



Desenvolvimento de um controlador de lógica fuzzy para irrigação por gotejamento

Francisco Fábio de Oliveira¹, Roger Immich¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Instituto Metr pole Digital - IMD
Natal – RN – Brazil

ffabioliveira81@gmail.com, roger@imd.ufrn.br

Abstract. *Drip irrigation is a technique that can contribute to food security by increasing crop productivity and reducing water consumption. One of the challenges faced by farmers is determining the optimal time and amount of irrigation for each crop and environmental conditions. Inadequate irrigation management can lead to water losses through evaporation or deep percolation, as well as water stress or excess water in plants. In this context, this work proposes a fuzzy logic algorithm for drip irrigation that can adjust the time and irrigation interval according to the crop development phase, soil texture, evapotranspiration and rainfall. The experiments demonstrate that the controller is capable of estimating the irrigation time and interval, considering the input variables defined in the model. The controller contributes to more efficient and sustainable drip irrigation, as it avoids water waste and water stress on plants. This also facilitates management, as it reduces the need for human intervention and provides intelligent feedback for decision making.*

Resumo. *A irrigação por gotejamento é uma técnica que pode contribuir para a segurança alimentar, aumentando a produtividade das culturas e reduzindo o consumo de água. Um dos desafios enfrentados pelos agricultores é o de determinar o momento e a quantidade ótimos de irrigação para cada cultura e condições ambientais. Um manejo inadequado da irrigação pode levar a perdas de água por evaporação ou percolação profunda, bem como a estresse hídrico ou excesso de água nas plantas. Neste contexto, este trabalho propõe um algoritmo de lógica fuzzy para irrigação por gotejamento que possa ajustar o tempo e o intervalo de irrigação conforme a fase de desenvolvimento da cultura, a textura do solo, a evapotranspiração e a precipitação pluviométrica. Os experimentos demonstram que o controlador é capaz de estimar o tempo e o intervalo de irrigação, considerando as variáveis de entrada definidas no modelo. O controlador contribui para uma irrigação por gotejamento mais eficiente e sustentável, pois evita o desperdício de água e o estresse hídrico nas plantas. Este também facilita o manejo, pois reduz a necessidade de intervenção humana e fornece um feedback inteligente para a tomada de decisão.*

1. Introdução

Garantir a segurança alimentar para uma população global crescente sob restrições de recursos é um dos maiores desafios globais, mas também pode exacerbar outros problemas ambientais. A produção de alimentos consome grandes quantidades de água, energia e fertilizantes e causa danos ambientais, como aquecimento global e poluição [Xu et al. 2020]. Além disso, cerca de 70% da superfície terrestre total do mundo está sob manejo humano, o que está alterando a paisagem da Terra e as interações homem-água. Essas intervenções no ciclo hidrológico, por exemplo através da irrigação de áreas cultivadas, podem aumentar os extremos hidrológicos, como inundações e secas, e requerem uma maior expansão no futuro para atender à crescente demanda por alimentos e energia [Al-Yaari et al. 2022]

A irrigação por gotejamento é uma técnica que pode contribuir para a segurança alimentar, aumentando a produtividade das culturas e reduzindo o consumo de água, mas também requer um manejo cuidadoso para evitar impactos negativos ao meio ambiente e ao ciclo hidrológico. Além disso, sua notável eficiência está ligada ao controle preciso do volume de água fornecido ao cultivo, tornando-o especialmente adequado para regiões com recursos hídricos limitados [Caetano et al. 2020]. No entanto, a irrigação por gotejamento também requer um controle cuidadoso do momento e da quantidade de irrigação, que dependem de muitos fatores dinâmicos e incertos, como tipo de solo, estágio da cultura, condições climáticas e características do sistema de irrigação.

