

Um Sistema Fuzzy para Redução do Consumo Energético e Manutenção da Qualidade de Serviço de Redes de Sensores Sem Fio

Jaevillen F. Oliveira, Matheus G. Pires

¹Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
Feira de Santana – BA – Brasil

jaevillenooliveira@gmail.com, mgpires@uefs.br

Abstract. *This paper proposes the use of Fuzzy Rule-Based Systems to control (on/off) of Wireless Sensor Networks access points, in order to reduce their energy consumption, and at the same time, maintaining the Quality of Service, which was measured by packet loss rate. To demonstrate the efficiency of our proposal, it was compared with three other approaches. According to the results obtained, it was possible to demonstrate increased gains, both in reducing energy consumption and reducing packet loss rate, in relation to the other three.*

Resumo. *Este trabalho propõe o uso de Sistemas Baseados em Regras Fuzzy para controlar o funcionamento (ligado/desligado) dos pontos de acesso de Redes de Sensores Sem Fio, com objetivo de reduzir seu consumo energético, e ao mesmo tempo, mantendo a qualidade de serviço da rede, a qual foi medida pela taxa de perda de pacotes. Para demonstrar a eficiência da nossa proposta, ela foi comparada com outras três abordagens. De acordo com o resultados obtidos, foi possível demonstrar ganhos superiores, tanto na redução do consumo de energia quanto na redução da taxa de perda de pacotes, em relação às outras três.*

1. Introdução

O conceito de Cidades Inteligentes (*Smart Cities*) consiste em projetos que implementam tecnologias no espaço das cidades com intuito de promover melhores experiências e condições de vida para seus moradores. Nessa área de pesquisa, uma das maiores aplicações são os sistemas de monitoramento, que envolvem, principalmente, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) [Akyildiz et al. 2002], para a coleta de dados, e Internet das Coisas (IoT) [Mena et al. 2018], para a transmissão dos dados coletados através da Internet.

As RSSF possuem pequena ou nenhuma infraestrutura. Elas consistem de nós sensores trabalhando juntos e monitorando uma região para obter dados daquele ambiente. Ao contrário das redes tradicionais, as RSSF possuem seu próprio *design* e restrições de recursos. Dentre as limitações de recursos destacam-se a quantidade limitada de energia, curto alcance de comunicação, pequena largura de banda e processamento e armazenamento limitados em cada nó [Yick et al. 2008].

A popularização do uso das RSSF, como por exemplo na indústria [Sarrafzadeh et al. 2006], agricultura [Mohd Kassim et al. 2014], medicina [Jafari et al. 2005, Gao et al. 2005], alerta a catástrofes naturais

[Castillo-Effer et al. 2004], aplicações militares [Stankovic 2008], entre outros, impulsionada pela diminuição do preço desta tecnologia, também apresenta um aumento na demanda por mais eficiência, principalmente a energética, que é um aspecto importante a ser considerado, pois afeta diretamente a qualidade na transmissão dos dados [Collotta et al. 2018].

Atualmente, abordagens baseadas em Inteligência Artificial, mais especificamente os Sistemas Baseados em Regras Fuzzy (SBRF) – os quais são embasados na Teoria dos Conjuntos Fuzzy, proposto por Zadeh [Zadeh 1965] – têm sido usados para controlar o comportamento das RSSF [Fanian et al. 2021] [Collotta et al. 2018] [Costa et al. 2017]. A grande vantagem da aplicação desse tipo de sistema é a capacidade que este possui em modelar e processar informações imprecisas, de uma forma mais robusta do que a lógica tradicional.

Assim, o objetivo deste trabalho é reduzir o consumo energético de RSSFs, e ao mesmo tempo, manter a qualidade de serviço da rede, controlando o funcionamento (ligado/desligado) dos pontos de acesso da rede, através do uso de um SBRF. Este sistema tomará a decisão de desligar ou não um determinado ponto de acesso, de acordo com as informações da topologia da rede e da quantidade e tipo de informações que estão sendo transmitidas.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados. Na Seção 3 são descritas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do ambiente de simulação de redes de sensores sem fio, além da configuração dos diferentes cenários de teste. Na Seção 4 são detalhadas as informações do sistema, tais como, modelagem fuzzy das variáveis de entrada e saída, base de regras e método de desfuzificação. Os experimentos e análise dos resultados são apresentados na Seção 5. Por fim, as conclusões são descritas na Seção 6.

2. Trabalhos Relacionados

A busca por eficiência energética tem sido um ponto de impacto na última década. Muitos trabalhos foram desenvolvidos desde então, e as soluções propostas vão desde evolução e melhoria de *hardware* até o uso de Inteligência Artificial para controle e gestão. Ao uso desse último recurso alguns trabalhos recentes se destacam na literatura.

O trabalho realizado por [Collotta et al. 2017] faz uso de um sistema fuzzy para controlar uma rede de sensores industrial. Esse tipo de rede utiliza dispositivos com fonte energética limitada, conectados a baterias. Portanto, seu consumo deve ser gerenciado de forma a aumentar a vida útil da rede. Para este fim, o sistema fuzzy proposto pelos autores avalia o nível de bateria e a taxa de *throughput/workload* de cada sensor, a fim de definir um tempo (em segundos) para que o dispositivo permaneça em *standby*. Os autores também se utilizam da técnica de otimização *Particle Swarm* para encontrar a melhor configuração dos parâmetros do sistema fuzzy.

