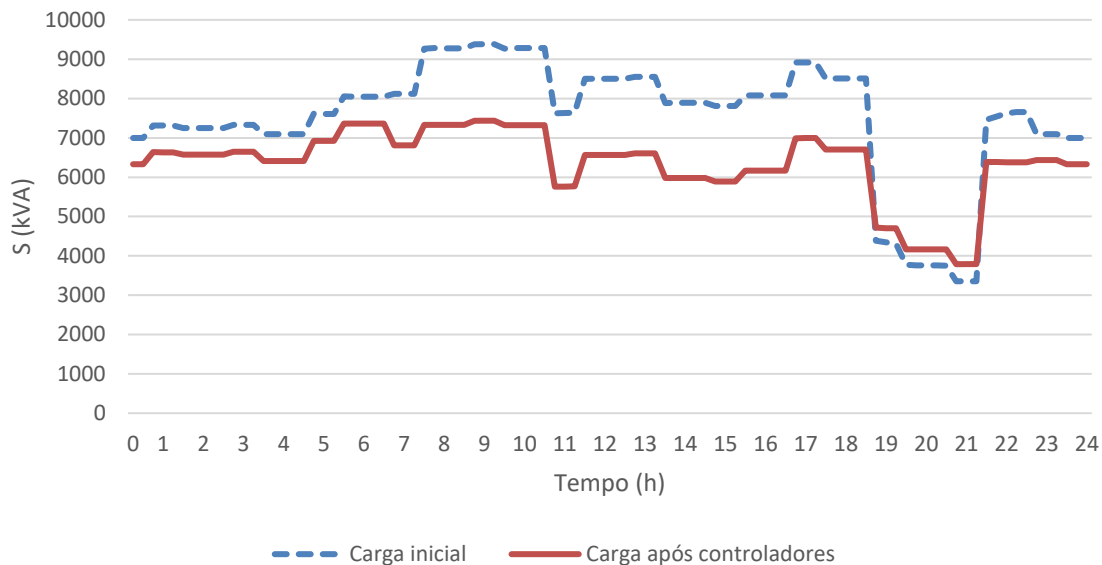
Em termos absolutos, as perdas técnicas são reduzidas. A perda total de energia registrada em 24 h reduz em cerca de 1,097 MWh, uma redução próxima a 6,70%. No horário de maior carregamento também há uma redução das perdas de cerca de 7,27%. Tratam-se de reduções menos expressivas em relação ao verificado nos demais alimentadores, inclusive no AL-3, que possuía um participação de carga controlável similar, porém com as UCs mais afastadas da subestação.

4.5.5 Impactos do controlador de irrigação no Alimentador 5

No Alimentador 5 (AL-5), estão instaladas 225 UCs, das quais 19 são cadastradas como irrigantes. As UCs selecionadas representam cerca de 32,10% da demanda máxima registrada no alimentador. O montante de demanda que estará sob comando do controlador de irrigação, neste alimentador, é semelhante ao verificado no AL-2. No AL-5, contudo, as UCs selecionadas estão mais distribuídas ao longo do alimentador, com UCs com 10 km a 35 km de proximidade da subestação, enquanto no AL-2, todas as UCs selecionadas estão localizadas a partir da distância de 36 km da subestação.

A Figura 4.11 apresenta os resultados dos perfis de carga do alimentador ao longo do dia, antes e após a inserção dos efeitos dos controladores de irrigação nas UCs selecionadas.

Figura 4.11 – Curvas de carga inicial e com os controladores de irrigação no AL-5



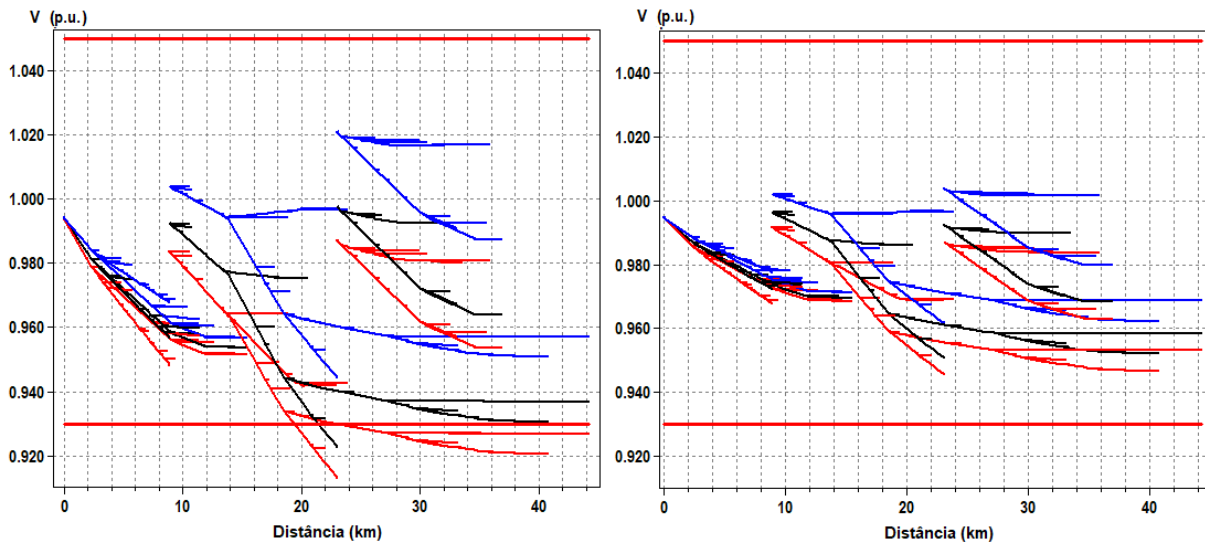
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A curva tracejada apresentada na cor azul demonstra o carregamento inicial do alimentador ao longo do dia. Salvo o horário de ponta, ao longo de todo o dia, a potência observada neste alimentador mantém-se acima de 7 MVA, chegando à 9,377 MVA no horário de maior carregamento, o que ocorre às 9h. A curva contínua em tom vermelho apresenta o carregamento do AL-5 após a aplicação dos efeitos do controlador de irrigação sobre as UCs irrigantes previamente selecionadas. Verifica-se uma considerável redução da carga do alimentador, principalmente, no intervalo de horário fora de ponta, gerado pelos controladores de irrigação. No intervalo de tarifa incentivada, percebe-se uma redução da potência do alimentador, em níveis mais discretos. No horário de ponta, ainda, há um pequeno acréscimo na carga, já que os controladores mantêm a irrigação neste horário, algo que não ocorria no cenário inicial.

Em termos numéricos, o carregamento máximo do alimentador, que se mantém às 9h, reduz-se, no segundo cenário, para 7,432 MVA, o que representa uma redução de 20,74%. Ao longo do horário fora de ponta, a redução de demanda manteve-se com reduções de 19,37%, na média. No horário de tarifa incentivada, a redução percebida é de 8,99%, e no horário de tarifa de ponta, há uma elevação de 10,53%. A redução ocorrida no horário de maior carregamento do sistema reduz as

quedas de tensão ao longo do alimentador. A Figura 4.12 apresenta o perfil de tensão nos dois cenários simulados, no horário de maior carregamento.

Figura 4.12 – Perfis de tensão ao longo do AL-5 nos horários de maior carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Em uma observação inicial, percebe-se que há desequilíbrio de tensão entre as fases, neste alimentador, o que ocorre devido à presença de cargas monofásicas distribuídas não uniformemente entre as fases. Todas as cargas irrigantes deste alimentador são trifásicas.

Na condição inicial, ocorrem transgressões do limite de tensão considerada adequada pelo PRODIST, no trecho de rede entre reguladores de tensão. As transgressões registradas ocorrem dentro do patamar de tensão precária, registrando 0,913 p.u. no ponto de menor tensão. De maneira geral, uma melhora no perfil de tensão é percebida, ao longo de toda rede do AL-5, com a aplicação dos controladores de irrigação, sendo suficiente para a total adequação da tensão em todas as barras que antes transgrediam o limite de 0,93 p.u.. O ponto de menor tensão passa a ter 0,947 p.u., demonstrando que a maior participação das cargas controladas neste alimentador é o suficiente para a corrigir às pequenas transgressões registradas nas redes elétricas rurais.

Em relação às perdas técnicas ao longo do alimentador, a condição de menor carregamento traz reduções significativas no AL-5. A Tabela 4.18 apresenta o comparativo das perdas antes e após a inserção dos controladores de irrigação.

Tabela 4.18 – Comparativo de perdas técnicas no AL-5

	Carga inicial	Carga reduzida
Energia diária (MWh)	169,900	144,838
Perdas diárias (MWh)	8,887	5,712
Percentual da energia diária (%)	5,23	3,94
Perdas na demanda máxima do alimentador (kW)	530,3	296,7
Perdas em relação à carga máxima (%)	6,51	4,44

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

As perdas técnicas encontradas no AL-5 apresentam níveis mais baixos, em comparação com os demais alimentadores. No cenário diário inicial, o percentual de perdas é de 5,23%, ou 8,887 MWh, em um período de 24h. A potência verificada como perdas técnicas no momento de maior carregamento da rede (9h), totaliza cerca de 530,3 kW, ou cerca de 6,51% da potência máxima observada no alimentador. É percebida uma redução das perdas totais do dia para 5,712 MWh, ou 35,72% de redução. Trata-se de uma significativa redução nas perdas técnicas, mesmo que inicialmente já fossem baixas. Em termos de redução da energia diária consumida, constata-se uma redução de 169,900 MWh para 144,838 MWh, ou seja, reduziu-se em 14,75% a energia consumida. Estes montantes de redução são atribuídos às reduções de carga das três UCs controladas, que possuem participação de 32,10% da carga do alimentador.

Os três consumidores representam cerca de um terço da demanda de toda a rede, de forma que as alterações de suas potências impactam significativamente em todos os parâmetros elétricos da rede, incluindo as perdas de energia nos condutores. Novamente, esta observação prática reforça a proposta de que haja, inicialmente, e além da estrutura de resposta da demanda, um controle de irrigação inteligente para os consumidores rurais irrigantes.

4.5.6 Considerações sobre os impactos do controlador de irrigação em redes elétricas rurais

Com a conclusão das simulações e análises individuais dos 5 alimentadores na situação em que controladores de irrigação foram adicionados a 3 unidades consumidoras irrigantes em cada alimentador, é possível destacar algumas semelhanças e algumas diferenças entre os efeitos observados, bem como justificar as ocorrências.

A Tabela 4.19 apresenta um resumo das alterações elétricas verificadas nos alimentadores rurais com a inserção dos controladores de irrigação.

Tabela 4.19 – Resumo das alterações elétricas dos alimentadores a partir da atuação dos controladores de irrigação

	AL-1	AL-2	AL-3	AL-4	AL-5	Média
Redução de energia fornecida (%)	26,99	13,23	7,40	7,10	14,75	13,89
Redução de demanda no horário pico alimentador (%)	18,93	14,01	9,12	9,17	20,74	14,39
Redução de perdas no alimentador (%)	48,88	29,25	18,39	6,70	35,72	27,79
Incremento na menor tensão registrada (%)	1,91	1,37	3,43	0,58	3,72	2,20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Tabela 4.19 apresenta os valores percentuais de variação registrados nas simulações individuais de cada alimentador nas condições antes e após a inserção dos controladores de irrigação. De forma geral, verificou-se reduções médias de 14,39% sobre a demanda no momento de maior carregamento de cada alimentador, bem como uma redução média de 13,89% em relação à energia total fornecida por esta subestação. Em paralelo, observou-se redução média de perdas técnicas de 27,79% nas redes consideradas e incrementos médios de tensão de 2,20%, considerando os pontos de menores tensões registradas em cada alimentador.

Para os alimentadores 2, 3 e 4, que se encontravam com grandes níveis de subtensão, mas que possuem baixa participação de carga sendo interferida por

controladores de irrigação, verificou-se que não foi possível a correção das transgressões apenas com as reduções de carga provocadas pelo controle de irrigação proposto. A estes alimentadores faz-se necessário a aplicação de um método, como o gerenciamento da resposta da demanda, para uma resposta mais acentuada sobre o gerenciamento da carga e a possível correção das transgressões de tensão.

Na questão das transgressões de tensão do AL-5, obteve-se êxito em corrigi-las com a simples aplicação do controle de irrigação e seus efeitos sobre a demanda. No cenário apresentado, que demonstra o momento mais crítico do ponto de vista da tensão, obteve-se um resultado bastante satisfatório. Cabe ressaltar que cenários de maior carregamento podem ocorrer, levando pontos da rede a reingressarem em situações de subtensão, então uma estrutura de resposta da demanda pode ser útil no sentido de assegurar o manutenção dos níveis de tensão dentro da faixa de tensão adequada.

Em termos do perfil de carga dos alimentadores, observou-se que, por possuírem uma maior participação das UCs irrigantes selecionadas, os alimentadores 1 e 5 possuem uma maior susceptibilidade a alterarem seu comportamento de consumo. No AL-1, inclusive, verificou-se uma mudança no perfil de carga diário, causada pelo expressivo impacto que as cargas controladas possuem sobre toda a rede. Esta maior participação das cargas controladas frente à demanda total do alimentador também trouxe efeitos maiores na questão da redução de perdas técnicas observadas nestes dois alimentadores.

No AL-2 foi onde ocorreu uma maior quantidade de perdas técnicas, com valores ultrapassando o patamar de 15%. A este efeito observado, associa-se a localização de grandes consumidores irrigantes, que são encontrados em distâncias superiores a 30 km da subestação. Condições físicas da rede, como condutores inadequados, também podem estar contribuindo para os valores registrados. Neste tipo de cenário, também observa-se uma redução expressiva das perdas técnicas com a redução da demanda dos clientes irrigantes, onde, nas simulações realizadas, registrou-se 29,24% a menos nas perdas técnicas diárias.

Um efeito indireto trazido pelo controlador de irrigação sobre a rede de distribuição, nos cenários simulados, foi a redução das variações de carga visualizadas no início e no término do horário de ponta. Com os recursos de simulação disponíveis, não é possível realizar uma análise transitória da carga e da

tensão nos limites horários da tarifa de ponta. Contudo, observou-se em todos os cenários um decréscimo dos degraus que ocorrem no início, 18h, e no fim, 21h, da tarifa horária de ponta. Este tema será proposto como continuidade deste trabalho.

Por conseguinte, verificou-se que, com cerca de 20% da demanda total do alimentador sendo controlada pelo controlador de irrigação proposto nesta tese, em todos os cenários apresentados, é possível obter impactos positivos sobre os parâmetros elétricos e sobre a qualidade da energia fornecida nas redes de distribuição rurais. Os impactos são ampliados conforme maior for a participação das cargas controladas frente ao total, bem como maiores forem as distâncias destas cargas em relação à subestação.

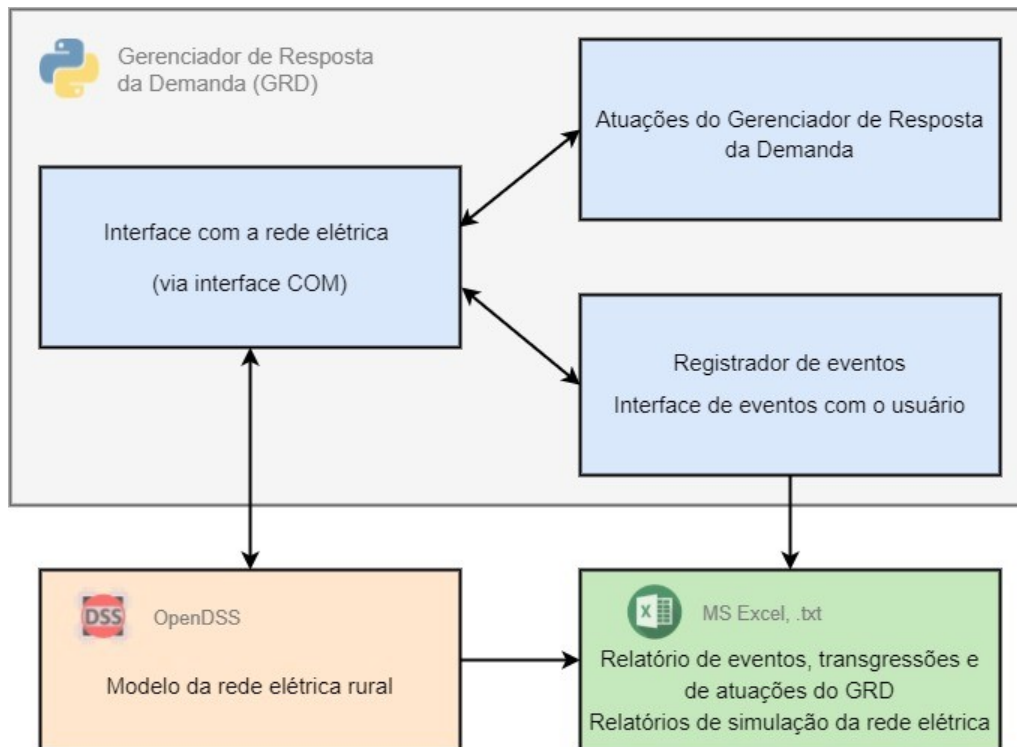
De maneira geral, este tópico propôs-se a demonstrar que apenas a inserção do controlador de irrigação em algumas unidades consumidoras é capaz de trazer melhorias para as redes elétricas rurais. A implementação de uma estrutura de resposta da demanda pode agregar ainda mais benefícios, bem como solucionar as transgressões de limites operativos que permaneceram, evitando operações fora das condições normais dos equipamentos e da legislação.

4.6 FUNCIONAMENTO DA ESTRUTURA DE RESPOSTA DA DEMANDA

O Gerenciador de Resposta da Demanda (GRD) foi desenvolvido em linguagem Python seguindo as heurísticas apresentadas no tópico 3.3. A proposta é que ocorra a atuação do GRD em casos de ocorrências de sobrecarga no transformador da subestação ou nos alimentadores de distribuição, bem como em ocorrências de transgressões, em pontos ao longo da rede, do limite mínimo de tensão adequada de acordo com o PRODIST, que é 0,93 p.u. para as redes de distribuição em média tensão.

A verificação do funcionamento do GRD ocorrerá a partir de simulações com sua aplicação nas redes elétricas de distribuição rural apresentadas no tópico 4.4. As redes elétricas estão modeladas no software OpenDSS, que possui vantagens como ser *open source* e permitir a comunicação, leitura de parâmetros e o envio de comandos de edição a partir de uma plataforma Python. A Figura 4.13 apresenta um panorama geral de quais as ferramentas utilizadas para simular a operação das redes de distribuição rurais e para coletar os resultados que serão analisados no andamento deste capítulo.

Figura 4.13 – Visão geral da estrutura utilizada para as simulações



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O Gerenciador de Resposta da Demanda (GRD) pode ser dividido em três grandes blocos. O primeiro bloco, ou bloco de atuações, é o que abriga as implementações das heurísticas de identificação e atuação para a solução das transgressões elétricas. O segundo bloco, ou bloco de interface, comanda as simulações da rede elétrica rural, modelada em OpenDSS. A comunicação é realizada através da Interface COM. Este bloco de interface realiza a leitura das variáveis e dos parâmetros de interesse, que serão utilizados pelo bloco de atuações, assim como envia as alterações de cargas propostas para o modelo da rede. Também envia um registro de todos os eventos ocorridos para o terceiro bloco, o bloco de registro e eventos. Neste bloco, são geradas as saídas de informações para a leitura do usuário, tais como a lista de status da rede elétrica a cada ciclo de simulação e a lista de eventos de alteração de carga. Também no bloco de registro e eventos são gerados os comandos de solicitação de relatórios que são levados ao bloco de interface, para a geração de relatórios de monitoramento dos parâmetros elétricos da rede. Todas as informações coletadas dos relatórios de eventos e

transgressões, relatórios de atuações e comandos do GRD, e relatórios de monitoramento elétrico da rede servirão de subsídio para a realização das análises que serão apresentadas no decorrer deste tópico.