Um dos desafios enfrentados pelos agricultores que utilizam a irrigação por gotejamento é determinar o momento e a quantidade ótimos de irrigação para cada cultura e condições ambiental. Um manejo inadequado da irrigação pode levar a perdas de água por evaporação ou percolação profunda, bem como a estresse hídrico ou excesso de água nas plantas. Portanto, é necessário desenvolver ferramentas que possam auxiliar os agricultores na tomada de decisões sobre a irrigação por gotejamento de forma eficiente e sustentável. Neste sentido destaca-se a importância da computação em nuvem [Bittencourt et al. 2018] e a utilização de dispositivos com capacidades reduzidas [Pisani et al. 2020], permitindo amenizar o aumento de dados gerados por dispositivos *IoT*, reduzindo latências e melhorando a eficiência das operações [do Prado et al. 2021, Rodrigues et al. 2019].

Os sistemas de consciência situacional são sistemas que monitoram e analisam o ambiente e fornecem *feedback* para apoiar a tomada de decisão. A lógica *fuzzy* é utilizada no desenvolvimento de sistemas de consciência situacional para lidar com a incerteza e a imprecisão inerentes ao processo de avaliação [Immich et al. 2014]. Ela permite a representação e o processamento de informações imprecisas por meio de conjuntos linguísticos difusos, o que facilita o entendimento humano e contribui para a formação de modelos mentais adequados [D'Aniello 2023].

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo é desenvolver um controlador algoritmo de lógica *fuzzy* para irrigação por gotejamento que possa ajustar o tempo e o intervalo do sistema de irrigação. O controlador utilizou como entradas dados sobre a fase de desenvolvimento da cultura, a textura do solo, a evapotranspiração e a precipitação. Além disso, o controlador foi aplicado com dados simulados para avaliar o seu desempenho. Por fim, o controlador pôde se adaptar a diferentes zonas de irrigação ao receber as entradas correspondentes a cada zona.

Este trabalho está organizado conforme apresentado a seguir. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados sobre irrigação por gotejamento e lógica *fuzzy*. A Seção 3 descreve o modelo proposto para o desenvolvimento do algoritmo de lógica *fuzzy* para

irrigação por gotejamento. A Seção 4 mostra os resultados obtidos com a simulação do algoritmo em diferentes cenários. A Seção 5 discute as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2. Trabalhos relacionados

Nesta seção, são apresentados alguns trabalhos que propõem soluções de lógica *fuzzy* para controlar ou avaliar o tempo de irrigação em sistemas agrícolas, considerando diferentes fatores que influenciam na demanda de água das plantas. Comparados a esses trabalhos, o presente estudo apresenta diferenças e contribuições significativas, que são descritas a seguir.

Um estudo recente propõe um sistema de gotejamento ou micro-irrigação que utiliza dados ambientais coletados por sensores (umidade do solo, temperatura do solo, umidade do ar, nível de água e condições climáticas) para gerar previsões baseadas em regras *fuzzy* (necessidade de irrigação, nível de crescimento da planta e eficiência do uso da água) [Vivekanandhan et al. 2022]. O sistema é validado por meio de um sistema de inferência neuro-*fuzzy* adaptativo, que é uma combinação de redes neurais artificiais e lógica *fuzzy*, capaz de aprender e ajustar os parâmetros *fuzzy* a partir de dados. O sistema pode ser ajustado de acordo com o tipo de planta, o tipo de solo e o ambiente.

Outra abordagem relevante é apresentada em um estudo que descreve um sistema de irrigação por gotejamento automático baseado em lógica *fuzzy* que leva em conta a temperatura e a umidade do solo para determinar o tempo da bomba de água e da luz [Dianty et al. 2021]. O sistema é comparado com um experimento e pode ser adaptado para diferentes tipos de plantas que requerem umidade e temperatura específicas.

Outro trabalho de interesse desenvolve um sistema de aspersão baseado em lógica *fuzzy* que utiliza a temperatura do solo, a umidade do solo e a umidade da folha para controlar o fluxo do aspersor [Aggarwal and Thakur 2019]. O sistema é simulado em *MATLAB* e *Simulink* e é específico para culturas de Brassica.

Em um estudo adicional, não é especificado o tipo de sistema de irrigação, mas são consideradas as entradas de umidade do solo, temperatura, umidade, chuva, energia solar e nível de água para gerar as saídas de controle do motor, do painel de proteção e mensagens de reconhecimento [Krishnan et al. 2020]. O sistema é implementado em *hardware* e controlado por um aplicativo *Android*. O sistema pode ser adaptado para diferentes culturas dependendo dos parâmetros e regras *fuzzy* definidos.