Em uma aplicação prática da estrutura de resposta da demanda proposta nesta tese, o GRD realizaria o monitoramento das variáveis elétricas da rede e, em caso de ocorrência de uma transgressão, enviaria os sinais de controle para a entrada dos controladores de irrigação, o que reduziria a velocidade dos equipamentos de irrigação e, conseqüentemente, a demanda destes equipamentos. O impacto de cada atuação seria sentido pelo GRD através dos mesmos parâmetros elétricos monitorados.

Na aplicação do protótipo, através de simulações com os modelos de rede do OpenDSS, não há a figura do controlador de irrigação, mas somente as cargas de cada UC. Desta forma, para a realização das simulações, o GRD foi adaptado para o envio de um multiplicador, que faz a alteração direta na demanda, correspondente ao valor médio verificado nas atenuações dos comandos “Atenuar 1”, “Atenuar 2” e “Desligar Carga”, observados no tópico 4.2.3. A Tabela 4.20 reapresenta os valores médios de redução de demanda, que foram utilizados para os testes do gerenciador.

Tabela 4.20 – Atenuações médias de demanda consideradas no gerenciador

Comando	Atenuação da demanda (%)
Atenuar 1	40,0
Atenuar 2	67,0
Desligar Carga	0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Ao ser necessário o envio do comando “Atenuar 1” à uma UC, o gerenciador realizará a redução de sua demanda em 40%, multiplicando sua demanda lida pelo fator 0,60, enquanto que para o comando “Atenuar 2” o fator de multiplicação será 0,33, e para “Desligar Carga” o fator será 0.

Na sequência deste tópico, serão apresentados cenários, dentro das redes de distribuição rurais disponíveis, para cada uma das heurísticas de atuação do GRD.

Em seguida, será apresentada a operação da estrutura de resposta da demanda em um cenário diário destas redes, com todas as operações envolvidas.

4.6.1 Atuação em caso de sobrecarga do transformador da subestação

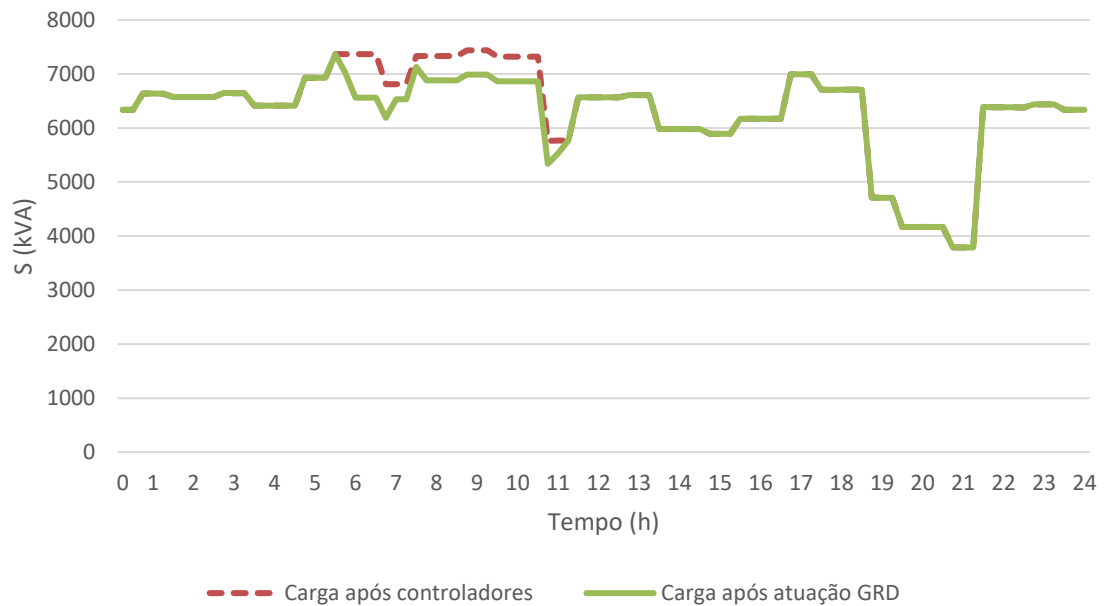
O Gerenciador de Resposta da Demanda (GRD) identifica como sobrecarga qualquer situação em que a potência aparente lida na barra do secundário do transformador ultrapassa o valor de potência aparente nominal do transformador. Identificada esta situação, o GRD realiza a heurística proposta no tópico 3.3.1, de forma a sanar a transgressão identificada. As unidades consumidoras (UCs) participantes do programa de resposta da demanda ligadas ao transformador, em qualquer alimentador, estão aptas a serem atuadas, no sentido de redução de sua demanda, na ordem do maior nível da lavoura para o menor. As atuações ocorrem através da variável *Resposta da Demanda*, dos controladores de irrigação, que recebem do GRD os comandos “Atenuar 1”, “Atenuar 2” ou “Desligar Carga”, descritos no tópico 3.2.2.7.

De mesma forma, em caso de fim do evento de sobrecarga do transformador (possibilidade de retorno das cargas sem causar uma nova sobrecarga), o GRD realiza a normalização das cargas, com o envio do comando “Manter”, para a entrada *Resposta da Demanda* dos controladores atuados.

Para evidenciar o funcionamento desta atuação do GRD, foi utilizada a rede de distribuição do alimentador 5 (AL-5). Este alimentador possui seu próprio transformador, com capacidade de 30 MVA. Como a potência máxima do alimentador atinge 7,366 MVA, valor abaixo da capacidade do transformador, para efeito de testes de comprovação de funcionamento, apenas, será cadastrado no GRD o valor de 7 MVA como potência nominal do transformador.

Executou-se o algoritmo do GRD considerando a curva de carga diária do AL-5 apresentada na Figura 4.11, com a ação dos controladores de irrigação. Nesta curva, a carga apresenta momentos em que ultrapassa os 7 MVA. O objetivo deste teste de funcionamento é verificar se o GRD reconhece esta sobrecarga e se sua atuação corrige as transgressões. A Figura 4.14 apresenta a curva de carga diária resultante da atuação do GRD, comparativamente à curva de carga inicial do transformador do AL-5, com pontos em intervalos de 15 minutos.

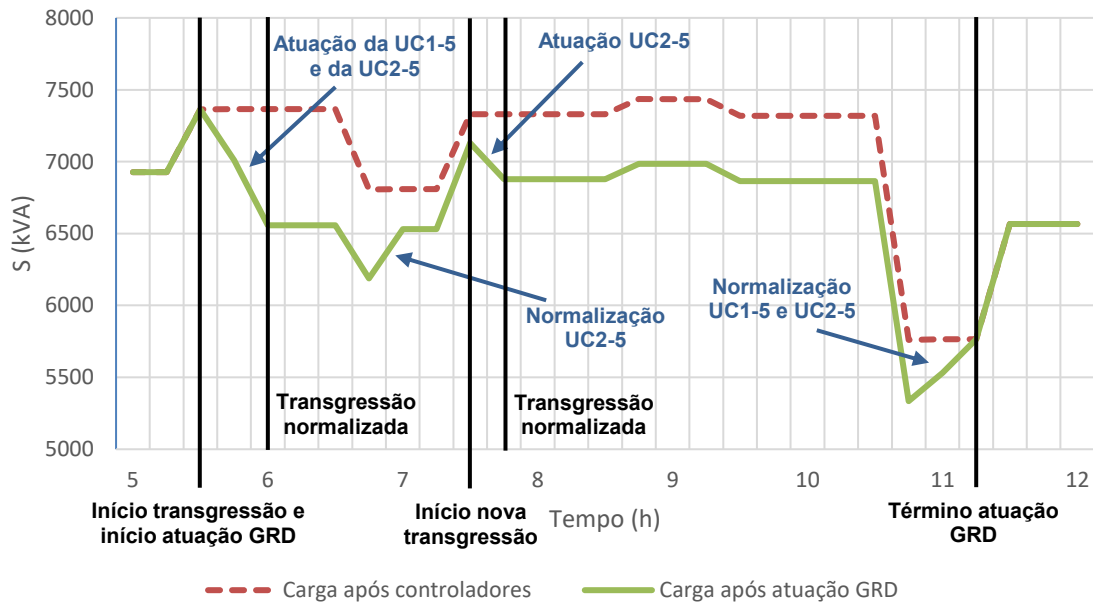
Figura 4.14 – Atuação do GRD para corrigir sobrecarga transformador subestação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A curva vermelha tracejada apresenta a condição inicial de carga do transformador, ao longo do dia, já considerando os efeitos dos controladores de irrigação sobre as três UCs irrigantes consideradas no AL-5. A curva verde contínua representa a carga do transformador, ao longo do dia, com as atuações do GRD. Observa-se que, apenas nos momentos em que a curva de carga tracejada excede o patamar de 7 MVA, ocorrem atuações do GRD e variações da curva contínua para a tracejada. Estas variações ocorrem no intervalo horário entre 5h30 e 11h. Nos demais horários do dia, as duas curvas se mantêm sobrepostas. Para identificar as atuações do GRD, primeiramente, é consultado o relatório de registro de eventos, transgressões e atuações do GRD, que é apresentado no Apêndice F. Os registros dos eventos de transgressão e atuações foram organizados em ordem cronológica, na Figura 4.15, de forma a facilitar a identificação das ocorrências.

Figura 4.15 – Detalhe do intervalo onde ocorreram atuações do GRD



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O GRD acompanha o funcionamento da rede até que, às 5h30, identifica o evento de sobrecarga do transformador da subestação, a partir de onde transcorrem os seguintes eventos:

- 5h30: identificada a sobrecarga do transformador da subestação ($S = 7363$ kVA); reduzida a demanda da UC1-5 para 60% da atual;
- 5h45: transformador da subestação permanece em sobrecarga ($S = 7009$ kVA); reduzida a demanda da UC2-5 para 60% da atual;
- 6h00: transgressão normalizada ($S = 6558$ kVA);
- 6h45: condição para normalizar UC2-5 satisfeita ($S = 6188$ kVA); demanda da UC2-5 normalizada ($S = 6531$ kVA);
- 7h30: identificada nova sobrecarga do transformador da subestação ($S = 7129$ kVA); reduzida a demanda da UC2-5 para 60% da atual;
- 7h45: transgressão normalizada ($S = 6878$ kVA);
- 10h45: condição para normalizar UC1-5 satisfeita ($S = 5334$ kVA); demanda da UC1-5 normalizada ($S = 5531$ kVA);
- 11h00: condição para normalizar UC2-5 satisfeita; demanda da UC2-5 normalizada ($S = 5766$ kVA).

Verifica-se que a atuação do Gerenciador de Resposta da Demanda corrigiu as situações em que a demanda transgrediu a potência nominal considerada para o transformador da subestação. Foi necessário, em um primeiro momento, a atuação com o comando “Atenuar 1”, que reduz em média 40% da demanda, sobre a UC1-5 e a UC2-5. Nota-se que, nas simulações, as atuações do GRD ocorrem uma a cada ciclo de simulação, que é de 15 minutos, mas em uma implementação real, não haveria esta limitação. Na sequência do dia, as demais cargas do transformador se alteram permitindo o retorno da UC2-5 ao seu patamar de demanda anterior (envio do comando “Manter”), e, na sequência, novamente, solicitando a redução da demanda da UC2-5, em 40% (comando “Atenuar 1”). A carga do transformador fica elevada, mas dentro do limite da potência nominal até às 11h00, onde uma redução das cargas do sistema permite a normalização das duas UCs que estavam atuadas.

A característica sazonal das unidades consumidoras irrigantes, em regiões de produção de arroz, coloca o transformador da subestação rural em sobrecarga, de forma recorrente. O objetivo principal da heurística apresentada é reduzir estas ocorrências de sobrecarga dos transformadores, mantendo-o dentro de uma faixa segura de operação e, de forma indireta, reduzir sua suspeição a falhas e prolongar sua vida útil. Neste sentido, a simulação apresentada evidencia o correto funcionamento do GRD na identificação e correção deste tipo de transgressão.

A retirada de parte da carga em momento de pico do sistema implica em redução da reposição de água nas lavouras das UCs impactadas. Este déficit implica em uma redução do nível de água aparente da lavoura, deixando a variável *Delta Nível* em valores mais baixos, o que incrementa a velocidade da bomba e a demanda da UC. Em outras palavras, o que o GRD faz é deslocar parcelas de demanda da rede dos seus horários de pico para horários de menor carregamento. Para que isso pudesse ser observado nas simulações do protótipo do GRD, seria necessário haver uma simulação simultânea do balanço hídrico de cada UC controlada, o que não está no escopo desta tese.

4.6.2 Atuação em caso de sobrecarga no alimentador

A sobrecarga de um alimentador é identificada quando a corrente elétrica lida na linha principal do alimentador é maior do que a corrente máxima admitida nos condutores. Normalmente, esta limitação é realizada a partir da parametrização dos

equipamentos de proteção de sobrecorrente de cada alimentador, e possui ajuste inferior à capacidade máxima de condução de corrente dos condutores. De forma a sanar a transgressão identificada, o gerenciador de resposta da demanda realiza a heurística proposta no tópico 3.3.2. Apenas as UCs participantes do programa de resposta da demanda ligadas no alimentador em que ocorre a transgressão possuem demanda reduzida pelo GRD. As atuações seguem sendo realizadas, através da variável *Resposta da Demanda* dos controladores de irrigação.

Para a demonstração de funcionamento realizada neste tópico serão realizadas as simulações em dois cenários distintos, dos alimentadores 1 e 3, sendo que o primeiro possui grande parte da carga concentrada em poucas UCs controladas, e o segundo possui baixa parcela da carga controlável pelo GRD.

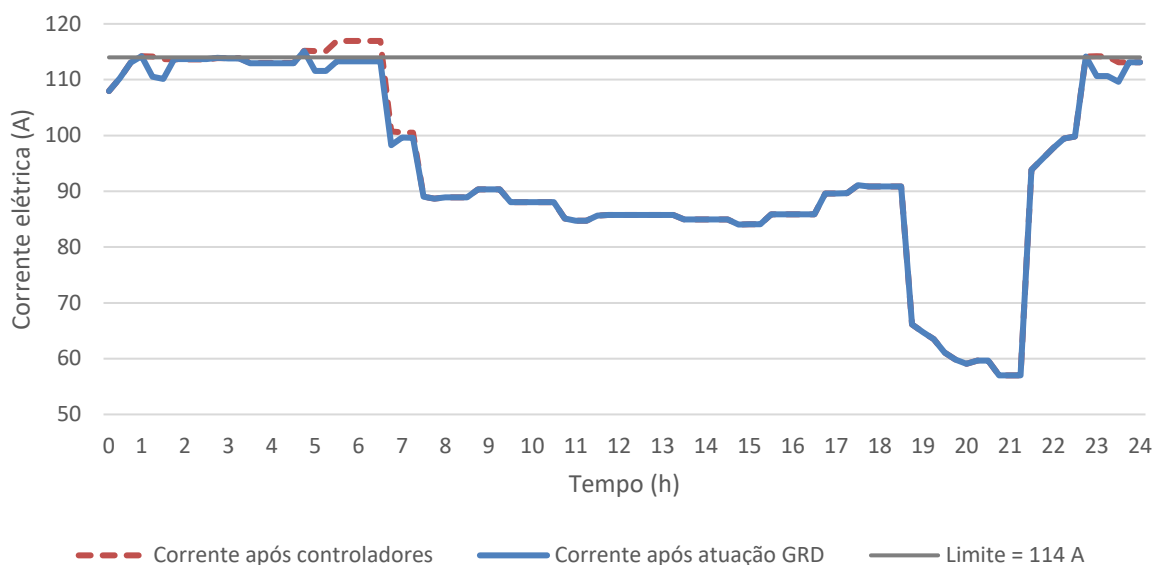
4.6.2.1 Transgressões em alimentador com grande parcela de demanda controlável

O alimentador 1 (AL-1) possui cerca de 65,53% de sua demanda total concentrada nas três UCs elegidas como participantes do programa de resposta da demanda, e, portanto, controladas pela estrutura de resposta da demanda.

Para realizar o teste de funcionamento do GRD proposto, foi considerada como corrente máxima do alimentador o valor de 114 A. Este valor foi considerado, pois a parametrização da proteção deste alimentador não é conhecida, assim como sabe-se que a corrente do AL-1 excede este patamar, então será viável observar atuações do gerenciador.

O algoritmo do GRD foi executado, considerando a curva de carga diária do AL-1 apresentada na Figura 4.3, já com a ação dos controladores de irrigação. Nesta curva, a carga apresenta momentos em que ultrapassa os 114 A. O objetivo deste teste de funcionamento é verificar se o GRD reconhece a sobrecarga e se sua atuação corrige as transgressões. A Figura 4.16 apresenta um comparativo entre a curva de corrente diária resultante da atuação do GRD e curva de corrente inicial do AL-1, ambas considerando a fase mais carregada (fase 3), com pontos em intervalos a cada 15 minutos.

Figura 4.16 – Atuação do GRD para corrigir baixa sobrecarga no AL-1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

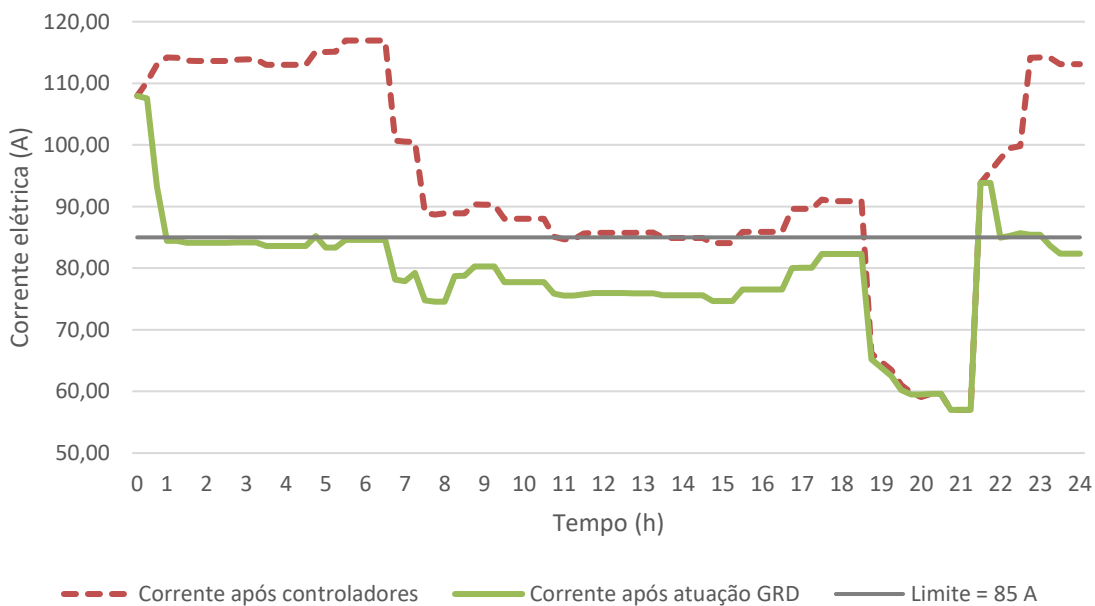
A curva vermelha tracejada, que representa a corrente antes da atuação do GRD, e a curva verde contínua, que representa a corrente resultante da atuação do GRD, são sobrepostas ao longo de boa parte do dia, exceto três momentos em que ocorreram as transgressões da corrente do alimentador. Nestes momentos, a UC1-1 foi atuada com o “Atenuar 1”, tendo sua demanda reduzida com um fator de multiplicação de 0,60. Esta atuação do GRD, nas três ocorrências, foi suficiente para a correção da transgressão identificada. As ocorrências em ordem cronológicas, ocorridas nesta operação, são listadas na sequência, enquanto o relatório diário de operação do GRD é apresentado no Apêndice G.

- 1h00: identificada a sobrecarga do alimentador 1 ($I = 114,20$ A); reduzida a demanda da UC1-1 para 60% da atual ($I = 110,53$ A);
- 1h30: condição para normalizar UC1-1 satisfeita ($I = 110,13$ A); demanda da UC1-1 normalizada ($I = 113,68$ A);
- 4h45: identificada a sobrecarga do alimentador 1 ($I = 115,16$ A); reduzida a demanda da UC1-1 para 60% da atual ($I = 111,57$ A);
- 6h45: condição para normalizar UC1-1 satisfeita ($I = 98,26$ A); demanda da UC1-1 normalizada ($I = 100,7$ A);

- 22h45: identificada a sobrecarga do alimentador 1 ($I = 114,13 \text{ A}$); reduzida a demanda da UC1-1 para 60% da atual ($I = 110,66 \text{ A}$);
- 23h30: condição para normalizar UC1-1 satisfeita ($I = 109,63 \text{ A}$); demanda da UC1-1 normalizada ($I = 113,09 \text{ A}$);

Como mencionado anteriormente, este alimentador possui uma grande participação da demanda controlável em relação à demanda total. Desta forma, foi realizado uma simulação de elevada sobrecarga no alimentador, alterando a corrente máxima permitida para 85 A. O objetivo dessa simulação é verificar o comportamento do GRD frente à grandes transgressões. A Figura 4.17 apresenta os perfis de corrente diários, antes e após a atuação do gerenciador, de forma comparativa.

Figura 4.17 – Atuação do GRD para corrigir elevada sobrecarga no AL-1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 4.17 demonstra que o gerenciador de resposta da demanda, associado a uma boa parcela da demanda sob sua operação, pode corrigir elevadas transgressões de sobrecarga nos alimentadores. A curva verde contínua demonstra a curva de corrente ao longo do dia sob atuação do GRD. Neste cenário, o número de atuações do gerenciador muito maior em comparação com a baixa sobrecarga simulada anteriormente. O Apêndice H apresenta o relatório diário de operação do

gerenciador nesta condição. A lista abaixo apresenta as identificações de transgressões e atuações realizadas pelo GRD:

- 0h15: identificada a sobrecarga do alimentador 1 ($I = 107,97 \text{ A}$); reduzida a demanda da UC1-1 para 60% da atual ($I = 107,55 \text{ A}$);
- 0h30: reduzida a demanda da UC2-1 para 60% da atual ($I = 93,19 \text{ A}$);
- 0h45: reduzida a demanda da UC3-1 para 60% da atual ($I = 84,42 \text{ A}$); transgressão normalizada sob atuação do gerenciador;
- 4h45: identificada a sobrecarga do alimentador 1 ($I = 85,23 \text{ A}$); reduzida a demanda da UC1-1 para 33% da atual ($I = 83,35 \text{ A}$);
- 7h00: condição para retornar UC1-1 para 60% satisfeita ($I = 77,91 \text{ A}$); elevada a demanda da UC1-1 para 60% da atual ($I = 79,25 \text{ A}$);
- 8h00: condição para normalizar UC3-1 satisfeita ($I = 74,55 \text{ A}$); demanda da UC3-1 normalizada ($I = 78,75 \text{ A}$);
- 19h30: condição para normalizar UC1-1 satisfeita ($I = 60,22 \text{ A}$); demanda da UC1-1 normalizada ($I = 61,07 \text{ A}$);
- 20h00: condição para normalizar UC2-1 satisfeita ($I = 59,49 \text{ A}$); demanda da UC1-1 normalizada ($I = 59,63 \text{ A}$);
- 21h30: identificada a sobrecarga do alimentador 1 ($I = 93,83 \text{ A}$); reduzida a demanda da UC1-1 para 60% da atual;
- 21h45: reduzida a demanda da UC2-1 para 60% da atual ($I = 84,95 \text{ A}$);
- 22h30: identificada a sobrecarga do alimentador 1 ($I = 85,66 \text{ A}$); reduzida a demanda da UC3-1 para 60% da atual ($I = 84,95 \text{ A}$);
- 23h00: identificada a sobrecarga do alimentador 1 ($I = 85,41 \text{ A}$); reduzida a demanda da UC1-1 para 33% da atual ($I = 83,64 \text{ A}$);

Chama-se a atenção para alguns pontos que diferenciam este cenário do anterior. O primeiro deles é que, devido ao baixo valor ajustado como limite para identificação de transgressão de sobrecorrente, o GRD necessita fazer diversas atuações ao longo do dia. Em meio às atuações, o gerenciador pode tanto avançar e reduzir mais demanda, em caso de necessidade, quanto retornar com carga, caso seja possível. Isto fica evidenciado na oscilação de elevação da corrente do alimentador às 4h45, onde verificou-se a atuação foi no sentido de reduzir mais carga, e às 7h00, onde houve uma redução da corrente do alimentador, que possibilitou o gerenciador realizar o retorno de parte da demanda cortada.

Observou-se neste cenário de atuação que as cargas UC1-1 e UC2-1 permaneceram durante a maior parte do dia atuadas no patamar em que reduzem sua demanda em cerca de 40%, retornando apenas na janela do horário de ponta, onde a corrente do alimentador cai drasticamente. Em um cenário como este, haverá um déficit de irrigação nas lavouras associadas às UCs. É importante que dias como este não ocorram com muita frequência, sob pena de perda de produção do arroz das lavouras afetadas, ou desistência do programa de gerenciamento pelo lado da demanda por parte dos consumidores irrigantes. Caso ocorra cenários como esse com frequência, devem ser previstas obras de reforços no alimentador.

O cenário simulado não tem a pretensão de refletir a realidade do AL-1, pois acredita-se inclusive que a corrente limite neste alimentador seja bastante superior a 85 A. Entretanto, a simulação realizada serviu para observações do funcionamento do gerenciador de resposta da demanda e verificação de conformidade com a heurística proposta em 3.5.2. Neste contexto, pode-se evidenciar o funcionamento adequado da atuação do GRD para situações de sobrecargas do alimentador, tanto de baixa quanto de alta intensidades.

4.6.2.2 Transgressão em alimentador com baixa parcela de demanda controlável

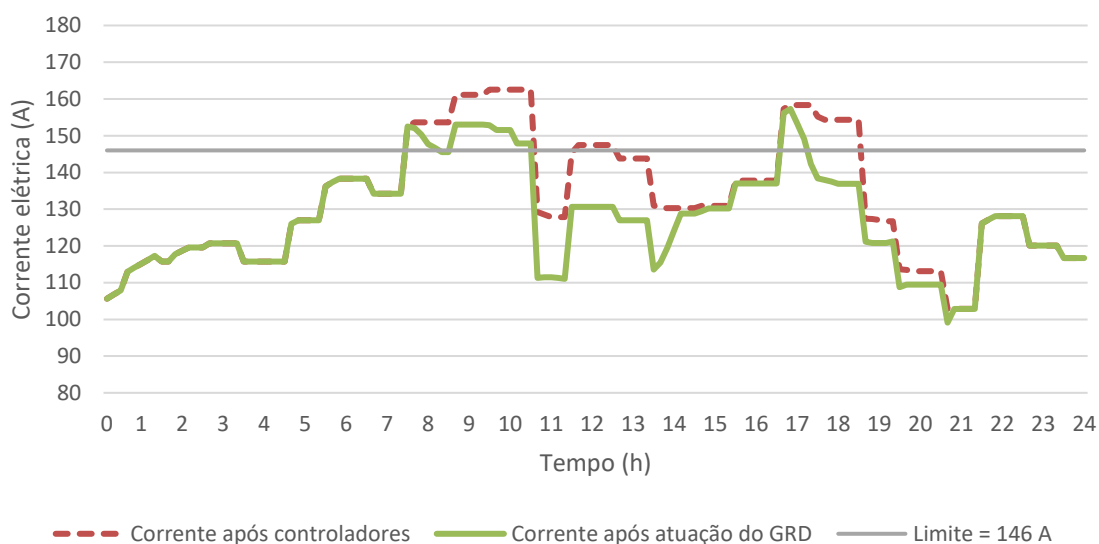
A parcela de demanda participante do programa de resposta da demanda nem sempre será tão elevada quanto o que é observado no AL-1. No Alimentador 3 (AL-3), por exemplo, verifica-se apenas 24,11% da demanda, em relação à total do alimentador, sob atuação do GRD.

O objetivo das simulações neste contexto é de observar o comportamento do GRD na atuação para reduzir sobrecargas no alimentador, em situações em que a demanda controlável é mais reduzida. Para realizar o teste proposto, foi considerada uma corrente máxima do alimentador de 146 A. Tendo em vista que o alimentador registra, sem controle do GRD, correntes de linha de até 162 A, haverá no alimentador, neste cenário, uma sobrecarga próxima a 10%. Reforça-se que o valor escolhido como limite não tem a pretensão de refletir a realidade das parametrizações das proteções do alimentador, mas de possibilitar o teste de sobrecorrente proposto, neste alimentador.

A Figura 4.18 apresenta um comparativo entre a curva de corrente diária resultante da atuação do GRD e curva de corrente inicial do AL-3, ambas

considerando a fase mais carregada (fase 1), com pontos em intervalos a cada 5 minutos.

Figura 4.18 – Atuação do GRD para corrigir baixa sobrecarga no AL-3



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O AL-3 caracteriza-se por grandes variações de carga, ao longo do dia, o que pode ser visualizado na linha vermelha tracejada, onde é apresentada a corrente antes das atuações do GRD. Em termos de identificação das sobrecargas, verifica-se que o gerenciador apresenta um funcionamento correto, identificando e atuando no sentido de resolvê-las. A linha verde contínua demonstra a curva de carga a partir da atuação do gerenciador.

Em termos de sobrecarga, é possível observar que o GRD não conseguiu resolver todos os pontos de ocorrências, mesmo atuando sobre as cargas até seu desligamento. Isto demonstra que, em situações com baixa aderência de UCs irrigantes à proposta de programas de resposta da demanda, o gerenciador terá mais dificuldades em tratar das transgressões, visto que terá ação sobre parcela inferior da carga. Mesmo com a limitação de carga sob atuação, com os esforços realizados, obteve-se uma redução dos níveis de sobrecarga, bem como no tempo em que o alimentador ficou em sobrecarga, que reduziu de 6 horas e 10 minutos, somadas ao longo do dia, para 3 horas e 30 minutos. Percebe-se que, nesta condição, o GRD possui capacidade de solucionar completamente sobrecargas de

até 9,0%, uma vez que a corrente máxima visualizada na Figura 4.18, após as atuações do gerenciador é de 148 A, por volta das 10h.

O relatório de eventos, transgressões e atuações do GRD, para este cenário, é apresentado no Apêndice I. A primeira sobrecarga foi identificada às 7h30. Às 8h20 a transgressão estava resolvida, com 5 atuações do GRD. Às 8h40, o gerenciador identifica uma nova sobrecarga e atua desligando todas as cargas, porém sem conseguir resolver completamente a sobrecarga. Entre 8h40 e 10h30, o alimentador permanece em sobrecarga, não havendo outras opções de ação disponíveis ao GRD. A partir das 10h40, devido a uma variação de carga do alimentador, a sobrecarga é sanada. Um novo aumento de carga no alimentador ocorre e uma sobrecarga volta a ser identificada às 16h50, sendo resolvida pelo GRD até às 17h20. Após isto, a demanda do alimentador reduz no intervalo do horário de ponta, onde gradualmente as cargas são recolocadas, finalizando o dia sem reduções de demanda.

A ação do GRD sobre as UCs, embora seja benéfica para o sistema de distribuição, acarreta redução da reposição de água das lavouras das UCs. No cenário simulado, os sistemas de irrigação ficariam desligados por cerca de 10 horas, durante o dia. Este déficit implica em uma compensação no horário noturno, uma vez que estima-se que a variável *Delta Nível* terá reduzido, provocando o aumento da velocidade dos conjuntos de irrigação. Para o perfil de carga do AL-3, que possui carregamento mais elevado durante a parte do dia e “vales” na curva de carga durante a noite, este tipo de situação é plausível. Ela agrega os benefícios do gerenciamento pelo lado da demanda, de reduzir o carregamento no momento de maior necessidade do sistema, e deslocar essa carga para os horários em que ocorrem os “vales”, com os benefícios tarifários aos clientes irrigantes, que realizarão sua reposição de água majoritariamente no momento de energia com custo reduzido.

Com os cenários simulados de situações de sobrecarga nos alimentadores, apresentados neste tópico, foi possível verificar tanto o correto funcionamento do gerenciador de resposta da demanda em diferentes situações, como verificar os impactos das atuações do GRD para o sistema elétrico. Na sequência serão apresentados cenários de atuação do gerenciador para os casos de ocorrências de subtensão.

4.6.3 Atuação em caso de transgressão do limite inferior de tensão

A transgressão do limite inferior de tensão adequada, ou subtensão, é identificada comparando a tensão de cada barra da rede de distribuição com o limite de tensão adequada para o nível de tensão da distribuição (23,1 kV), definido pelo PRODIST como 0,93 p.u.. Para isto, o GRD realiza uma varredura das barras de média tensão do sistema de distribuição, e verifica se alguma está abaixo deste valor. Caso alguma subtensão seja identificada, o gerenciador atua reduzindo as demandas das UCs elegíveis, de acordo com a heurística proposta em 3.3.3. As atuações são realizadas, através da variável *Resposta da Demanda* dos controladores de irrigação destas UCs.

Para a demonstração de funcionamento desta atuação do GRD serão realizadas as simulações para as situações dos alimentadores 2 e 4, que apresentaram subtensão em diversos pontos da rede, conforme apresentado no tópico 4.5. O AL-2 possui níveis de subtensão mais amenos, registrando 0,890 p.u. como menor tensão, além de possuir um percentual de 36,34% da demanda total controlável pelo gerenciador. O AL-4, por sua vez, apresenta níveis mais críticos de transgressão de tensão, registrando valores de até 0,864 p.u., e possuindo a menor participação relativa dos alimentadores analisados, com 24,06% da demanda total controlável pelo GRD.

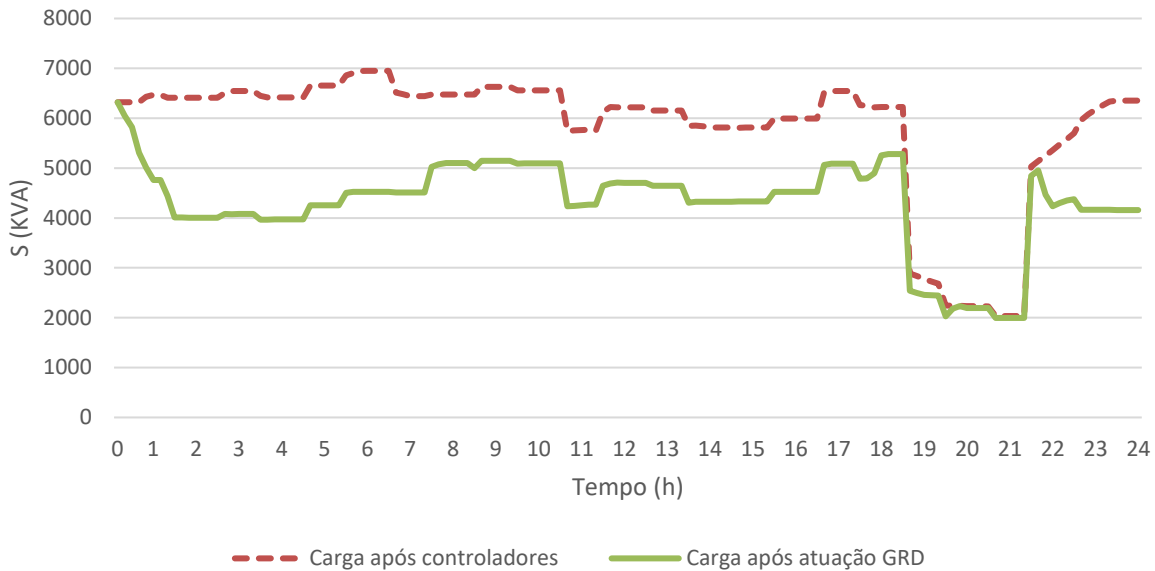
4.6.3.1 Atuação no cenário de transgressão de tensão do AL-2

Para realizar o teste de funcionamento da atuação do GRD para correção de subtensões no AL-2, o algoritmo do GRD foi executado, considerando a curva de carga diária do AL-2 apresentada na Figura 4.5, já com a ação dos controladores de irrigação. Com esta curva de carga, nos momentos de maior carregamento, a tensão ao longo da rede fica abaixo de 0,93 p.u.. O objetivo deste teste de funcionamento é verificar se o GRD reconhece as subtensões e se sua atuação corrige as transgressões.

Inicialmente, foi simulada a atuação do GRD sobre o carregamento do AL-2, verificando-se todas as suas atuações. O relatório diário de eventos, transgressões e atuações do GRD, neste cenário, é apresentado no Apêndice J. A Figura 4.19 apresenta o perfil de carga diário, que demonstra, de forma condensada, a atuação

do gerenciador sobre o carregamento do AL-2. Foram considerados intervalos de 10 minutos a cada medida.

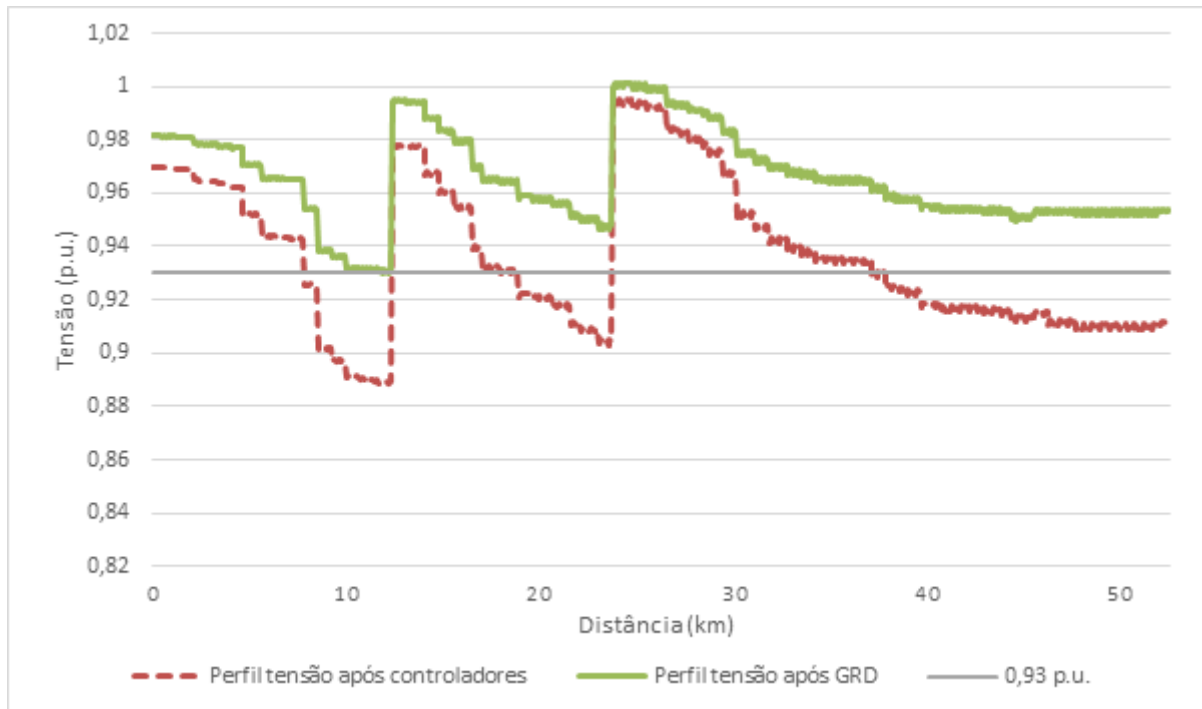
Figura 4.19 – Perfil de carga do AL-2 na atuação de subtensão do GRD



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Observa-se que o GRD já inicia o dia identificando subtensões, e, portanto, atuando sobre a demanda das UCs elegíveis. A demanda sob atuação do GRD, representada pela linha verde contínua, mantém-se reduzida ao longo de todo o dia, apenas normalizando durante o intervalo do horário de ponta. Durante alguns momentos do dia, inclusive, o gerenciador identifica subtensões, porém não possui ações disponíveis, de forma que estas transgressões se mantêm. Estes eventos podem ser verificados no Apêndice J, entre as 7h30 e às 17h20, onde neste intervalo as tensões transpassam o limite de subtensão e normalizam durante algumas vezes. No horário em que havia o maior carregamento inicial do sistema, e eram registrados os menores valores de tensão, às 6h, é visível que o carregamento foi fortemente reduzido. Neste instante realiza-se a comparação dos perfis de tensão ao longo do alimentador, o que é apresentado pela Figura 4.20.