Um estudo semelhante também utiliza umidade do solo e temperatura como entradas para calcular a duração de irrigação como saída, embora não especifique o tipo de sistema [Widyawati and Ambarwari 2021]. O sistema é comparado com a lógica *fuzzy* no *NodeMCU ESP8266*, que é um microcontrolador com *Wi-Fi* integrado, e no *MATLAB* e pode ser ajustado dependendo dos parâmetros e regras da lógica *fuzzy*.

Por fim, outra pesquisa propõe uma irrigação por gotejamento controlada por lógica *fuzzy* que usa a umidade do solo, a temperatura e o nível de nutrientes como entradas para acionar a bomba de água e os nutrientes como saídas [Ali 2022]. O sistema é validado pelo cálculo do erro absoluto entre os valores reais e calculados e pode ser adaptado para diferentes culturas dependendo das regras *fuzzy* definidas para cada uma.

Com base nos trabalhos relacionados, o presente estudo destaca-se por sua abordagem abrangente e flexível no desenvolvimento do controlador proposto para irrigação por gotejamento. Enquanto alguns trabalhos anteriores se concentram em um conjunto limitado de entradas, o controlador proposto utiliza um conjunto mais amplo e diversifi-

cado de informações, incluindo a fase de desenvolvimento da cultura, a textura do solo, a evapotranspiração e a precipitação. Essa variedade de variáveis permite que o controlador tome decisões mais precisas e contextuais sobre a irrigação.

Uma das principais características distintivas do algoritmo proposto é sua capacidade de se adaptar a diferentes tipos de culturas e solos, considerando as variáveis de entradas mencionadas. O algoritmo utiliza o ciclo total da cultura em dias para definir os termos *fuzzy* para a fase de desenvolvimento da cultura e a porcentagem de argila do solo para definir os termos *fuzzy* para a textura do solo. Essa flexibilidade e customização permitem ao algoritmo ajustar os parâmetros de irrigação. Com isso, o controlador se torna mais eficiente e adaptável para diferentes tipos de culturas e zonas de irrigação, bastando informar as entradas correspondentes a cada caso.

Além disso, ao contrário de alguns estudos que se limitam a ajustar apenas o tempo de irrigação, o controlador proposto é projetado para adaptar tanto o tempo quanto o intervalo do sistema de irrigação. Essa característica permite que o controlador forneça uma regulação mais precisa da quantidade de água fornecida às plantas.

3. Modelo proposto

A Figura 1 ilustra o diagrama de blocos do Controlador de Lógica *Fuzzy*. A solução consiste em três componentes principais: um módulo *fuzzificação* que converte as entradas em conjuntos linguísticos difusos; um módulo de inferência que aplica um conjunto de regras para obter a saída *fuzzy*; e um módulo *defuzzificação* que converte a saída difusa em um valor nítido para irrigação. Detalhes adicionais sobre o controlador são descritos a seguir.

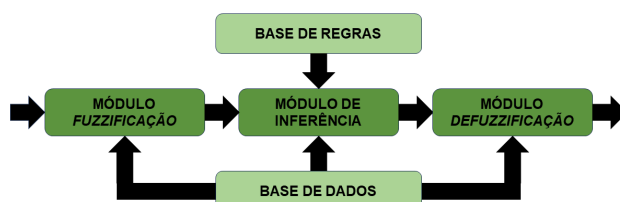


Figura 1. Diagrama de blocos do Controlador de Lógica Fuzzy

O algoritmo de controlador de irrigação em lógica *fuzzy* proposto recebe quatro variáveis de entrada: fase de desenvolvimento da cultura (em dias), textura do solo (em porcentagem argila), evapotranspiração (em milímetros por dia) e precipitação pluviométrica (em milímetros). Essas variáveis foram escolhidas por serem relevantes para determinar a demanda hídrica das plantas e o balanço hídrico do solo. O sistema produz duas variáveis de saída: tempo do sistema de irrigação (em minutos) e intervalo entre as irrigações (em horas). Essas variáveis definem o cronograma e a quantidade ótimos de irrigação para cada zona de irrigação.