Figura 4.20 – Perfil de tensão no antigo horário de maior carregamento (6h) – AL-2

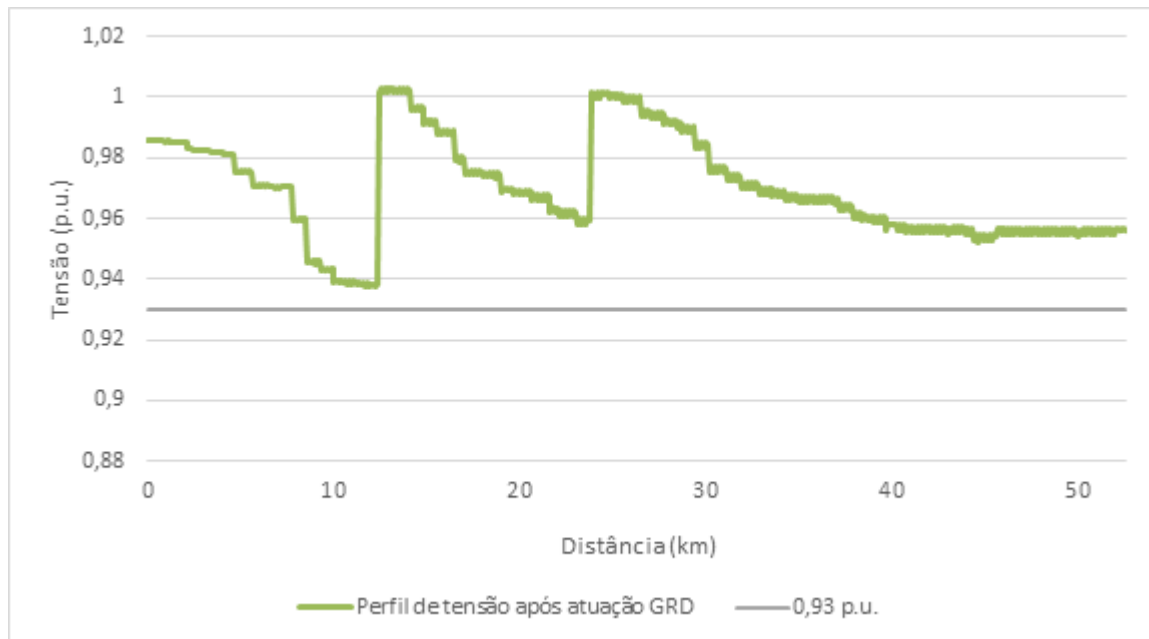


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

No horário em que ocorria o maior carregamento do sistema, às 6h, os níveis de tensão em alguns pontos da rede chegavam a 0,890 p.u., como pode ser observado na curva em vermelho tracejado. Com as atuações do GRD, o novo perfil de tensão é corrigido, permanecendo acima do limite inferior de tensão adequada durante todos os pontos do AL-2. O ponto de menor tensão registrado após a atuação do gerenciador é 0,930 p.u., exatamente sobre o limite de tensão adequada.

Após as atuações do GRD, o horário de maior carregamento do AL-2 é deslocado para as 18h, momento antecedente ao início do horário de ponta. A Figura 4.21 apresenta o perfil de tensão do AL-2 neste horário.

Figura 4.21 – Perfil de tensão no novo horário de maior carregamento (18h) – AL-2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

No novo horário de maior carregamento do AL-2, a tensão mínima registrada é de 0,937 p.u., com toda extensão da rede de distribuição dentro dos limites de tensão adequada do PRODIST. Neste instante, as cargas elegíveis estão atuadas, com a UC1-2 e a UC3-2 desligadas e a UC2-2 com 33% de sua carga. Apesar deste instante ser o de maior carregamento do alimentador, o perfil de tensão deste momento demonstra melhores níveis de tensão em relação ao perfil das 6h. Como as UCs do alimentador variam suas demandas ao longo do dia, tudo leva a crer que às 6h havia UCs com carregamento maior em pontos mais afastados da subestação, elevando a queda de tensão ao longo da rede; às 18h, mesmo com um carregamento maior, mas com o centro de carga localizado mais próximo à subestação, pode ocorrer uma queda de tensão menor ao longo dos condutores e o perfil de tensão apresentar-se melhor.

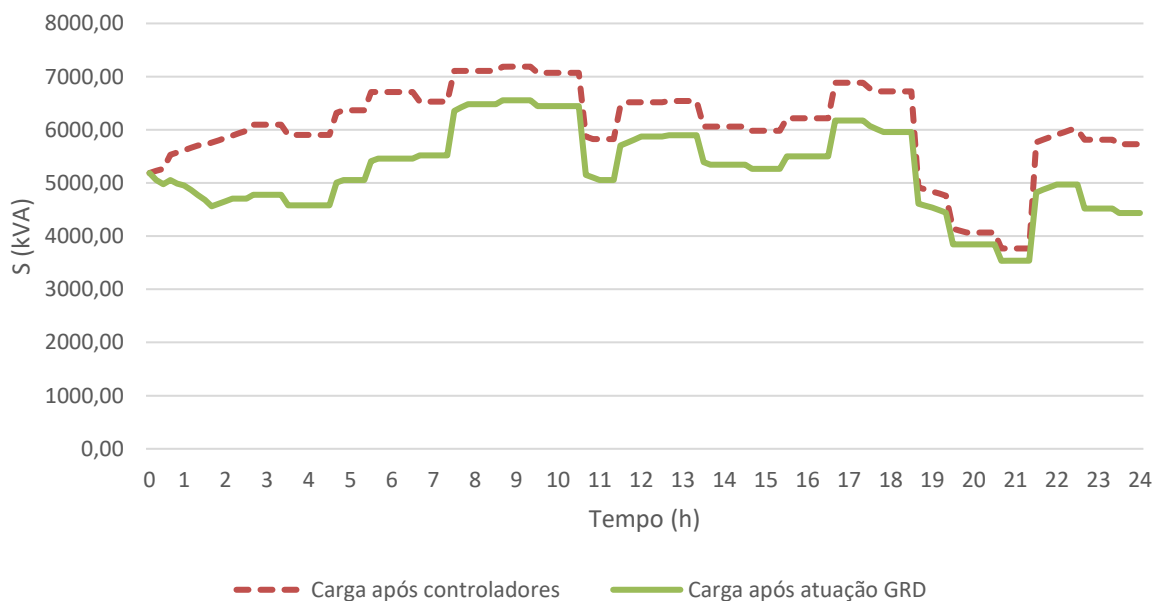
De maneira geral, fica evidenciado o funcionamento coerente do gerenciador de resposta da demanda em atuar sobre ocorrências de subtensão do Alimentador 2. Observou-se que o GRD sanou a subtensão pré-existente no horário de maior carregamento do alimentador. Também é verificado que não há transgressões dos limites de tensão adequada no alimentador no novo horário de maior demanda de

AL-2. Em uma avaliação sobre as decisões do GRD, percebe-se que há pontos de melhoria no sentido do retorno das cargas, tendo sido observado que ocorreu um retorno para patamar de 100% de uma carga antes das demais estarem no patamar de 60% de demanda. Esta ocorrência, bem como outras avaliações técnicas do GRD, será melhor explorado no tópico 4.7.

4.6.3.2 Atuação no cenário de transgressão de tensão do AL-4

Para realizar o teste de funcionamento da atuação do GRD para correção de subtensões no AL-4, o algoritmo do GRD foi executado, considerando a curva de carga diária do AL-4 apresentada na Figura 4.13, já com a ação dos controladores de irrigação. Nos momentos de maior carregamento, a tensão ao longo da rede apresentava momentos de transgressão do limite de tensão adequada, chegando a patamares de até 0,890 p.u.. A finalidade deste teste é verificar o funcionamento do GRD em termos de reconhecimento e correção das subtensões. Para tanto, foi realizado o mesmo roteiro de testes do AL-2, apresentado no tópico 4.6.3.1. O perfil de carga com a atuação do GRD é apresentado na Figura 4.22. O relatório de operação do GRD é apresentado no Apêndice K.

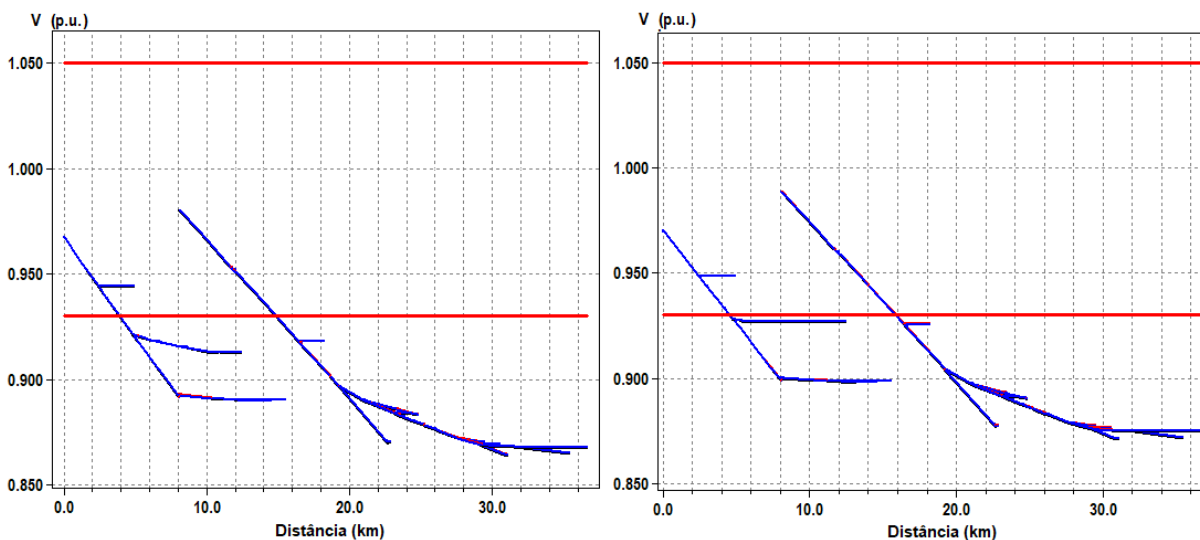
Figura 4.22 – Perfil de carga do AL-4 na atuação de subtensão do GRD



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Ao analisar conjuntamente a curva de carga da Figura 4.22 e o relatório de operação diário do gerenciador, fica evidente que o gerenciador manteve as três UCs com demanda igual a zero durante todo o dia, de forma a realizar a atuação sobre as ocorrências de subtensão. O perfil de carga do AL-4 não altera seu comportamento, a não ser pela redução da demanda, o ponto de maior carregamento do alimentador continua a ser, inclusive, o das 9h. Na Figura 4.23 é analisado o perfil de tensão do alimentador no horário de maior carregamento, antes e após a atuação do GRD.

Figura 4.23 – Perfil de tensão no horário de maior carregamento (9h) – AL-4



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A Figura 4.23 foi gerada diretamente em simulações com o OpenDSS, no horário de maior carregamento do AL-4 antes e após os efeitos do GRD, devido a limitações de gerar esses gráficos, com muitas ramificações, via relatórios gerados pelo GRD. As cargas controladas foram desligadas manualmente no modelo da rede do alimentador.

No horário de maior carregamento do sistema, às 9h, os níveis de tensão em alguns pontos da rede chegavam a 0,864 p.u., como pode ser observado no perfil de tensão da esquerda. Com as atuações do GRD, o perfil de tensão é levemente alterado, permanecendo nos patamares de tensão precária e crítica, durante boa parte da rede, atingindo no patamar mínimo 0,871, uma leve melhora.

De acordo com o observado no AL-4, conclui-se que o gerenciador de resposta da demanda possui capacidade de atuação limitada neste contexto. Nas primeiras interações do sistema, o GRD cortou todas as cargas disponíveis e não pôde mais retorná-las à rede. Mesmo este esforço não foi suficiente para a normalização da tensão ao longo da rede, como verificado na Figura 4.23. A condição de simulação do Alimentador 4 previa grande quantidade de carga irrigante ligada concomitantemente, o que levou a grandes níveis de transgressões de tensão, assim como baixa demanda sob possibilidade de atuação do GRD. Nestas condições mais severas de subtensão e baixa demanda controlável, a atuação do GRD não representará, por si só, uma solução aos problemas da rede.

4.7 IMPACTOS DO GERENCIAMENTO DE RESPOSTA DA DEMANDA EM REDES ELÉTRICAS RURAIS: DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este trabalho propôs e aplicou uma estrutura de resposta da demanda em redes elétricas rurais com forte presença de consumidores irrigantes da cultura orizícola. Ao longo deste capítulo foi demonstrado o comportamento de alguns cenários destas redes elétricas rurais em momentos em que consumidores irrigantes mais demandam energia elétrica do sistema, ou seja, em situações de dias secos.

Inicialmente, foram considerados os modelos das redes elétricas rurais e identificadas quais as unidades consumidoras cadastradas como irrigantes junto à concessionária, bem como qual seu histórico de demanda lida na última safra em que dados estavam disponíveis. Foram, então, consideradas estas demandas para cada uma das UCs, de forma a simular quais as condições elétricas dos alimentadores em uma situação crítica, de alta necessidade de irrigação das lavouras de arroz.

A partir dos dados observados nas simulações, identificou-se quais as transgressões elétricas presentes em cada um dos alimentadores. Os alimentadores AL-2, AL-3, AL-4 e AL-5 apresentaram transgressões dos limites de tensão adequada. O alimentador AL-2 apresentou elevados níveis de perdas técnicas. Os alimentadores AL-2, AL-4 e AL-5 apresentaram elevados níveis de carregamento. Se somadas as cargas dos alimentadores AL-1, AL-2, AL-3 e AL-4, que estão conectados ao mesmo transformador de subestação, a demanda ultrapassaria a potência nominal do transformador em alguns períodos do dia.

As informações coletadas vão de encontro com os dados coletados junto à concessionária de distribuição responsável pela subestação utilizada no estudo. Segundo dados internos da concessionária, a subestação atingia níveis de sobrecarga em diversos dias durante o período da safra do arroz, chegando a computar entre 24 e 31 dias de sobrecarga por mês, no período, com patamares de sobrecarga de 118% da potência nominal do transformador (em torno de 29,5 MVA), muitas das ocorrências em horários noturnos.

Após este levantamento inicial, realizou-se a aplicação dos efeitos da estrutura de resposta da demanda proposta sobre três UCs escolhidas em cada alimentador. Em um primeiro momento, aplicou-se os efeitos do controlador de irrigação sobre as UCs selecionadas, e analisou-se o comportamento dos parâmetros elétricos dos alimentadores em comparação com a situação inicial. Na sequência, simulou-se o funcionamento do gerenciador de resposta da demanda operando sobre estes controladores para a correção de transgressões operativas identificadas ao longo do dia.

Nas simulações realizadas com o controlador de irrigação atuando sobre as três UCs elegidas em cada alimentador, percebeu-se melhorias dos parâmetros elétricos nas redes elétricas rurais, devido ao menor carregamento. O controlador de irrigação opera de forma a manter a irrigação das lavouras ligada de forma constante, variando a velocidade de rotação do conjunto motor e bomba de acordo com a necessidade de reposição, baseada em dados da lavoura e dados meteorológicos, e de acordo com a oportunidade de reposição em horários de energia elétrica mais barata. Na prática, a maioria dos controles de irrigação de lavoura de arroz atuais ainda são manuais, modo liga-desliga, com operação em velocidade nominal. O ganho do controlador de irrigação proposto, sobre o controle manual e outros controles eletrônicos convencionais, vem da avaliação da real necessidade de irrigação no cenário da lavoura, sem ocorrência de eventuais transbordos e desperdícios, bem como da previsão meteorológica de curto prazo, de forma a antecipar uma eventual reposição natural que esteja para ocorrer.

Pelo que foi observado durante as simulações, a própria aplicação dos controladores de irrigação exerce o papel de retirar parte da demanda dos horários de pico do sistema de distribuição, transferindo-a para momentos de menor carregamento. Isto ocorre, pois os momentos de maior demanda dos alimentadores observados ocorrem durante o dia e a ação da variável *Tarifa Horária* é no sentido

de reduzir a demanda de irrigação nestes intervalos do dia, incrementando nos horários noturnos. Não se pode, contudo, afirmar que o controlador de irrigação por si só exerceria de forma completa um programa de gerenciamento pelo lado da demanda, pois as transgressões elétricas não seriam sanadas em sua totalidade, principalmente nos horários noturnos.

No contexto das redes elétricas rurais com a presença de parte das unidades consumidoras com controladores de irrigação, foi adicionado o gerenciador de resposta da demanda (GRD). Verificou-se que, apesar da atuação dos controladores de irrigação terem trazido efeitos benéficos para a rede, algumas transgressões de tensão mantinham-se. O funcionamento do GRD foi exemplificado em cada uma de suas heurísticas-bases: atuação em caso de sobrecarga do transformador da subestação, atuação em caso de sobrecarga do alimentador e atuação em caso de transgressão do limite de tensão adequada (subtensão).

Durante os testes de funcionamento da estrutura de resposta da demanda, verificou-se a completa correção das transgressões de tensão do AL-2. Este alimentador possuía níveis de tensão de até 0,875 p.u., inicialmente. Após a atuação da estrutura de resposta da demanda (controlador + gerenciador), o nível mais baixo de tensão do alimentador permaneceu em 0,930 p.u.. Para o cenário apresentado no AL-4, contudo, a estrutura de resposta da demanda melhorou os níveis de tensão, mas não conseguiu sanar totalmente as transgressões, alterando a menor tensão da rede, no horário de maior carregamento, de 0,856 para 0,871 p.u. As diferenças principais entre estes dois alimentadores, que ajudam a justificar os diferentes impactos da atuação da estrutura de resposta da demanda nos dois cenários são: a maior representatividade da carga sob atuação da estrutura de resposta da demanda no AL-2, a localização das UCs atuadas no AL-2 serem mais distantes da subestação que as do AL-4, a localização de grandes cargas do AL-4 (que não foram alterados) em pontos mais afastados da subestação.

Cabe ressaltar que, em relação às transgressões de tensão, foram consideradas, para efeito das simulações, todas as barras de média tensão disponíveis no modelo de cada rede, não sendo consideradas as configurações de tapes dos transformadores de distribuição e de clientes, ou outros elementos que poderiam corrigir ou amenizar os baixos patamares de tensão. Em uma condição real de atuação do GRD estima-se que ocorram cenários melhores de perfis de tensão do que os apresentados neste capítulo.

Os resultados dos testes de atuação do GRD em caso de sobrecarga do transformador da subestação mostraram uma atuação efetiva. Foi simulado um cenário com sobrecarga de 5% no AL-5, que é o único alimentador do TR-2 da subestação. Este cenário evidenciou a correta identificação da transgressão e atuação do gerenciador sobre as cargas de forma a corrigir a demanda para patamares dentro da condição nominal definida para o transformador.

Igualmente, nos cenários testados de sobrecarga no alimentador de distribuição, verificou-se que, no AL-1, com alta representatividade da carga sob atuação do gerenciador em relação à carga total do alimentador, o GRD conseguiu identificar e sanar sobrecargas de até 35%. Enquanto no AL-3, com baixa carga sob controle do GRD, sobrecargas próximas a 10% foram parcialmente sanadas.

Em geral, a implementação do gerenciador de resposta da demanda operou de acordo com as heurísticas propostas no tópico 3.3. Verificou-se que, em poucos momentos, ocorre de o gerenciador realizar retornos de carga maiores do que o estipulado na heurística. As funções de retorno aos níveis de atuação anteriores, especificados em 3.3.1, são executadas pelo algoritmo de forma consecutiva, mas por limitação das simulações, onde utiliza-se intervalos de 5 minutos a cada interação do gerenciador com o modelo da rede, pode ocorrer de haverem mudanças nos parâmetros elétricos que sejam significativas o suficiente para, no momento do teste, o retorno da demanda de uma UC ao nível de atuação 2, por exemplo, não ter tido a condição de retorno satisfeita, mas no momento em que testa-se o retorno ao nível de atuação 1 da mesma UC, como já se passaram alguns ciclos de simulação, e alguns minutos na curva de carga, a condição de retorno deste nível é satisfeita. Esta ocorrência será trabalhada em uma nova versão do gerenciador.

Para o gerenciador de resposta da demanda proposto, foram apresentadas evidências de que possui capacidade de identificação das transgressões e método organizado de atuação para solucioná-las. Contudo, trata-se de uma primeira proposta, que poderá ser melhorada, em trabalhos futuros, como por exemplo, com incrementos de conceitos de aprendizado de máquina, e outros métodos de inteligência artificial que possibilitem o cálculo de um fluxo de potência ótimo do sistema de distribuição, com a mínima atuação sobre as demandas, e que solucione as transgressões. O algoritmo proposto, por vezes, realizou cortes de carga além do necessário, como observado nas figuras 4.17 e 4.18. Isto ocorre pela própria

concepção do GRD, que foi desenhado para reduzir a demanda das UCs em três níveis apenas (*Atenuar 1, Atenuar 2 e Desligar Carga*).

De toda forma, a estrutura de resposta da demanda apresentada trata-se de uma proposta de solução ao problema levantado no início desta tese. A partir desta proposta inicial e inédita, foi possível observar que uma estrutura de resposta da demanda pode trazer benefícios em termos de qualidade de energia elétrica às redes de distribuição rurais com concentração de consumidores irrigantes. Além de corrigir possíveis transgressões operativas de sobrecarga de equipamentos e de limites de tensão adequada, a estrutura de resposta da demanda proposta, de forma indireta, também é capaz de proporcionar diversos benefícios à concessionária de distribuição, como, por exemplo:

- Reduzir o carregamento da rede de distribuição rural em seu horário de maior carregamento, o que, principalmente, reduz o custo unitário da energia nestes intervalos e possibilita a concessionária postergar investimentos em obras de reforços destas redes;
- Reduzir as perdas técnicas ao longo dos alimentadores, assim como os custos associados, a partir das alterações provocadas na curva de carga do sistema de distribuição, deixando-a mais plana;
- Elevar a confiabilidade de operação das redes rurais, bem como reduzir a taxa de falhas dos equipamentos e elevar a vida útil dos equipamentos, a partir da operação dos equipamentos do sistema de distribuição dentro dos parâmetros nominais e seguros;
- Reduzir as interrupções não programadas, bem como o pagamento de compensações financeiras associadas aos indicadores de continuidade, pela menor expectativa de falhas dos equipamentos da rede rural;
- Reduzir custos indiretos de operação da concessionária de distribuição, a partir do menor pagamento de compensações financeiras aos clientes, associado à redução da quantidade de transgressões dos limites operativos da rede;
- Reduzir a quantidade de perdas não técnicas encontradas nestes sistemas de distribuição rurais, a partir de um estreitamento de relacionamento com os consumidores irrigantes.

O produtor rural que participar do programa rural de gerenciamento pelo lado da demanda, contará com uma série de benefícios, entre os quais destaca-se:

- Recebimento de incentivos/benefícios financeiros, pela participação no programa de resposta da demanda;
- Redução dos custos com a energia elétrica para irrigação, devido à uma operação otimizada gerada pelo controlador de irrigação e ao deslocamento da irrigação majoritária para os horários de tarifa incentivada;
- Redução de custos com manutenção e troca de equipamentos de irrigação, devido à uma operação mais continuada e suavizada dos equipamentos, sem a presença de partidas diretas.

Também, como benefícios indiretos da aplicação da estrutura de resposta da demanda destaca-se a possível redução do consumo de água, contribuindo para a oferta deste recurso no período do verão.

5 CONCLUSÕES

Esta tese abordou o tema de qualidade de energia elétrica em redes de distribuição rurais e propôs-se a verificar se uma estrutura de resposta da demanda seria capaz de incrementar a qualidade do fornecimento de energia elétrica em redes de distribuição rurais com a presença de consumidores irrigantes, mais especificamente da cultura do arroz irrigado.

Como forma de possibilitar a investigação almejada, a metodologia apresentada propôs uma estrutura de resposta da demanda composta por um controlador de irrigação e um gerenciador de demanda. O primeiro é capaz de decidir sobre a necessidade de irrigação complementar de uma lavoura de arroz baseado em características da lavoura, na previsão meteorológica e na tarifa horária vigente. Já o segundo cumpre a função de gerenciar os controladores de irrigação, emitindo comandos de resposta da demanda baseada em incentivos, de acordo com a conveniência operacional da empresa de distribuição.

As redes de distribuição rurais que atendem à consumidores irrigantes possuem diversas deficiências advindas da própria característica das cargas que atendem, bem como do ambiente em que se encontram, como baixa densidade de consumidores, perfil de carga sazonal, elevados níveis de perdas técnicas, níveis de subtensão em pontos mais afastados da rede, baixos níveis de manutenção e susceptibilidade a falhas.

Neste contexto, esta tese propôs-se a responder a hipótese de que a utilização de uma estrutura de resposta da demanda pode contribuir para a qualidade de energia e para o fornecimento dentro dos limites de operação dos equipamentos das redes rurais de distribuição de energia elétrica com concentração de produtores irrigantes. Diante das evidências constatadas nos testes realizados com a estrutura de resposta da demanda e com os componentes que a formam, é possível confirmar que sim, uma estrutura de resposta da demanda pode contribuir no sentido de qualidade de energia destas redes rurais.

O controlador de irrigação desenvolvido, utilizando a lógica *fuzzy*, considera características da lavoura, bem como variáveis de previsão meteorológica, tarifa horária vigente e comandos do gerenciador de resposta da demanda. A lógica nebulosa foi escolhida, principalmente, por possibilitar a tradução do conhecimento empírico, típico do tema, para um algoritmo de inteligência computacional. Além

disso, foram consideradas a possibilidade trabalhar de forma direta com variáveis de diversas grandezas e unidades, a existência de uma vasta documentação relacionada, bem como a possibilidade de realização de níveis consecutivos de inferência, o que permitiu uma consideração a um número maior de entradas, com um nível de complexidade relativamente baixo.

O gerenciador de resposta da demanda, desenvolvido em linguagem de programação Python, realiza o monitoramento dos parâmetros elétricos da rede e possibilita a interação com os controladores de irrigação sob seu comando, realizando modulações nas demandas de acordo com as transgressões identificadas. Foram desenhadas três heurísticas para atuações do gerenciador, prevendo algumas das ocorrências mais comuns encontradas neste tipo de rede de distribuição: sobrecarga do transformador da subestação, sobrecarga do alimentador (dos condutores) e subtensão.

Os ensaios e testes apresentados nesta tese foram realizados o mais próximo da realidade, utilizando-se dados de lavouras, de variáveis meteorológicas e de modelos de alimentadores de distribuição rurais de uma subestação que atende a uma das regiões de maior produção de arroz irrigado do Estado do Rio Grande do Sul. Os testes tiveram como objetivo evidenciar a coerência de funcionamento dos componentes desenvolvidos, e, principalmente, melhorias de qualidade de energia elétrica nos alimentadores rurais. Em um primeiro momento, os ensaios de funcionamento e de sensibilidade do controlador de irrigação demonstraram seu funcionamento de acordo com os princípios norteadores inicialmente traçados. Os testes de atuação do gerenciador de resposta da demanda demonstraram a operação de acordo com as heurísticas desenvolvidas para atuação em casos de identificação de transgressões dos limites operativos das variáveis monitoradas.

Em termos de benefícios do controlador de irrigação, destaca-se os ganhos de eficiência na irrigação propriamente dita. Estes ganhos ocorrem não apenas pela modulação da velocidade dos equipamentos de irrigação (redução cúbica da potência em relação à redução de velocidade), algo que outros controladores já fazem, mas pela avaliação da real necessidade de irrigação da lavoura de arroz, baseada nos parâmetros que impactam na necessidade de reposição complementar de água na lavoura. A consideração às variáveis meteorológicas ocorre como uma observação de reposições naturais futuras, ou necessidades futuras de irrigação, cujos efeitos serão distribuídos ao longo do dia anterior de operação, de forma a

manter a rotação do conjunto de irrigação tão baixa quanto possível, ampliando os ganhos de eficiência energética.

O gerenciador de resposta da demanda agrega o controle das demandas irrigantes com a finalidade de atenuar, ou até eliminar, as transgressões identificadas na rede de distribuição rural; afinal foi desenvolvido com este fim. Entretanto, age muito além disto, trazendo para as concessionárias de distribuição com atuação em áreas rurais os benefícios dos programas de resposta pelo lado da demanda já listados, entre estes a redução do carregamento máximo dos alimentadores, a redução das perdas técnicas, a melhoria do perfil de tensão ao longo da rede de forma geral, a redução de custos de operação da rede para a concessionária e a redução de custos de energia elétrica para o consumidor.

Embora não tenha sido dada ênfase neste documento, o gerenciador de resposta da demanda foi desenvolvido de forma que a concessionária de distribuição poderá integrar outros tipos de ocorrências identificadas como recorrentes nas suas redes de distribuição rurais e, previamente, acordar as respostas com os consumidores aderentes ao programa de resposta da demanda. O operador de distribuição poderá, ainda, realizar operações manuais, a partir do COD, de acordo com a situação operativa do macro sistema, entre as quais:

- Desligamento dos equipamentos de irrigação em situações de contingência;
- Reposição antecipada da irrigação antes de um desligamento programado para manutenção;
- Desligamento dos equipamentos de irrigação para a execução de atividades de manutenção programada.

5.1 CONTRIBUIÇÕES DESTA TESE

Esta tese abordou uma investigação inédita e inovadora. Diversas foram as contribuições trazidas por esta tese de doutorado à comunidade científica, entre as quais:

- Modelagem, em lógica nebulosa (*fuzzyficação*), das variáveis de uma lavoura de arroz irrigado, das variáveis meteorológicas, tarifa horária e comandos de resposta da demanda;

- Proposta de um controlador de irrigação para lavouras de arroz com leitura de parâmetros da lavoura e de variáveis de previsão meteorológica;
- Proposta de um gerenciador de resposta da demanda com aplicação em redes elétricas rurais;
- Proposta de uma estrutura de resposta da demanda, com aplicação em redes elétricas rurais, e foco na redução das transgressões dos limites de operação e melhoria da qualidade de energia elétrica destas redes.

5.2 PUBLICAÇÕES REALIZADAS

Ao longo das pesquisas realizadas durante o desenvolvimento desta tese, foram realizadas algumas publicações prévias de artigos relacionadas ao tema, entre as quais estão:

- *Fuzzy-based methodology for evaluation of energy efficiency in rice irrigation systems*, UPEC (2017);
- *Data mining applied to features selectivity for a non-technical loss detection model in rural distribution grids*, CIRED (2021);
- *Methodology to identify non-technical losses in rural grids using artificial neural networks and deep learning*, CIRED (2021);
- Sistema neural artificial para identificação de perdas não técnicas em consumidores rurais, *Revista Brazilian Applied Science Review* (2021);
- Perdas não técnicas em irrigantes da região rizicultora do Rio Grande do Sul, *SBSE* (2022).

5.3 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Esta tese apresentou uma proposta de estrutura de resposta da demanda, que, muito por se tratar de um trabalho inédito, abre possibilidades de melhorias, na medida que instigará outros trabalhos a serem realizados no futuro. Dentro das possibilidades de continuidade de pesquisa e desenvolvimento de melhorias na estrutura de resposta da demanda proposta neste trabalho estão:

- Agregar solicitação de partida do controlador ao gerenciador;

- Investigar os requisitos de *cyber security* necessárias para aplicação prática da estrutura de resposta da demanda;
- Incluir conceito de aprendizado de máquina ao gerenciador de resposta da demanda, de forma a otimizar sua operação;
- Agregar tomadas de ações padronizadas ao controlador de irrigação, a partir da utilização dos conceitos de computação de borda, nas situações em casos de perda de comunicação ou falha de leituras das variáveis;
- Implementar melhorias no GRD, entre as quais a interface do gerenciador com o usuário, através de um sistema supervisorio, o comando de *Ligar Carga*, e lógica de revezamento entre as UCs que ficam desligadas, de acordo com seu nível, em caso de atuação de transgressões severas, em que as UCs tenham que ficar por longos períodos ativas;
- Implementar situações de prioridade entre os consumidores irrigantes, prevendo as situações de irrigantes que bombeiam a água do rio ou lago e disponibilizam a outros consumidores vizinhos;
- Implementar pequeno atraso em cada controlador de irrigação para evitar variações simultâneas dos controladores de irrigação nos horários de início e término do horário de ponta;
- Estudar a integração do controle de tensão entre os controladores dos reguladores de tensão existentes nas redes de distribuição rurais e o gerenciador de resposta da demanda, bem como estudar o comportamento do GRD em caso de monitoramento da tensão nos secundários dos transformadores de distribuição.

De forma geral, além dos estudos e propostas de melhorias listados, o caminho natural de continuidade deste trabalho seria a aplicação prática da metodologia proposta. Ressalta-se que, para isso, será necessário que os consumidores participantes do programa de resposta da demanda possuam medidores de energia inteligentes, bem como que seja prevista uma comunicação apropriada entre os dispositivos de campo (medidores de energia e os controladores de irrigação) e o GRD, levando em consideração as características das regiões rurais.

REFERÊNCIAS

- AGHAJANZADEH, A.; THERKELSEN, P.; **Agricultural Demand Response For Decarbonizing the Electricity Grid**; Journal of Cleaner Production, v. 220, p. 827-835, Elsevier, 2019.
- ANDRADE FILHO, L. S.; GOMES, H. P.; **Estações de Bombeamento**. In: GOMES, H. P.; **Sistemas de Irrigação: Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. p.175.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Resolução Normativa 414/2010**; Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>; Acesso em: 22/11/2019; Brasília: 2010.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Resolução Normativa 800/2017**; Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2017/060/resultado/ren2017800.pdf>; Acesso em: 22/11/2019; Brasília: 2017. a.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**; Web: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9. Acesso em 22/11/2019; Brasília: 2017. b.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Indicadores de Conformidade do Nível de Tensão (DRP e DRC)**; Web: <https://www.aneel.gov.br/conformidade>; Acesso em 30/11/2019. a.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC)**; Web: <https://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>; Acesso em 30/11/2019. b.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica; **Procedimentos do Programa de Eficiência Energética**; Web: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/zip/propeev1.zip>; Acesso em 07/07/2021. 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+Energ%C3%A9tica/e07ab5a6-57d2-4f37-ae53-8112a096fd50>. Acesso em 07/07/2021. b.
- ASSAD, E.; **Estudo sobre eficiência do uso da água no Brasil: Análise do impacto da irrigação na agricultura brasileira e potencial de produção de alimentos face ao aquecimento global**; Brasília: Embaixada Britânica; Rio de Janeiro: FGV, 2016.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J.; **Atmosfera, Tempo e Clima**; 9 ed.; Porto Alegre: Bookman, 2013. 526 p.

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.

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.

BUMGARDNER, V. K. C.; HICKEY, C.; **Making sense of Edge Computing**; Shelter Island: Manning Publications, 2020.

CAMPOS, A.; **Tarifas inteligentes e resposta da demanda: cenários**; Tese de Doutorado; Universidade de São Paulo; 2017.

CASTRO, N. J. et Al; **Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica: Aspectos Regulatórios e Perspectivas**; Rio de Janeiro: Publit, 2017. 27 p.

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.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica; **Resposta da Demanda**; Web: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/resposta_demanda; Acesso em: 21/11/2019.

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

CHEN, J. et al.; **Application Prospect of Edge Computing in Smart Distribution**; IEEE 2018 China International Conference on Electricity Distribution; Tianjin: 2018.

CHEN, S. et al.; **Internet of Things Based Smart Grids Supported by Intelligent Edge Computing**; IEEE Access Journal; Special Section on Intelligent and Cognitive Techniques for Internet of Things; IEEE: 2019. 14 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; **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**; V. 7; Brasília: EPE, 2020.

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.

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.

DUGAN, R. C. et Al.; **Electrical Power Systems Quality**, 3 ed. Nova Iorque; McGraw-Hill, 2012. 580 p.

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 30/11/2019.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética; **Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos de Planejamento Energético: Considerações Iniciais**; Brasília: EPE, 2018.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética; **Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético – Nota Técnica**; Rio de Janeiro: EPE, 2019.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética; **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. Ano base 2019**; Brasília: EPE, 2020.

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.

FILIPPO FILHO, G.; **Bombas, Ventiladores e Compressores: Fundamentos**; 1 ed.; São Paulo: Érica, 2015. 320 p.

FIERRO-CHACÓN, A.; TORRES-TELLO, J.; **Fuzzy Logic that Determines Sky Conditions as a Key Component of a Smart Irrigation System**; Sixth International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG); IEEE, 2019.

FLETCHER, J.; **Power Distribution Network Planning in Regional Areas**; Tese de Doutorado (PhD); University of Western Australia, 2019.

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.

GIRBAU-LLISTUELLA, F. et al.; **Smart Rural grid pilot in Spain**; The Energy, Internet, Elsevier, 2019.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; **Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy**; Revista SBA Controle & Automação; vol. 4; nº 3; p. 97-115; 1994.

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.

HASAN, M. F. et al.; **Implementation of Fuzzy Logic in Autonomous Irrigation System for Efficient Use of Water**; Joint 7th International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV) and 2nd International Conference on Imaging, Vision & Pattern Recognition (icIVPR); IEEE, 2018.

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.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia; **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**; Disponível em: www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas Acesso em: 23/11/2019.

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: 01/02/2020.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia; **Banco de Dados Meteorológicos do INMET**; Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>; Acesso em: 18/02/2022.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; **Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – Glossário**; Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>; Acesso em: 11/07/2020.

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 2018/19 Projeção**; Instituto Rio Grandense do Arroz; Governo do Estado do Rio Grande do Sul: 2019.

IRGA, Instituto Rio Grandense do Arroz; **Produção Mundial de Arroz (Base Beneficiado)**; Disponível em: <https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/201909/17154729-producao-mundial-de-arroz-2019-20.pdf>; Acesso em: 01/02/2020.

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.

KHAN, W. Z. et al.; **Edge computing: A survey**; Future Generation Computer Systems; v. 97; p. 219-235; Elsevier, 2019.

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.

KRISHNASAMY, E.; VARRETTE, S.; MUCCIARDI, M.; **Edge Computing: An Overview of Framework And Applications**; Disponível em: <https://prace-ri.eu/wp-content/uploads/Edge-Computing-An-Overview-of-Framework-and-Applications.pdf>; Acesso em: 22/12/2021.

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.

KUSKO, A.; THOMPSON, M. T.; **Power Quality in Electrical Systems**; 1 ed.; Nova Iorque: McGraw-Hill, 2007. 225 p.

LEVY, B. N.; **Influências de Programas de Resposta da Demanda na Rede de Distribuição**; Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica; Universidade Federal do Rio de Janeiro, 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.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; **Projeções do Agronegócio – Brasil 2017/18 a 2027/28: Projeções de Longo Prazo**; Brasília: MAPA/ACE, 2018. 112 p.

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

MENTA, R. V.; **Metodologia para Análise de Resposta de Demanda em Redes Inteligentes**; Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica; Universidade Federal de Juiz de Fora, 2015.

MOREIRA, S. G.; **Resposta da Demanda no Planejamento para Integração de Recursos Energéticos Distribuídos**; Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica; Universidade Estadual Paulista, 2017.

MULLER, G. M.; **Impacto de Novas Tecnologias e Smart Grids na Demanda de Longo Prazo do Sistema Elétrico Brasileiro**; Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica; Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

NOLAN, J. M.; O'MALLEY, M.; **Challenges and Barriers to Demand Response Deployment and Evaluation**. Applied Energy, v. 152, p. 1-10, 2015.

O'NEILL, J.; **Demand Response: Electricity Market Benefits and Energy Efficiency Coordination**. Nova Iorque: Nova Science Publishers, Inc, 2013..

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

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

PETERSON, A. R.; **Demand Response for Reduced Electricity Consumption. A Plan for the Nation. Energy Policies, Politics and Prices**. Nova Iorque: Nova Science Publishers, Inc., 2013. 155 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.

PHILIPPOU, N. et al.; **Effective Dynamic Tariffs for Price-Based Demand Side Management with Grid-Connected PV Systems**. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech; Eindhoven: 2015.

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.