Uma das principais características do algoritmo é a sua capacidade de se adaptar a diferentes tipos de culturas e solos, considerando as suas variáveis de entrada. O algoritmo usa o ciclo total da cultura em dias para definir os termos *fuzzy* para a fase de desenvolvimento da cultura e usa a porcentagem argila do solo para definir os termos *fuzzy* para a textura do solo. Dessa forma, o algoritmo pode ajustar os parâmetros de irrigação. Essa flexibilidade e customização permitem ao algoritmo ser aplicado em diversas hortaliças e zonas de irrigação, bastando informar as entradas correspondentes a cada caso.

O módulo *fuzzificação* utiliza funções de pertinência trapezoidais e triangulares¹ para definir os termos *fuzzy* para cada variável. A Figura 2 mostra os termos *fuzzy* para as variáveis fase de desenvolvimento da cultura e textura do solo. A variável fase de desenvolvimento da cultura possui os termos inicial, desenvolvimento, produção e senescência, enquanto a variável textura do solo possui os termos arenosa, média e argilosa.

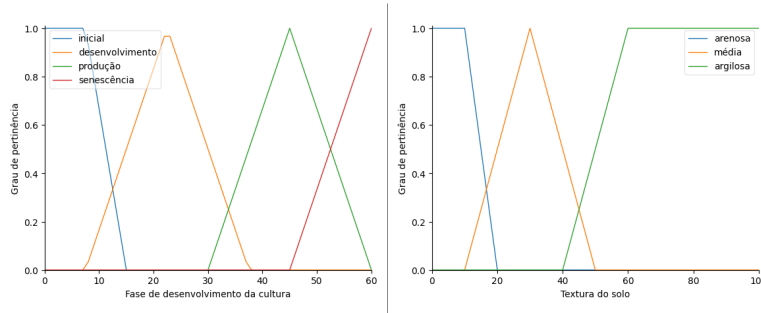


Figura 2. Funções de pertinência - fase de desenvolvimento e textura do solo

As Figuras 3 e 4 mostram os termos *fuzzy* para as variáveis evapotranspiração, precipitação pluviométrica, tempo de acionamento e intervalo entre as irrigações, respectivamente. A variável evapotranspiração possui os termos muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, assim como a variável precipitação pluviométrica. A variável tempo de acionamento possui os termos curto, moderado e longo, assim como a variável intervalo entre as irrigações.