REIS, M. S.; **Implementação de um Regulador de Tensão com Computador Eletrônico de Tap**; Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica; Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

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.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic, With Engineering Applications**. 3ª ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 607 p.

RS, Governo do Estado do Rio Grande do Sul; **Atlas Socioeconômico Rio Grande do Sul**; Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br>; Acesso em 20/11/2019.

SAID, S. M.; HARTMANN, B.; **A Robust Controlled-SMES for Islanding Microgrid Distribution Systems**; 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG); IEEE, 2018.

SANTOS, T. A. A.; **Determinação de Perfil de Curva de Carga Residencial Baseado num Sistema-Fuzzy**; Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica; Universidade Estadual Paulista, 2016.

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

SATYANARAYANAN, M.; **The Emergence of Edge Computing**; Computer; v. 50; p. 30-39; IEEE, 2017.

SENTELHAS, P. C.; MONTEIRO, J. E. B.; **Agrometeorologia dos Cultivos**; In: Agrometeorologia dos Cultivos – O Fator Meteorológico na Produção Agrícola; 1 ed.; Brasília: INMET, 2009. 530 p. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/home/publicacoes/agrometeorologia_dos_cultivos.pdf; Acesso em 19/09/2019.

SHAREEF, H. et al.; **Review on Home Energy Management System Considering Demand Responses, Smart Technologies, and Intelligent Controllers**; IEEE Access Journal; Special Section on Energy Management in Buildings; IEEE, 2018. 12 p.

SIANO, p.; **Demand Response and Smart Grids – A Survey**; Renewable and Sustainable Energy Reviews; v. 30; p. 461-478; Elsevier, 2014.

SILVA, A. J.; MUNHOZ, F. C.; CORREIA, P. B.; **Qualidade na Utilização de Energia Elétrica no Setor Rural: Problemas, Legislação e Alternativas**; 4º Encontro de Energia no Meio Rural; SciElo Proceedings; 2002.

SILVA, H. B.; **Gestão Eficiente dos Novos Recursos Energéticos advindos das Redes Inteligentes**; Tese de Doutorado em Engenharia de Produção; Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

SIMÕES, M. G; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blüchler, 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.

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.

TOLMASQUIM, M. T.; **Mecanismo para a integração das energias renováveis intermitentes: redes elétricas inteligentes/respostas pelo lado da demanda**; Corporación Adina de Fomento, Vicepresidencia de Infraestrutura; Web: <http://scioteca.caf.com>; Divulgação: 2017; Acesso em: 15/12/2019.

TOLMASQUIM, M. T.; SZKLO, A. S.; **Matriz Energética Brasileira (1995 - 2010): A energia no Brasil na virada do milênio**; COPPE/UFRJ, 2000.

UBERTI, V. A. et al.; **Fuzzy-based Methodology for Evaluation of Energy Efficiency in Rice Irrigation Systems**; 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC); IEEE, 2017.

VASCONCELLOS, V.; ZANETTA Jr., L. C.; **Determinação do Carregamento Máximo Admissível de Transformadores de Potência Através de Curvas de Carga Características**; XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI); Belo Horizonte: 2006.

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.

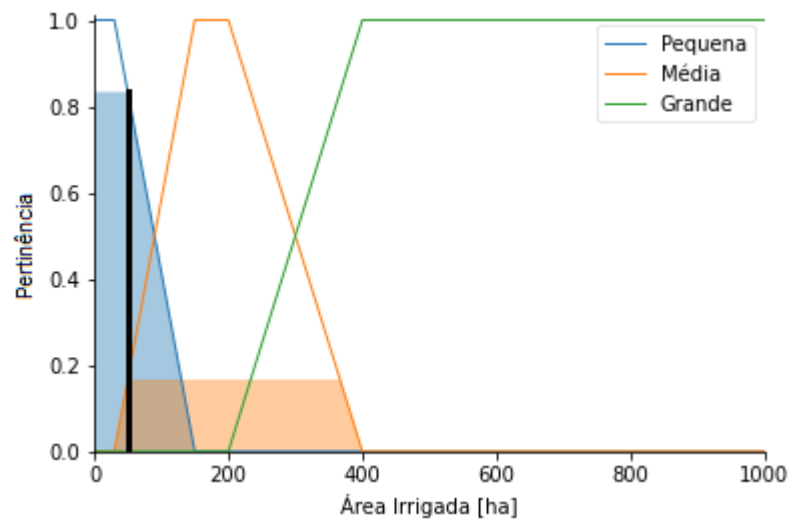
VOLTOLINI, J.; ALTHOFF, D. A.; BACK, A. J.; **Água de Irrigação para a Cultura do Arroz Irrigado no Sistema Pré-Germinado**. In: EPAGRI; A Cultura do Arroz Irrigado Pré-Germinado; Florianópolis: 2002. p. 101-112.

YE, F.; HE, N.; WU, X.; **Research on Power Grid Inspection Path Based on Edge Computing**; 2020 IEEE International Conference on Urban Engineering and Management Science (ICUEMS); Zhuhai: 2020.

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

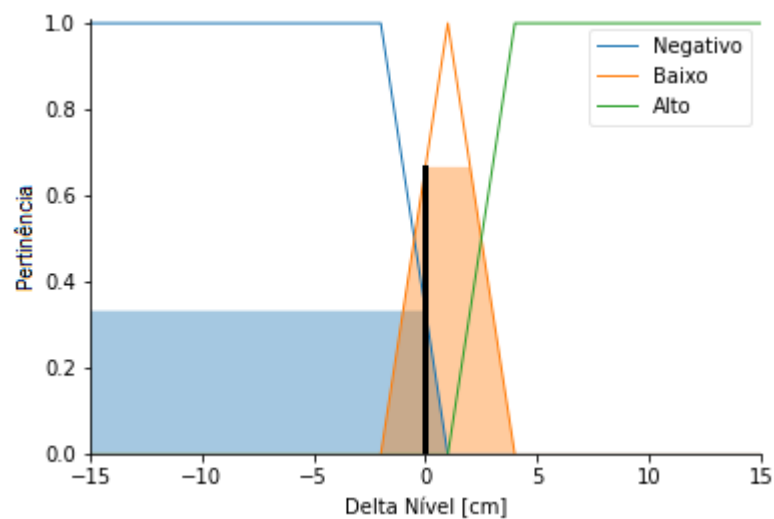
APÊNDICE A – ACOMPANHAMENTO DAS SIMULAÇÕES DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO

Figura A.1 – Exemplo de visualização da variável *Área Irrigada* nas simulações

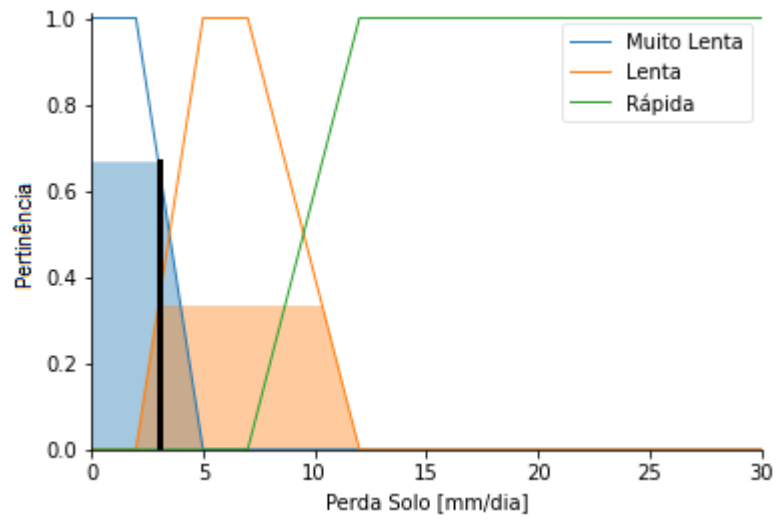


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

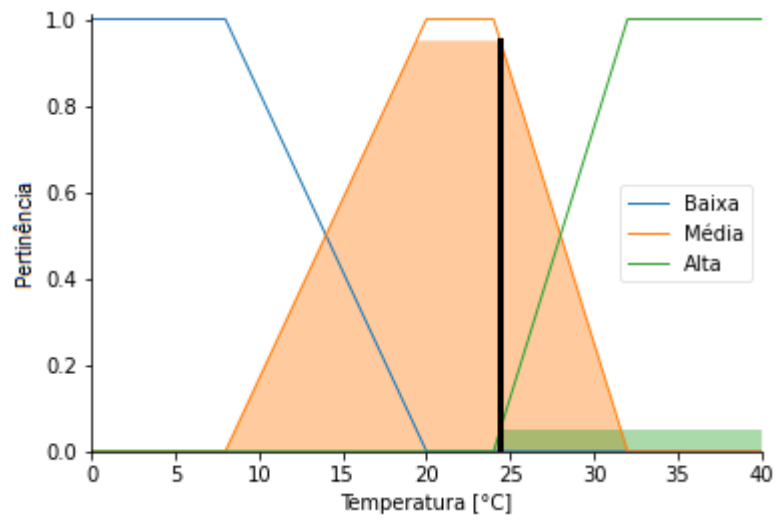
Figura A.2 – Exemplo de visualização da variável *Delta Nível* nas simulações



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

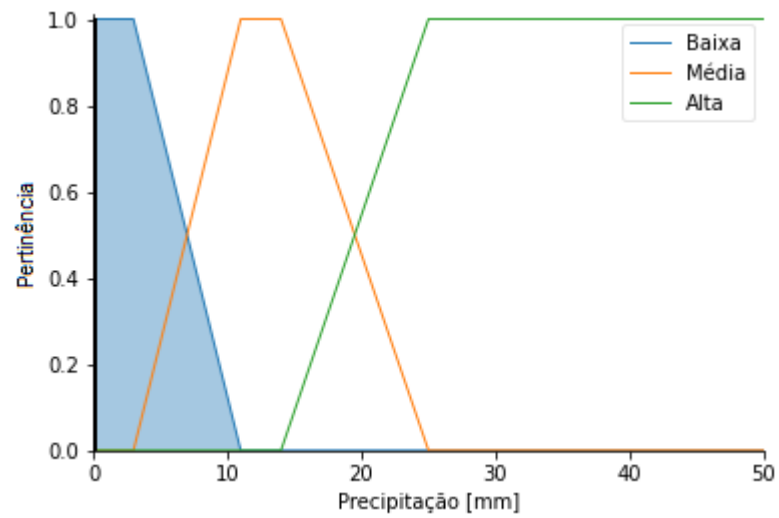
Figura A.3 – Exemplo de visualização da variável *Permeabilidade do Solo*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A.4 – Exemplo de visualização da variável *Temperatura* nas simulações

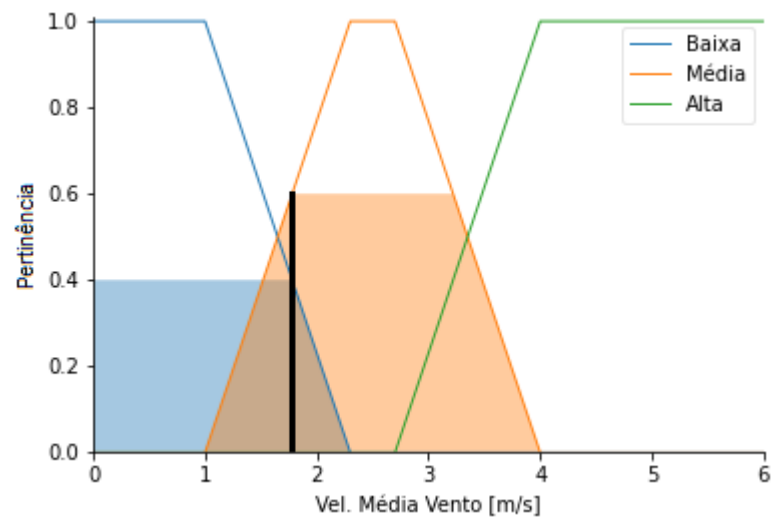
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A.5 – Exemplo de visualização da variável *Precipitação* nas simulações

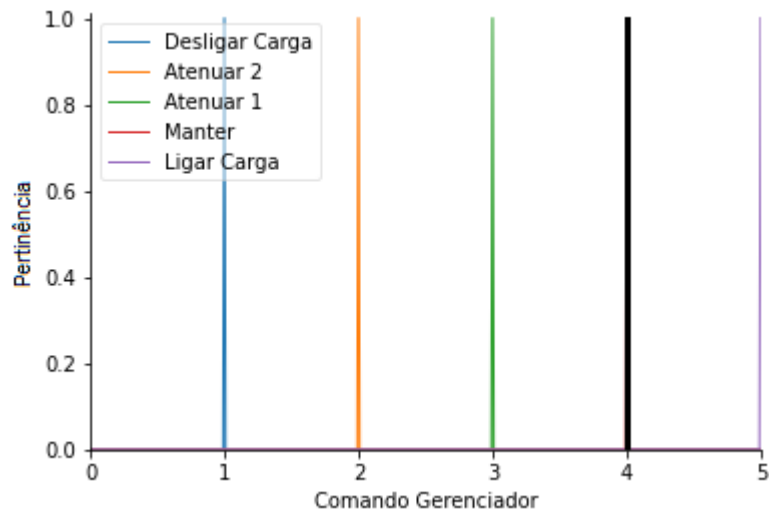


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

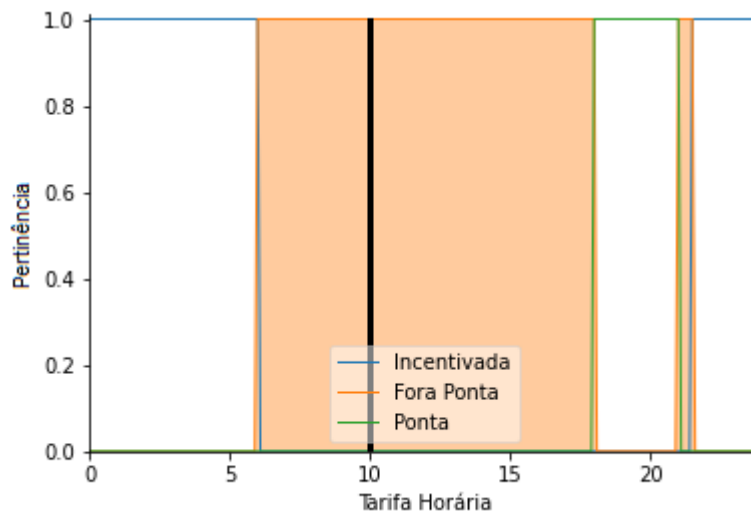
Figura A.6 – Exemplo de visualização da variável *Velocidade Média do Vento*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

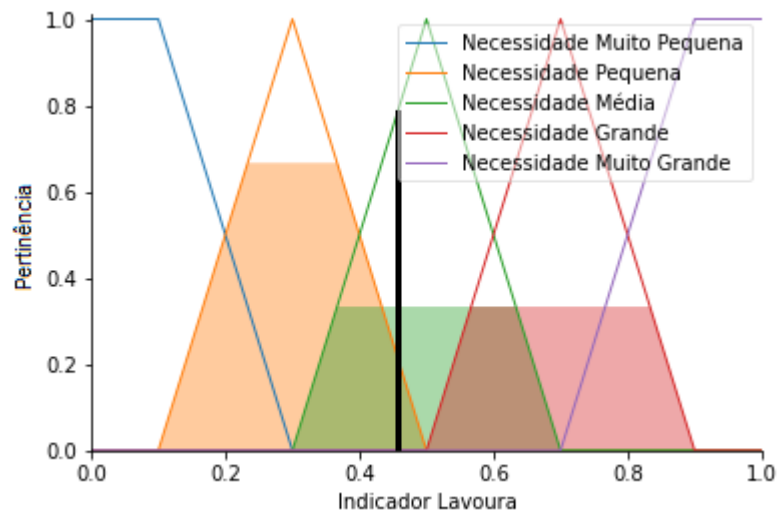
Figura A.7 – Exemplo de visualização da variável *Gerenciador RD*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A.8 – Exemplo de visualização da variável *Tarifa Horária* nas simulações

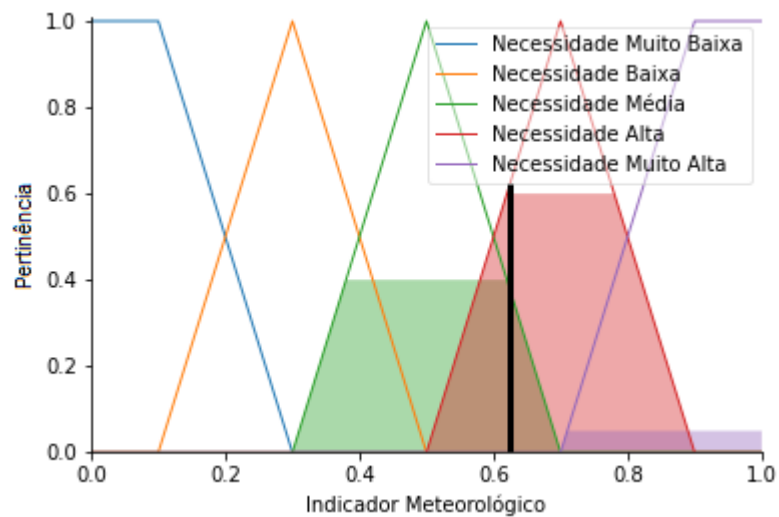
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A.9 – Exemplo de visualização da variável *Indicador Lavoura*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura A.10 – Exemplo de visualização da variável *Indicador Meteorológico*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

APÊNDICE B – RESULTADOS DO TESTE DE FUNCIONAMENTO DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO

Tabela B.1 – Resultados do controlador de irrigação para a Lavoura B

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	21,59	21,59	35,68	42,37
	Incentivada	41,00	41,05	52,42	61,69
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	22,08	27,73	42,40	51,17
	Incentivada	41,53	50,15	62,43	73,03
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	26,78	32,84	45,69	53,81
	Incentivada	44,92	53,82	64,17	74,12
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	32,75	38,45	50,54	59,11
	Incentivada	49,90	58,50	67,76	78,00
0,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	39,42	46,12	58,27	68,56
	Incentivada	57,48	67,08	75,87	86,72
- 1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	41,40	50,00	62,37	73,03
	Incentivada	61,44	72,50	81,46	90,60
- 2,0	Ponta	0	0	49,89	52,00
	Fora Ponta	49,90	58,50	67,76	78,00
	Incentivada	67,03	78,03	81,46	90,60

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela B.2 – Resultados do controlador de irrigação para a Lavoura C

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	21,59	21,59	35,68	42,37
	Incentivada	41,00	41,05	52,42	61,69
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	33,70	39,51	51,32	60,15
	Incentivada	50,65	59,51	68,35	78,89
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	36,12	42,09	53,45	63,17
	Incentivada	52,82	62,20	70,11	81,65
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	40,00	47,09	59,35	69,72
	Incentivada	58,52	68,38	77,27	87,79
0,0	Ponta	0	0	49,77	51,69
	Fora Ponta	45,72	54,64	64,67	74,58
	Incentivada	63,77	75,00	81,46	90,25
- 1,0	Ponta	0	0	49,88	52,00
	Fora Ponta	49,20	57,91	67,25	77,27
	Incentivada	66,40	77,48	83,48	90,60
- 2,0	Ponta	0	0	49,95	52,20
	Fora Ponta	55,40	64,70	73,18	84,52
	Incentivada	72,57	83,13	85,38	90,60

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

APÊNDICE C – RESULTADOS DO TESTE SENSIBILIDADE DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO

Tabela C.1 – Teste de sensibilidade para a lavoura B e previsão de dia seco

Variação da Velocidade [%]					
Variável Alterada	Percentual de Alteração				
	-50%	-10%	0%	+10%	+50%
Área Irrigada	49,89	50,20		51,17	53,23
Delta Nível	54,54	51,45		50,07	48,17
Permeabilidade Média do Solo	42,26	49,44	50,54	51,30	55,25
Temperatura média	38,41	49,92		54,54	65,11
Precipitação	NA	NA		NA	NA
Vel. Média do Vento	40,76	49,13		52,31	59,02

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela C.2 – Teste de sensibilidade para a lavoura C e previsão de dia muito seco