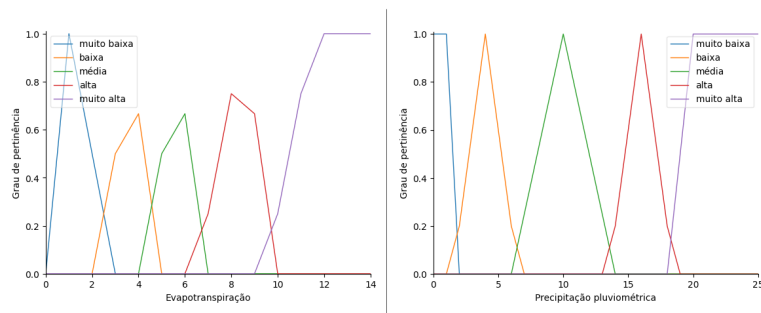


Figura 3. Funções de pertinência - evapotranspiração e precip. pluviométrica

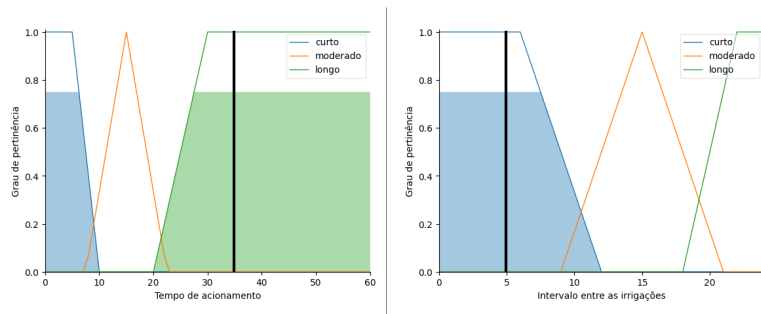


Figura 4. Funções de pertinência - tempo de acionamento e intervalo

As regras *fuzzy* são do tipo SE-ENTÃO, onde a parte SE contém as condições das variáveis de entrada e a parte ENTÃO contém as consequências das variáveis de saída. Por exemplo, a primeira regra pode ser escrita como:

¹As funções trapezoidais são definidas por quatro pontos que formam um trapézio, enquanto as funções triangulares são definidas por três pontos que formam um triângulo. O grau de pertinência indica o quanto uma variável pertence a um determinado conjunto *fuzzy*.

SE fase de desenvolvimento da cultura é 'inicial' E textura do solo é 'arenosa' E evapotranspiração é 'muito baixa' ENTÃO tempo de acionamento é 'curto' E intervalo entre as irrigações é 'curto'.

O módulo *defuzzificação* utiliza o método do centroide para converter a saída *fuzzy* em um valor nítido para irrigação. O método do centroide calcula o ponto médio da área sob a curva da saída *fuzzy*, que representa o valor ótimo de irrigação.

O algoritmo foi implementado utilizando bibliotecas *fuzzy* para *Python*, como *scikit-fuzzy* e *skfuzzy*. O algoritmo recebe os valores das variáveis de entrada, realiza o cálculo *fuzzy* e retorna os valores das variáveis de saída. O algoritmo também gera gráficos das variáveis, que permitem visualizar os termos *fuzzy* e os resultados da *fuzzificação*, inferência e *defuzzificação*.

4. Simulação

Para avaliar o desempenho do controlador de lógica *fuzzy* proposto, realizamos uma simulação usando dados sintéticos gerados a partir de distribuições aleatórias. Os dados simulados representam diferentes cenários de irrigação por gotejamento para diferentes culturas e solos, considerando as variáveis de entrada e saída definidas no modelo. A simulação foi realizada usando a linguagem de programação *Python*, que permite a implementação e a visualização do sistema de controle *fuzzy* usando a biblioteca *skfuzzy*.

4.1. Estimativa do tempo e do intervalo de irrigação por gotejamento simulados

A Tabela 1 mostra um exemplo dos dados gerados usados na análise, contendo os valores das variáveis de entrada (fase de desenvolvimento da cultura em dias, textura do solo em porcentagem de argila, evapotranspiração em mm/dia e precipitação em mm) e as variáveis de saída estimadas pelo controlador (tempo de acionamento em minutos e intervalo entre as irrigações em horas). Os valores das variáveis de entrada foram criados aleatoriamente dentro dos intervalos definidos pelas funções de pertinência *fuzzy*, enquanto os valores das variáveis de saída foram obtidos pelo cálculo *fuzzy* realizado pelo controlador. O ciclo total da cultura em dias é uma variável que define os termos *fuzzy* para a fase de desenvolvimento da cultura, usando porcentagens do ciclo total.

Tabela 1. Dados da cultura agrícola.

Ciclo (dias)	Fase (dias)	Textura do solo (%)	ET (mm/dai)	Precip. (mm)	Acion. (min.)	Intervalo (horas)
34	4	10	2	5	29.18	8.32
40	5	30	5	7	7.26	6.88
45	6	20	4	10	8.83	9.74
50	6	25	5	12	9.38	8.74
55	7	30	6	15	4.11	8.85
55	7	30	6	0	4.11	4.80
60	7	25	8	0	34.91	4.96
65	8	10	3	7	7.26	6.88
65	16	15	5	12	14.56	14.38
65	8	30	3	10	9.47	8.76
70	9	15	6	17	4.72	11.10
70	9	10	4	12	8.73	8.12
75	1	20	4	12	9.68	9.03
75	9	30	4	12	8.67	8.05
75	19	25	8	22	8.71	18.12
75	9	25	8	0	34.91	4.96