Variação da Velocidade [%]					
Variável Alterada	Percentual de Alteração				
	-50%	-10%	0%	+10%	+50%
Área Irrigada	73,03	75,89		78,71	87,12
Delta Nível	79,80	77,67		76,90	75,76
Permeabilidade Média do Solo	73,66	76,21	77,27	78,30	83,34
Temperatura média	57,56	69,86		77,67	77,67
Precipitação	NA	NA		NA	NA
Vel. Média do Vento	70,42	76,23		77,38	81,49

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela C.3 – Variação percentual da velocidade, em relação à velocidade de referência, para a lavoura B e previsão de dia seco

Variável Alterada	Variação da velocidade [%]			
	-50%	-10%	+10%	+50%
Área Irrigada	-1,29	-0,67	1,25	5,32
Delta Nível	7,91	1,80	-0,93	-4,69
Permeabilidade Média do Solo	-16,38	-2,18	1,50	9,32
Temperatura média	-24,00	-1,23	7,91	28,83
Precipitação	NA	NA	NA	NA
Vel. Média do Vento	-19,35	-2,79	3,50	16,78

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela C.4 – Variação percentual da velocidade, em relação à velocidade de referência, para lavoura C e previsão de dia muito seco

Variável Alterada	Variação da velocidade [%]			
	-50%	-10%	+10%	+50%
Área Irrigada	-5,49	-1,79	1,86	12,75
Delta Nível	3,27	0,52	-0,48	-1,95
Permeabilidade Média do Solo	-4,67	-1,37	1,33	7,86
Temperatura média	-25,51	-9,59	0,52	0,52
Precipitação	NA	NA	NA	NA
Vel. Média do Vento	-8,87	-1,35	0,14	5,46

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

APÊNDICE D – COMPORTAMENTO DO CONTROLADOR DE IRRIGAÇÃO SOB ATUAÇÃO DO GERENCIADOR DE RESPOSTA DA DEMANDA

Tabela D.1 – Resultados para a Lavoura B com comando de “Atenuar 1”

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	10,56	10,56	21,59	23,48
	Incentivada	21,59	21,59	35,68	42,37
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	10,69	10,69	22,78	29,38
	Incentivada	22,08	27,73	42,40	51,17
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	14,90	14,90	27,38	33,83
	Incentivada	26,78	32,84	45,69	53,81
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	19,32	19,32	33,33	39,85
	Incentivada	32,75	38,45	50,54	59,11
0,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	21,88	25,47	40,25	48,03
	Incentivada	39,42	46,12	58,27	68,56
- 1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	21,88	27,50	42,26	51,09
	Incentivada	41,40	50,00	62,37	73,03
- 2,0	Ponta	0	0	27,43	30,12
	Fora Ponta	32,75	38,45	50,54	59,10
	Incentivada	49,90	58,50	67,76	78,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela D.2 – Resultados para a Lavoura B com comando de “Atenuar 2”

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	0	10,49	10,56	11,02
	Incentivada	10,56	10,56	21,59	23,48
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	9,27	10,49	10,56	12,36
	Incentivada	10,69	10,69	22,78	29,38
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	11,88	10,49	14,57	15,79
	Incentivada	14,90	14,90	27,38	33,83
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	11,88	10,49	19,25	21,31
	Incentivada	19,32	19,32	33,33	39,85
0,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	12,50	10,49	22,59	27,53
	Incentivada	21,88	25,47	40,25	48,03
- 1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	12,50	10,49	22,59	29,16
	Incentivada	21,88	27,50	42,26	51,09
- 2,0	Ponta	0	0	11,00	13,20
	Fora Ponta	19,32	19,32	33,33	39,85
	Incentivada	32,75	38,45	50,54	59,11

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela D.3 – Resultados para a Lavoura C com comando de “Atenuar 1”

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	10,56	10,56	21,59	23,48
	Incentivada	21,59	21,59	35,68	42,37
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	20,25	20,25	34,32	40,90
	Incentivada	33,70	39,51	51,32	60,15
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	21,88	22,51	36,87	43,70
	Incentivada	36,12	42,09	53,45	63,17
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	21,88	26,04	40,84	48,86
	Incentivada	40,00	47,09	59,35	69,72
0,0	Ponta	0	0	27,35	30,36
	Fora Ponta	27,83	33,90	46,48	54,55
	Incentivada	45,72	54,64	64,67	74,58
- 1,0	Ponta	0	0	27,42	32,56
	Fora Ponta	32,00	37,80	49,86	58,22
	Incentivada	49,20	57,91	67,25	77,27
- 2,0	Ponta	0	0	27,46	33,30
	Fora Ponta	38,10	44,23	56,11	66,22
	Incentivada	55,40	64,70	73,18	84,52

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela D.4 – Resultados para a Lavoura C com comando de “Atenuar 2”

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Velocidade Bomba [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	0	0	10,56	12,36
	Incentivada	10,56	10,56	21,59	23,48
3,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	10,82	10,82	20,25	22,23
	Incentivada	20,25	20,25	34,32	40,90
2,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	10,82	10,82	22,59	24,56
	Incentivada	21,88	22,51	36,87	43,70
1,0	Ponta	0	0	0	0
	Fora Ponta	10,82	10,82	22,59	28,01
	Incentivada	21,88	26,04	40,84	48,86
0,0	Ponta	0	0	11,81	16,07
	Fora Ponta	15,76	15,76	28,40	34,75
	Incentivada	27,83	33,90	46,48	54,55
- 1,0	Ponta	0	0	12,17	16,57
	Fora Ponta	18,83	18,83	32,47	38,93
	Incentivada	32,00	37,80	49,86	58,22
- 2,0	Ponta	0	0	12,35	17,38
	Fora Ponta	21,88	24,22	38,90	46,24
	Incentivada	38,10	44,23	56,11	66,22

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

APÊNDICE E – PERCENTUAIS DE REDUÇÃO DE POTÊNCIA DE IRRIGAÇÃO

Tabela E.1 – Percentuais de redução de potência de irrigação – Lavoura B

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Redução de potência [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Fora Ponta	98,89	98,89	95,00	91,63
	Incentivada	92,42	92,39	84,16	74,18
3,0	Fora Ponta	98,82	97,65	91,62	85,26
	Incentivada	92,12	86,13	73,23	57,16
2,0	Fora Ponta	97,89	96,10	89,51	82,86
	Incentivada	90,03	82,85	70,93	55,21
1,0	Fora Ponta	96,14	93,75	85,80	77,28
	Incentivada	86,33	77,98	65,78	47,80
0,0	Fora Ponta	93,26	89,21	78,24	64,55
	Incentivada	79,11	66,80	51,96	28,26
- 1,0	Fora Ponta	92,19	86,25	73,31	57,16
	Incentivada	74,49	58,08	40,54	18,20
- 2,0	Fora Ponta	86,33	77,98	65,78	47,80
	Incentivada	66,87	47,74	40,54	18,20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela E.2 – Percentuais de redução de potência de irrigação – Lavoura C

Delta Nível [cm]	Tarifa Horária	Redução de potência [%]			
		Dia muito chuvoso	Dia chuvoso	Dia seco	Dia muito seco
4,0	Fora Ponta	98,89	98,89	95,00	91,63
	Incentivada	92,42	92,39	84,16	74,18
3,0	Fora Ponta	95,79	93,22	85,13	76,06
	Incentivada	85,71	76,82	64,88	45,99
2,0	Fora Ponta	94,82	91,80	83,20	72,27
	Incentivada	83,79	73,53	62,09	40,12
1,0	Fora Ponta	92,96	88,51	77,00	62,72
	Incentivada	77,96	64,83	49,25	25,57
0,0	Fora Ponta	89,49	82,06	70,25	54,37
	Incentivada	71,47	53,59	40,54	19,14
- 1,0	Fora Ponta	86,90	78,64	66,54	49,25
	Incentivada	67,80	48,84	36,01	18,20
- 2,0	Fora Ponta	81,30	70,21	56,89	33,58
	Incentivada	57,96	36,81	31,54	18,20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

**APÊNDICE F – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES
DO GRD: CENÁRIO DE SOBRECARGA DO TRANSFORMADOR DA
SUBESTAÇÃO AL-5**

=====
simulated time: 0:15.0h
=====
simulated time: 0:30.0h
=====
simulated time: 0:45.0h
=====
simulated time: 1:0.0h
=====
simulated time: 1:15.0h
=====
simulated time: 1:30.0h
=====
simulated time: 1:45.0h
=====
simulated time: 2:0.0h
=====
simulated time: 2:15.0h
=====
simulated time: 2:30.0h
=====
simulated time: 2:45.0h
=====
simulated time: 3:0.0h
=====
simulated time: 3:15.0h
=====
simulated time: 3:30.0h
=====
simulated time: 3:45.0h
=====
simulated time: 4:0.0h
=====
simulated time: 4:15.0h
=====
simulated time: 4:30.0h

=====
simulated time: 4:45.0h
=====
simulated time: 5:0.0h
=====
simulated time: 5:15.0h
=====
simulated time: 5:30.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
identificado problema
sobrecarga_transformador_subestacao 60%.
ajustando carga UC1-5: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 5:45.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
identificado problema
sobrecarga_transformador_subestacao 60%.
ajustando carga UC2-5: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 6:0.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']
=====
simulated time: 6:15.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-5']
=====
simulated time: 6:30.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']
=====
simulated time: 6:45.0h

sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-5']
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
religando cargas ['UC2-5']
sobrecarga_transformador_subestacao desfaz
ajustes da carga UC2-5 para 1.0kW, 1.0kvar
=====
simulated time: 7:0.0h
=====
simulated time: 7:15.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']
=====
simulated time: 7:30.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
identificado problema
sobrecarga_transformador_subestacao 60%.
ajustando carga UC2-5: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 7:45.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']
=====
simulated time: 8:0.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-5']
=====
simulated time: 8:15.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']
=====
simulated time: 8:30.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-5']

=====
simulated time: 8:45.0h
=====
simulated time: 9:0.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']
=====
simulated time: 9:15.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-5']
=====
simulated time: 9:30.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']
=====
simulated time: 9:45.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-5']
=====
simulated time: 10:0.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']
=====
simulated time: 10:15.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-5']
=====
simulated time: 10:30.0h
=====
simulated time: 10:45.0h
sobrecarga_transformador_subestacao 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-5']

sobrecarga_transformador_subestacao 60%: religando cargas ['UC1-5']	simulated time: 14:30.0h
=====	=====
sobrecarga_transformador_subestacao desfaz ajustes da carga UC1-5 para 1.0kW, 1.0kvar	simulated time: 14:45.0h
=====	=====
simulated time: 11:0.0h	simulated time: 15:0.0h
=====	=====
sobrecarga_transformador_subestacao 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-5']	simulated time: 15:15.0h
=====	=====
sobrecarga_transformador_subestacao 60%: religando cargas ['UC2-5']	simulated time: 15:30.0h
=====	=====
sobrecarga_transformador_subestacao desfaz ajustes da carga UC2-5 para 1.0kW, 1.0kvar	simulated time: 15:45.0h
=====	=====
simulated time: 11:15.0h	simulated time: 16:0.0h
=====	=====
simulated time: 11:30.0h	simulated time: 16:15.0h
=====	=====
simulated time: 11:45.0h	simulated time: 16:30.0h
=====	=====
simulated time: 12:0.0h	simulated time: 16:45.0h
=====	=====
simulated time: 12:15.0h	simulated time: 17:0.0h
=====	=====
simulated time: 12:30.0h	simulated time: 17:15.0h
=====	=====
simulated time: 12:45.0h	simulated time: 17:30.0h
=====	=====
simulated time: 13:0.0h	simulated time: 17:45.0h
=====	=====
simulated time: 13:15.0h	simulated time: 18:0.0h
=====	=====
simulated time: 13:30.0h	simulated time: 18:15.0h
=====	=====
simulated time: 13:45.0h	simulated time: 18:30.0h
=====	=====
simulated time: 14:0.0h	simulated time: 18:45.0h
=====	=====
simulated time: 14:15.0h	simulated time: 19:0.0h
=====	=====
simulated time: 14:30.0h	simulated time: 19:15.0h
=====	=====

simulated time: 19:30.0h
=====

simulated time: 19:45.0h
=====

simulated time: 20:0.0h
=====

simulated time: 20:15.0h
=====

simulated time: 20:30.0h
=====

simulated time: 20:45.0h
=====

simulated time: 21:0.0h
=====

simulated time: 21:15.0h
=====

simulated time: 21:30.0h
=====

simulated time: 21:45.0h
=====

simulated time: 22:0.0h
=====

simulated time: 22:15.0h
=====

simulated time: 22:30.0h
=====

simulated time: 22:45.0h
=====

simulated time: 23:0.0h
=====

simulated time: 23:15.0h
=====

simulated time: 23:30.0h
=====

simulated time: 23:45.0h
=====

simulated time: 24:0.0h
=====

APÊNDICE G – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE PEQUENA SOBRECARGA DO ALIMENTADOR AL-1

```

=====
simulated time: 0:15.0h
=====
simulated time: 0:30.0h
=====
simulated time: 0:45.0h
=====
simulated time: 1:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado
problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga
UC1-1: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 1:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 1:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
sobrecarga_alimentador 60%: religando
cargas ['UC1-1']
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
carga UC1-1 para 1.0kW, 1.0kvar
=====
simulated time: 1:45.0h
=====
simulated time: 2:0.0h
=====
simulated time: 2:15.0h
=====
simulated time: 2:30.0h
=====
simulated time: 2:45.0h
=====
simulated time: 3:0.0h
=====
simulated time: 3:15.0h
=====
simulated time: 3:30.0h
=====
simulated time: 3:45.0h
=====
simulated time: 4:0.0h
=====
simulated time: 4:15.0h
=====
simulated time: 4:30.0h
=====
simulated time: 4:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado
problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga
UC1-1: 0.6kW,0.6kvar

```

```

=====
simulated time: 5:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 5:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 5:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 5:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 6:0.0h
=====
simulated time: 6:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 6:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 6:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
sobrecarga_alimentador 60%: religando
cargas ['UC1-1']
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
carga UC1-1 para 1.0kW, 1.0kvar
=====
simulated time: 7:0.0h
=====
simulated time: 7:15.0h
=====
simulated time: 7:30.0h
=====
simulated time: 7:45.0h
=====
simulated time: 8:0.0h
=====
simulated time: 8:15.0h
=====
simulated time: 8:30.0h
=====

```

simulated time: 8:45.0h
=====
simulated time: 9:0.0h
=====
simulated time: 9:15.0h
=====
simulated time: 9:30.0h
=====
simulated time: 9:45.0h
=====
simulated time: 10:0.0h
=====
simulated time: 10:15.0h
=====
simulated time: 10:30.0h
=====
simulated time: 10:45.0h
=====
simulated time: 11:0.0h
=====
simulated time: 11:15.0h
=====
simulated time: 11:30.0h
=====
simulated time: 11:45.0h
=====
simulated time: 12:0.0h
=====
simulated time: 12:15.0h
=====
simulated time: 12:30.0h
=====
simulated time: 12:45.0h
=====
simulated time: 13:0.0h
=====
simulated time: 13:15.0h
=====
simulated time: 13:30.0h
=====
simulated time: 13:45.0h
=====
simulated time: 14:0.0h
=====
simulated time: 14:15.0h
=====
simulated time: 14:30.0h
=====
simulated time: 14:45.0h
=====
simulated time: 15:0.0h
=====
simulated time: 15:15.0h
=====
simulated time: 15:30.0h
=====
simulated time: 15:45.0h
=====
simulated time: 16:0.0h
=====

simulated time: 16:15.0h
=====
simulated time: 16:30.0h
=====
simulated time: 16:45.0h
=====
simulated time: 17:0.0h
=====
simulated time: 17:15.0h
=====
simulated time: 17:30.0h
=====
simulated time: 17:45.0h
=====
simulated time: 18:0.0h
=====
simulated time: 18:15.0h
=====
simulated time: 18:30.0h
=====
simulated time: 18:45.0h
=====
simulated time: 19:0.0h
=====
simulated time: 19:15.0h
=====
simulated time: 19:30.0h
=====
simulated time: 19:45.0h
=====
simulated time: 20:0.0h
=====
simulated time: 20:15.0h
=====
simulated time: 20:30.0h
=====
simulated time: 20:45.0h
=====
simulated time: 21:0.0h
=====
simulated time: 21:15.0h
=====
simulated time: 21:30.0h
=====
simulated time: 21:45.0h
=====
simulated time: 22:0.0h
=====
simulated time: 22:15.0h
=====
simulated time: 22:30.0h
=====
simulated time: 22:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado
problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga
UC1-1: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 23:0.0h

sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====

simulated time: 23:15.0h

sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====

simulated time: 23:30.0h

sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
sobrecarga_alimentador 60%: religando cargas ['UC1-1']
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da carga UC1-1 para 1.0kW, 1.0kvar
=====

simulated time: 23:45.0h

=====

simulated time: 24:0.0h

=====

APÊNDICE H – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE GRANDE SOBRECARGA DO ALIMENTADOR AL-1

=====
simulated time: 0:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC1-1: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 0:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC2-1: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 0:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC3-1: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 1:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 1:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 1:30.0h
=====
simulated time: 1:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-1']
=====
simulated time: 2:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 2:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 2:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-1']
=====
simulated time: 2:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====

simulated time: 3:0.0h
=====
simulated time: 3:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 3:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-1']
=====
simulated time: 3:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 4:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 4:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-1']
=====
simulated time: 4:30.0h
=====
simulated time: 4:45.0h
sobrecarga_alimentador 33%: identificado problema
sobrecarga_alimentador 33%. ajustando carga UC1-1: 0.33kW,0.33kvar
=====
simulated time: 5:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 5:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 5:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-1']
=====
simulated time: 5:45.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 6:0.0h

```

=====
simulated time: 6:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 6:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 6:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-1']
=====
simulated time: 7:0.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
sobrecarga_alimentador 33%: religando
cargas ['UC1-1']
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
carga UC1-1 para 0.6kW, 0.6kvar
=====
simulated time: 7:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 7:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 7:45.0h
=====
simulated time: 8:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-1']
sobrecarga_alimentador 60%: religando
cargas ['UC3-1']
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
carga UC3-1 para 1.0kW, 1.0kvar
=====
simulated time: 8:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 8:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 8:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']

```

```

=====
simulated time: 9:0.0h
=====
simulated time: 9:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 9:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 9:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 10:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 10:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 10:30.0h
=====
simulated time: 10:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 11:0.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 11:15.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 11:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
=====
simulated time: 11:45.0h
sobrecarga_alimentador 60%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
=====
simulated time: 12:0.0h
=====
simulated time: 12:15.0h

```


sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
 =====
 simulated time: 19:0.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
 =====
 simulated time: 19:15.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
 =====
 simulated time: 19:30.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
 sobrecarga_alimentador 60%: religando cargas ['UC1-1']
 sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da carga UC1-1 para 1.0kW, 1.0kvar
 =====
 simulated time: 19:45.0h
 =====
 simulated time: 20:0.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
 sobrecarga_alimentador 60%: religando cargas ['UC2-1']
 sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da carga UC2-1 para 1.0kW, 1.0kvar
 =====
 simulated time: 20:15.0h
 =====
 simulated time: 20:30.0h
 =====
 simulated time: 20:45.0h
 =====
 simulated time: 21:0.0h
 =====
 simulated time: 21:15.0h
 =====
 simulated time: 21:30.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
 sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC1-1: 0.6kW,0.6kvar
 =====

simulated time: 21:45.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
 sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC2-1: 0.6kW,0.6kvar
 =====
 simulated time: 22:0.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
 =====
 simulated time: 22:15.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
 =====
 simulated time: 22:30.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
 sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC3-1: 0.6kW,0.6kvar
 =====
 simulated time: 22:45.0h
 =====
 simulated time: 23:0.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: identificado problema
 sobrecarga_alimentador 33%. ajustando carga UC1-1: 0.33kW,0.33kvar
 =====
 simulated time: 23:15.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
 =====
 simulated time: 23:30.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-1']
 =====
 simulated time: 23:45.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-1']
 =====
 simulated time: 24:0.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-1']
 =====

APÊNDICE I – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE SOBRECARGA DO ALIMENTADOR AL-3