A Tabela 1 mostra como o tempo de acionamento do sistema de irrigação varia de acordo com as condições da cultura e do clima. Esse tempo indica quanto o sistema deve irrigar para fornecer água adequada para a cultura. Por exemplo, na primeira linha

da tabela, o tempo de acionamento é de 29.19 minutos para uma fase de desenvolvimento inicial (4 dias), em solo arenoso (10% de argila), com muito baixa evapotranspiração (2mm/dia) e precipitação baixa (5mm). Na última linha, o tempo acionamento é de 34.91 minutos para uma cultura inicial (9 dias), em solo médio (25% de argila), com alta evapotranspiração (8mm/dia) e sem chuva. Isso mostra o ajuste do controlador *fuzzy* ao cenário da cultura.

4.2. Discussão dos resultados e implicações para a irrigação por gotejamento

A simulação realizada mostrou que o controlador de lógica *fuzzy* proposto é capaz de estimar o tempo e o intervalo de irrigação por gotejamento de forma adequada, considerando as condições ambientais e as necessidades específicas da cultura. O controlador se adapta a diferentes tipos de culturas e solos, ajustando os parâmetros de irrigação. O controlador também leva em conta a evapotranspiração e a precipitação pluviométrica, que influenciam na demanda hídrica das plantas e no balanço hídrico do solo.

Os resultados da simulação indicam que o controlador tende a aumentar o tempo e diminuir o intervalo de irrigação quando a evapotranspiração é alta e a precipitação é baixa, ou seja, quando há maior perda de água pelo solo e pelas plantas e menor reposição natural da água. Por outro lado, o controlador tende a diminuir o tempo e aumentar o intervalo de irrigação quando a evapotranspiração é baixa e a precipitação é alta, ou seja, quando há menor perda de água pelo solo e pelas plantas e maior reposição natural da água. Além disso, o controlador considera a fase de desenvolvimento da cultura e a textura do solo para ajustar o tempo e o intervalo de irrigação, pois esses fatores também afetam a demanda hídrica das plantas e a capacidade de retenção de água no solo.

Dessa forma, o controlador contribui para uma irrigação por gotejamento mais eficiente e sustentável, pois evita o desperdício de água por evapotranspiração ou percolação profunda, bem como o estresse hídrico ou excesso de água nas plantas. Esses fatores podem afetar negativamente o crescimento e o rendimento das culturas, bem como a qualidade dos produtos agrícolas. Portanto, o controlador pode auxiliar os agricultores na tomada de decisões sobre a irrigação por gotejamento, fornecendo uma regulação mais precisa.

No entanto, ainda há espaço para melhorias no controlador, pois ele não considera que a precipitação pluviométrica pode variar ao longo do tempo e do espaço, podendo ocorrer chuvas localizadas ou irregulares que não atendam a demanda hídrica das plantas. Nesse caso, o ideal seria reduzir ainda mais o tempo e aumentar ainda mais o intervalo de irrigação com o aumento das precipitações, para evitar o excesso de água no solo e nas plantas. Esse aspecto será corrigido nas próximas versões do sistema.

5. Considerações Finais

Neste trabalho, foi desenvolvido um controlador algoritmo de lógica *fuzzy* para irrigação por gotejamento capaz de ajustar o tempo e o intervalo do sistema de irrigação. Este utiliza como entradas a fase de desenvolvimento da cultura, a textura do solo, a evapotranspiração e a precipitação pluviométrica. Além disso, ele se adapta a diferentes tipos de culturas e solos. Os experimentos realizados mostraram que o controlador é capaz de estimar o tempo e o intervalo de irrigação, considerando as variáveis de entrada definidas no modelo. Desta forma, ele contribui para uma irrigação por gotejamento mais eficiente e sustentável, evitando o desperdício de água e o estresse hídrico. O controlador também facilita o manejo da irrigação por gotejamento, pois reduz a necessidade de intervenção humana e fornece um *feedback* inteligente para a tomada de decisão. Com trabalhos futuros, pretendemos validar o controlador com dados reais coletados em campo,

bem como compará-lo com outros métodos de controle de irrigação. Outra possibilidade é aprimorar o controlador para que ele possa considerar a variabilidade espacial e temporal da precipitação pluviométrica. Além disso, propõe-se desenvolver uma interface gráfica para o controlador, que possa ser acessada por meio de dispositivos móveis.

Referências

- Aggarwal, P. and Thakur, A. (2019). Fuzzy interface automatic brassica horticulture hoop house. In *2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, page 297 – 302.
- Al-Yaari, A., Ducharne, A., Thiery, W., Cheruy, F., and Lawrence, D. (2022). The role of irrigation expansion on historical climate change: insights from cmip6. *Earth's Future*, 10(11).
- Ali, S. (2022). Parametric estimation and optimization of automatic drip irrigation control system using fuzzy logic. In *2022 International Conference on Emerging Trends in Electrical, Control, and Telecommunication Engineering (ETECTE)*.
- Bittencourt, L., Immich, R., Sakellariou, R., Fonseca, N., Madeira, E., Curado, M., Villas, L., DaSilva, L., Lee, C., and Rana, O. (2018). The internet of things, fog and cloud continuum: Integration and challenges. *Internet of Things*, 3-4:134 – 155.
- Caetano, G. S. F., Zanguetin, J. A., and Querino Filho, L. C. (2020). Sistema de irrigação por gotejamento no tomateiro. *Revista Eletrônica e-Fatec*, 10(1):10–10.
- Dianty, R., Mardiaty, R., Mulyana, E., and Supriadi, D. (2021). Design of humidity control with automatic drip irrigation system based on fuzzy logic using node-red and mqtt on cactus plants. In *7th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*.
- do Prado, P. F., Peixoto, M. L. M., Araújo, M. C., Gama, E. S., Gonçalves, D. M., Silva, M. V. S., Immich, R., Madeira, E. R. M., and Bittencourt, L. F. (2021). *Mobile Edge Computing for Content Distribution and Mobility Support in Smart Cities*, pages 473–500. Springer International Publishing, Cham.
- D'Aniello, G. (2023). Fuzzy logic for situation awareness: a systematic review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(4):4419–4438.
- Immich, R., Cerqueira, E., and Curado, M. (2014). Ensuring qoe in wireless networks with adaptive fec and fuzzy logic-based mechanisms. In *Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on*, pages 1687–1692.
- Krishnan, R. S., Julie, E. G., Robinson, Y. H., Raja, S., Kumar, R., Thong, P. H., et al. (2020). Fuzzy logic based smart irrigation system using internet of things. *Journal of Cleaner Production*, 252:119902.
- Pisani, F., de Oliveira, F., Gama, E. S., Immich, R., Bittencourt, L. F., and Borin, E. (2020). Fog computing on constrained devices: Paving the way for the future iot. *Advances in Edge Computing: Massive Parallel Processing and Applications*, 35:22.
- Rodrigues, D. O., Santos, F. A., Filho, G. P. R., Akabane, A. T., Cabral, R., Immich, R., Junior, W. L., Cunha, F. D., Guidoni, D. L., Silva, T. H., Rosario, D., Cerqueira, E., Loureiro, A. A. F., and Villas, L. A. (2019). *Computação urbana da teoria à prática: Fundamentos, aplicações e desafios*. Technical report, Minicurso do SBRC.
- Vivekanandhan, V., Sakthivel, S., and Manikandan, M. (2022). Adaptive neuro fuzzy inference system to enhance the classification performance in smart irrigation system. *Computational Intelligence*, 38(2):308–322.
- Widyawati, D. and Ambarwari, A. (2021). Fuzzy logic design to control the duration of irrigation time in the greenhouse. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volume 1012.
- Xu, Z., Chen, X., Liu, J., Zhang, Y., Chau, S., Bhattarai, N., Wang, Y., Li, Y., Connor, T., and Li, Y. (2020). Impacts of irrigated agriculture on food–energy–water–co2 nexus across metacoupled systems. *Nature communications*, 11(1):5837.