=====
simulated time: 0:10.0h
=====
simulated time: 0:20.0h
=====
simulated time: 0:30.0h
=====
simulated time: 0:40.0h
=====
simulated time: 0:50.0h
=====
simulated time: 1:0.0h
=====
simulated time: 1:10.0h
=====
simulated time: 1:20.0h
=====
simulated time: 1:30.0h
=====
simulated time: 1:40.0h
=====
simulated time: 1:50.0h
=====
simulated time: 2:0.0h
=====
simulated time: 2:10.0h
=====
simulated time: 2:20.0h
=====
simulated time: 2:30.0h
=====
simulated time: 2:40.0h
=====
simulated time: 2:50.0h
=====
simulated time: 3:0.0h
=====
simulated time: 3:10.0h
=====
simulated time: 3:20.0h
=====
simulated time: 3:30.0h
=====
simulated time: 3:40.0h
=====
simulated time: 3:50.0h
=====
simulated time: 4:0.0h
=====
simulated time: 4:10.0h
=====
simulated time: 4:20.0h
=====
simulated time: 4:30.0h
=====

simulated time: 4:40.0h
=====
simulated time: 4:50.0h
=====
simulated time: 5:0.0h
=====
simulated time: 5:10.0h
=====
simulated time: 5:20.0h
=====
simulated time: 5:30.0h
=====
simulated time: 5:40.0h
=====
simulated time: 5:50.0h
=====
simulated time: 6:0.0h
=====
simulated time: 6:10.0h
=====
simulated time: 6:20.0h
=====
simulated time: 6:30.0h
=====
simulated time: 6:40.0h
=====
simulated time: 6:50.0h
=====
simulated time: 7:0.0h
=====
simulated time: 7:10.0h
=====
simulated time: 7:20.0h
=====
simulated time: 7:30.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC1-3: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 7:40.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC2-3: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 7:50.0h
sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema
sobrecarga_alimentador 60%. ajustando carga UC3-3: 0.6kW,0.6kvar
=====
simulated time: 8:0.0h
sobrecarga_alimentador 33%: identificado problema

sobrecarga_alimentador 33%. ajustando carga UC1-3: 0.33kW,0.33kvar

=====

simulated time: 8:10.0h

sobrecarga_alimentador 33%: identificado problema

sobrecarga_alimentador 33%. ajustando carga UC2-3: 0.33kW,0.33kvar

=====

simulated time: 8:20.0h

sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']

=====

simulated time: 8:30.0h

=====

simulated time: 8:40.0h

sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema

=====

simulated time: 8:50.0h

sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema

=====

simulated time: 9:0.0h

sobrecarga_alimentador 33%: identificado problema

=====

simulated time: 9:10.0h

sobrecarga_alimentador 33%: identificado problema

=====

simulated time: 9:20.0h

sobrecarga_alimentador 33%: identificado problema

sobrecarga_alimentador 33%. ajustando carga UC3-3: 0.33kW,0.33kvar

=====

simulated time: 9:30.0h

sobrecarga_alimentador 0%: identificado problema

sobrecarga_alimentador 0%. ajustando carga UC1-3: 0.0kW,0.0kvar

=====

simulated time: 9:40.0h

=====

simulated time: 9:50.0h

sobrecarga_alimentador 0%: identificado problema

sobrecarga_alimentador 0%. ajustando carga UC2-3: 0.0kW,0.0kvar

=====

simulated time: 10:0.0h

sobrecarga_alimentador 0%: identificado problema

sobrecarga_alimentador 0%. ajustando carga UC3-3: 0.0kW,0.0kvar

=====

simulated time: 10:10.0h

sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema

=====

simulated time: 10:20.0h

sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema

=====

simulated time: 10:30.0h

sobrecarga_alimentador 60%: identificado problema

=====

simulated time: 10:40.0h

sobrecarga_alimentador 33%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']

=====

simulated time: 10:50.0h

=====

simulated time: 11:0.0h

sobrecarga_alimentador 33%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']

=====

simulated time: 11:10.0h

sobrecarga_alimentador 33%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']

=====

simulated time: 11:20.0h

sobrecarga_alimentador 0%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']

=====

simulated time: 11:30.0h

sobrecarga_alimentador 0%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']

=====

simulated time: 11:40.0h

sobrecarga_alimentador 0%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']

=====

simulated time: 11:50.0h

sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']

=====

simulated time: 12:0.0h

=====

simulated time: 12:10.0h

sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']

=====

simulated time: 12:20.0h

sobrecarga_alimentador 60%: executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']

=====

simulated time: 12:30.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
 =====

simulated time: 12:40.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
 =====

simulated time: 12:50.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
 =====

simulated time: 13:0.0h
 sobrecarga_alimentador 0%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
 =====

simulated time: 13:10.0h
 =====

simulated time: 13:20.0h
 sobrecarga_alimentador 0%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
 =====

simulated time: 13:30.0h
 sobrecarga_alimentador 0%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
 sobrecarga_alimentador 0%: religando cargas
 ['UC3-3']

sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC3-3 para 0.33kW, 0.33kvar
 =====

simulated time: 13:40.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
 sobrecarga_alimentador 60%: religando
 cargas ['UC1-3']

sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC1-3 para 1.0kW, 1.0kvar
 sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC1-3 para 1.0kW, 1.0kvar
 =====

simulated time: 13:50.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
 sobrecarga_alimentador 60%: religando
 cargas ['UC2-3']

sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC2-3 para 1.0kW, 1.0kvar
 sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC2-3 para 1.0kW, 1.0kvar
 sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC2-3 para 1.0kW, 1.0kvar
 =====

simulated time: 14:0.0h
 sobrecarga_alimentador 60%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
 sobrecarga_alimentador 60%: religando
 cargas ['UC3-3']

sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC3-3 para 1.0kW, 1.0kvar
 sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC3-3 para 1.0kW, 1.0kvar
 sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
 carga UC3-3 para 1.0kW, 1.0kvar
 =====

simulated time: 14:10.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
 =====

simulated time: 14:20.0h
 =====

simulated time: 14:30.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
 =====

simulated time: 14:40.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
 =====

simulated time: 14:50.0h
 sobrecarga_alimentador 0%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
 =====

simulated time: 15:0.0h
 sobrecarga_alimentador 0%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
 =====

simulated time: 15:10.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
 =====

simulated time: 15:20.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
 =====

simulated time: 15:30.0h
 =====

simulated time: 15:40.0h
 sobrecarga_alimentador 33%: executou
 alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
 =====

simulated time: 15:50.0h

```

sobrecarga_alimentador 0%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
=====
simulated time: 16:0.0h
sobrecarga_alimentador 0%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
=====
simulated time: 16:10.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
=====
simulated time: 16:20.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
=====
simulated time: 16:30.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
=====
simulated time: 16:40.0h
=====
simulated time: 16:50.0h
sobrecarga_alimentador 0%: identificado
problema
sobrecarga_alimentador 0%. ajustando carga
UC1-3: 0.0kW,0.0kvar
=====
simulated time: 17:0.0h
sobrecarga_alimentador 0%: identificado
problema
sobrecarga_alimentador 0%. ajustando carga
UC2-3: 0.0kW,0.0kvar
=====
simulated time: 17:10.0h
sobrecarga_alimentador 0%: identificado
problema
sobrecarga_alimentador 0%. ajustando carga
UC3-3: 0.0kW,0.0kvar
=====
simulated time: 17:20.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
=====
simulated time: 17:30.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
=====
simulated time: 17:40.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
=====
simulated time: 17:50.0h

```

```

=====
simulated time: 18:0.0h
sobrecarga_alimentador 0%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
=====
simulated time: 18:10.0h
sobrecarga_alimentador 0%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
=====
simulated time: 18:20.0h
sobrecarga_alimentador 0%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
=====
simulated time: 18:30.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
=====
simulated time: 18:40.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
=====
simulated time: 18:50.0h
sobrecarga_alimentador 33%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']
=====
simulated time: 19:0.0h
=====
simulated time: 19:10.0h
sobrecarga_alimentador 0%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-3']
sobrecarga_alimentador 0%: religando cargas
['UC1-3']
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
carga UC1-3 para 0.33kW, 0.33kvar
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
carga UC1-3 para 0.33kW, 0.33kvar
=====
simulated time: 19:20.0h
sobrecarga_alimentador 0%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-3']
sobrecarga_alimentador 0%: religando cargas
['UC2-3']
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
carga UC2-3 para 0.33kW, 0.33kvar
sobrecarga_alimentador desfaz ajustes da
carga UC2-3 para 0.33kW, 0.33kvar
=====
simulated time: 19:30.0h
sobrecarga_alimentador 0%: executou
alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-3']

```


APÊNDICE J – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES DO GRD: CENÁRIO DE SUBTENSÃO DO ALIMENTADOR AL-2

<p>=====</p> <p>simulated time: 0:10.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>identificado problema</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%.</p> <p>ajustando carga UC1-2: 0.6kW,0.6kvar</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 0:20.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>identificado problema</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%.</p> <p>ajustando carga UC2-2: 0.6kW,0.6kvar</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 0:30.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>identificado problema</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%.</p> <p>ajustando carga UC3-2: 0.6kW,0.6kvar</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 0:40.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:</p> <p>identificado problema</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%.</p> <p>ajustando carga UC1-2: 0.33kW,0.33kvar</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 0:50.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:</p> <p>identificado problema</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%.</p> <p>ajustando carga UC2-2: 0.33kW,0.33kvar</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 1:0.0h</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 1:10.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:</p> <p>identificado problema</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%.</p> <p>ajustando carga UC3-2: 0.33kW,0.33kvar</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 1:20.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:</p> <p>identificado problema</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 0%.</p> <p>ajustando carga UC1-2: 0.0kW,0.0kvar</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 1:30.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:</p> <p>identificado problema</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 0%.</p> <p>ajustando carga UC2-2: 0.0kW,0.0kvar</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 1:40.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']</p> <p>=====</p>	<p>simulated time: 1:50.0h</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 2:0.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 2:10.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 2:20.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 2:30.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 2:40.0h</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 2:50.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 3:0.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 3:10.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 3:20.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 3:30.0h</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 3:40.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']</p> <p>=====</p> <p>simulated time: 3:50.0h</p> <p>subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:</p> <p>executou alteração anteriormente. Verificando possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']</p> <p>=====</p>
--	---

```

simulated time: 4:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 4:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 4:20.0h
=====
simulated time: 4:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 4:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 4:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 5:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 5:10.0h
=====
simulated time: 5:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 5:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 5:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 5:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 6:0.0h
=====
simulated time: 6:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']

```

```

=====
simulated time: 6:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 6:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 6:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 6:50.0h
=====
simulated time: 7:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 7:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 7:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 7:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 7:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 7:50.0h
=====
simulated time: 8:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 8:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 8:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
ajustando carga UC3-2: 0.0kW,0.0kvar
=====
simulated time: 8:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema

```



```

=====
simulated time: 8:40.0h
=====
simulated time: 8:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 9:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 9:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 9:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 9:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 9:40.0h
=====
simulated time: 9:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 10:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 10:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 10:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 10:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 10:40.0h
=====
simulated time: 10:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 11:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 11:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 11:20.0h
=====
simulated time: 11:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 11:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 11:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 12:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 12:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 12:20.0h
=====
simulated time: 12:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 12:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 12:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 13:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 13:10.0h
=====
simulated time: 13:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 13:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 13:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====

```

```

simulated time: 13:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 14:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 14:10.0h
=====
simulated time: 14:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 14:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 14:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 14:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 15:0.0h
=====
simulated time: 15:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 15:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 15:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 15:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 15:50.0h
=====
simulated time: 16:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']

```

```

=====
simulated time: 16:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 16:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 16:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 16:40.0h
=====
simulated time: 16:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 17:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
identificado problema
=====
simulated time: 17:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 17:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
=====
simulated time: 17:30.0h
=====
simulated time: 17:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
religando cargas ['UC3-2']
subtensao_rede_distribuicao_rural      desfaz
ajustes da carga UC3-2 para 0.33kW, 0.33kvar
subtensao_rede_distribuicao_rural      desfaz
ajustes da carga UC3-2 para 0.33kW, 0.33kvar
subtensao_rede_distribuicao_rural      desfaz
ajustes da carga UC3-2 para 0.33kW, 0.33kvar
=====
simulated time: 17:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 18:0.0h

```

subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
 =====
 simulated time: 18:10.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
 =====
 simulated time: 18:20.0h
 =====
 simulated time: 18:30.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
 =====
 simulated time: 18:40.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
 =====
 simulated time: 18:50.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
 =====
 simulated time: 19:0.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
 =====
 simulated time: 19:10.0h
 =====
 simulated time: 19:20.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
 =====
 simulated time: 19:30.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
 subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:
 religando cargas ['UC2-2']
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC2-2 para 1.0kW, 1.0kvar
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC2-2 para 1.0kW, 1.0kvar
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC2-2 para 1.0kW, 1.0kvar
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC2-2 para 1.0kW, 1.0kvar
 =====
 simulated time: 19:40.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
 subtensao_rede_distribuicao_rural 60%:
 religando cargas ['UC3-2']

subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC3-2 para 1.0kW, 1.0kvar
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC3-2 para 1.0kW, 1.0kvar
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC3-2 para 1.0kW, 1.0kvar
 =====
 simulated time: 19:50.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 religando cargas ['UC1-2']
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC1-2 para 0.6kW, 0.6kvar
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC1-2 para 0.6kW, 0.6kvar
 subtensao_rede_distribuicao_rural desfaz
 ajustes da carga UC1-2 para 0.6kW, 0.6kvar
 =====
 simulated time: 20:0.0h
 =====
 simulated time: 20:10.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
 =====
 simulated time: 20:20.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
 =====
 simulated time: 20:30.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
 =====
 simulated time: 20:40.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
 =====
 simulated time: 20:50.0h
 =====
 simulated time: 21:0.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
 =====
 simulated time: 21:10.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 33%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
 =====
 simulated time: 21:20.0h
 subtensao_rede_distribuicao_rural 0%:
 executou alteração anteriormente. Verificando
 possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
 =====
 simulated time: 21:30.0h

```

=====
simulated time: 21:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
ajustando carga UC2-2: 0.0kW,0.0kvar
=====
simulated time: 21:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
identificado problema
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
ajustando carga UC3-2: 0.0kW,0.0kvar
=====
simulated time: 22:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 22:10.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
identificado problema
=====
simulated time: 22:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 22:30.0h
=====
simulated time: 22:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 22:50.0h

subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 23:0.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 23:10.0h
=====
simulated time: 23:20.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      0%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC3-2']
=====
simulated time: 23:30.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC1-2']
=====
simulated time: 23:40.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      60%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 23:50.0h
subtensao_rede_distribuicao_rural      33%:
executou alteração anteriormente. Verificando
possibilidade de religação das cargas ['UC2-2']
=====
simulated time: 24:0.0h
=====

```

**APÊNDICE K – RELATÓRIO DE EVENTOS, TRANSGRESSÕES E ATUAÇÕES
DO GRD: CENÁRIO DE SUBTENSÃO DO ALIMENTADOR AL-4**

=====		=====	
simulated time: 0:10.0h		simulated time: 1:50.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
identificado problema		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%.	=====	
ajustando carga UC1-4: 0.6kW,0.6kvar		simulated time: 2:0.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 0:20.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	=====	
identificado problema		simulated time: 2:10.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%.	subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
ajustando carga UC2-4: 0.6kW,0.6kvar		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 0:30.0h		simulated time: 2:20.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
identificado problema		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%.	=====	
ajustando carga UC3-4: 0.6kW,0.6kvar		simulated time: 2:30.0h	
=====		=====	
simulated time: 0:40.0h		simulated time: 2:40.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
identificado problema		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%.	=====	
ajustando carga UC1-4: 0.33kW,0.33kvar		simulated time: 2:50.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 0:50.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 3:0.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%.	subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
ajustando carga UC2-4: 0.33kW,0.33kvar		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 1:0.0h		simulated time: 3:10.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
identificado problema		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%.	=====	
ajustando carga UC3-4: 0.33kW,0.33kvar		simulated time: 3:20.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 1:10.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 3:30.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%.	=====	
ajustando carga UC1-4: 0.0kW,0.0kvar		simulated time: 3:40.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 1:20.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 3:50.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%.	subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
ajustando carga UC2-4: 0.0kW,0.0kvar		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 1:30.0h		simulated time: 4:0.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
identificado problema		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%.	=====	
ajustando carga UC3-4: 0.0kW,0.0kvar		simulated time: 4:10.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 1:40.0h		identificado problema	

=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 4:20.0h		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 4:30.0h		simulated time: 7:10.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 7:20.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 4:40.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 7:30.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 4:50.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 7:40.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 5:0.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 7:50.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 5:10.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 8:0.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 5:20.0h		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 5:30.0h		simulated time: 8:10.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	=====	
identificado problema		simulated time: 8:20.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 5:40.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	=====	
identificado problema		simulated time: 8:30.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 5:50.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	=====	
identificado problema		simulated time: 8:40.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 6:0.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 8:50.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 6:10.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 9:0.0h	
=====		=====	
simulated time: 6:20.0h		simulated time: 9:10.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 6:30.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 9:20.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 6:40.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 9:30.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 6:50.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 9:40.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 7:0.0h		identificado problema	

=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 9:50.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 12:40.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 10:0.0h		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 10:10.0h		simulated time: 12:50.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 13:0.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 10:20.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 13:10.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 10:30.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 13:20.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 10:40.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 13:30.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 10:50.0h		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 11:0.0h		simulated time: 13:40.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	=====	
identificado problema		simulated time: 13:50.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 11:10.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	=====	
identificado problema		simulated time: 14:0.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 11:20.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	=====	
identificado problema		simulated time: 14:10.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 11:30.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 14:20.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 11:40.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 14:30.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 11:50.0h		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 12:0.0h		simulated time: 14:40.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
identificado problema		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 12:10.0h		simulated time: 14:50.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 15:0.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 12:20.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	=====	
identificado problema		simulated time: 15:10.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
simulated time: 12:30.0h		identificado problema	

=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
simulated time: 15:20.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 18:10.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 15:30.0h		identificado problema	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	=====	
identificado problema		simulated time: 18:20.0h	
=====		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
simulated time: 15:40.0h		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 15:50.0h		simulated time: 18:30.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
identificado problema		identificado problema	
=====		=====	
simulated time: 16:0.0h		simulated time: 18:40.0h	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
identificado problema		executou alteração anteriormente. Verificando	
=====		possibilidade de religação das cargas [UC1-4]	
simulated time: 16:10.0h		=====	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	simulated time: 18:50.0h	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 19:0.0h	
simulated time: 16:20.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	identificado problema	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 19:10.0h	
simulated time: 16:30.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	identificado problema	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 19:20.0h	
simulated time: 16:40.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:	identificado problema	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 19:30.0h	
simulated time: 16:50.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
=====		identificado problema	
simulated time: 17:0.0h		=====	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	simulated time: 19:40.0h	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 19:50.0h	
simulated time: 17:10.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	identificado problema	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 20:0.0h	
simulated time: 17:20.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	identificado problema	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 20:10.0h	
simulated time: 17:30.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	identificado problema	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 20:20.0h	
simulated time: 17:40.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	identificado problema	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 20:30.0h	
simulated time: 17:50.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:
=====		identificado problema	
simulated time: 18:0.0h		=====	

simulated time: 20:40.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:
=====		identificado problema	
simulated time: 20:50.0h		=====	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	simulated time: 23:30.0h	
identificado problema		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
=====		identificado problema	
simulated time: 21:0.0h		=====	
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:	simulated time: 23:40.0h	
identificado problema		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
=====		identificado problema	
simulated time: 21:10.0h		=====	
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	simulated time: 23:50.0h	
identificado problema		=====	
=====		simulated time: 24:0.0h	
simulated time: 21:20.0h		subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:	identificado problema	
identificado problema		=====	
=====			
simulated time: 21:30.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 21:40.0h			
=====			
simulated time: 21:50.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 22:0.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 22:10.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	60%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 22:20.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 22:30.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 22:40.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	33%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 22:50.0h			
=====			
simulated time: 23:0.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 23:10.0h			
subtensao_rede_distribuicao_rural	0%:		
identificado problema			
=====			
simulated time: 23:20.0h			