Dos mesmos autores, no trabalho publicado em 2018 [Collotta et al. 2018], é proposto um sistema fuzzy para controlar uma rede multimídia de sensores sem fio. A ideia é desligar os pontos de acesso quando não fossem estritamente necessários para manter o funcionamento da rede, reduzindo assim o consumo energético global. O sistema fuzzy possuía quatro variáveis de entrada: *received signal strength indicator* (RSSI), número

de sensores, número de vizinhos e *throughput*. No entanto, com estas variáveis o sistema fuzzy não consegue garantir que todos os sensores permaneçam cobertos por pelo menos um ponto de acesso. Para contornar este problema, uma variável de controle externa foi inserida, para garantir que não desligasse mais da metade dos pontos de acesso, em qualquer circunstância de funcionamento da rede.

3. Ambiente de simulação

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado somente em ambientes simulados, os quais foram desenvolvidos utilizando a ferramenta Omnet++¹, versão 5.5.1. Além do Omnet++, foi usado o framework INET², versão 4.2.0, que é um modelo Omnet++ para redes com e sem fio e aplicações móveis. O INET, por ser uma plataforma de código aberto, possibilitou a implementação de funções específicas deste trabalho, tais como, a comunicação com um controlador fuzzy e a alteração da funcionalidade dos pontos de acesso (ligado/desligado) em tempo de execução.

As RSSF possuíam sensores dos tipos escalar, áudio e vídeo. Nas proximidades de cada ponto de acesso foi inserido um *sink*, que é responsável por receber pacotes. Dessa forma, cada ponto de acesso destina seus pacotes a um único *sink* e cada pacote chega a seu destino em um único salto. A comunicação entre os sensores, pontos de acesso e *sinks* foi realizada através do padrão IEEE 802.11g, que fornece uma largura de banda teórica de até 54Mbps. Os pacotes enviados possuíam tamanho de 1500 bytes e foram enviados em intervalos de tempo determinados através da distribuição de Poisson [Daskalakis et al. 2015].

Em relação aos experimentos foram simulados três cenários, os quais estão ilustrados na Figura 1. No primeiro cenário, a rede possui três pontos de acesso e sete sensores. No segundo são nove pontos de acesso e doze sensores, e no terceiro cenário são 15 pontos de acesso e 20 sensores. Para cada cenário são executados 10 testes, variando quantidade/tipo de sensores (ver Tabela 1) e os parâmetros de transmissão (ver Tabela 2). Cada teste possui um tempo de simulação de 240 segundos.

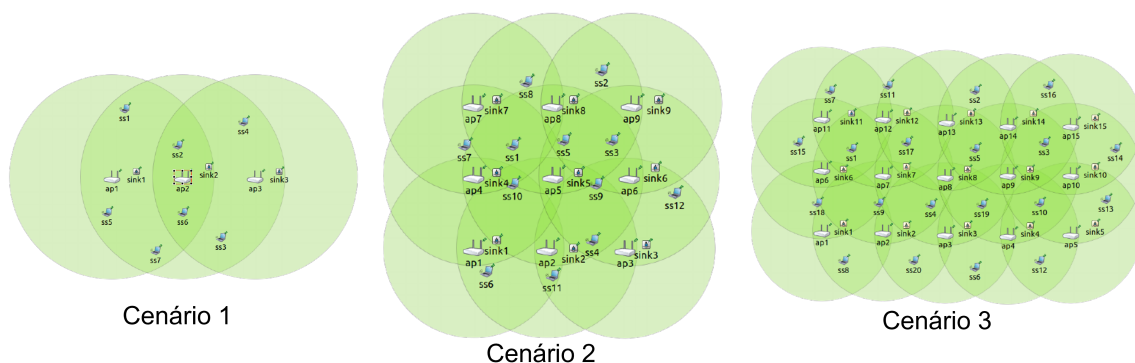


Figura 1. Cenários de simulação.

¹<https://omnetpp.org/>

²<https://inet.omnetpp.org/>

Tabela 1. Configuração dos cenários de teste.

	CENÁRIO 1										CENÁRIO 2										CENÁRIO 3									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Escalar	2	3	1	2	4	2	1	3	4	3	3	3	5	4	4	5	6	4	7	6	7	6	10	7	8	10	10	8	11	11
Áudio	1	2	3	3	1	2	3	2	2	3	3	5	2	5	4	4	2	6	2	4	6	9	4	8	8	7	4	10	4	6
Vídeo	4	2	3	2	2	3	3	2	1	1	6	4	5	3	4	3	4	2	3	2	7	5	6	5	4	3	6	2	5	3

Tabela 2. Padrões de transmissão dos sensores.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Escalar (bps)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Áudio (Kbps)	4	8	12	16	24	32	40	46	55	64
Vídeo (Mbps)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

4. Sistema Fuzzy

O Sistema Fuzzy (SF), responsável por controlar o funcionamento dos pontos de acesso, foi implementado utilizando o MATLAB³ e sua comunicação com o simulador da rede foi feita via *Sockets*⁴. Vale destacar, que em cada ponto de acesso há um controlador fuzzy associado. As variáveis de entrada do sistema descrevem as informações do ponto de acesso e a variável de saída indica se ele será desligado ou não. Para fazer a análise fuzzy o sistema ordena os pontos de acesso pelo valor de throughput, aqueles de menor throughput são avaliados primeiro. Se durante a iteração um ponto de acesso é desligado, os demais pontos da lista não são analisados. O processo de desligamento e varredura é realizado, e só na próxima iteração todos pontos serão novamente ordenados e reavaliados.

As variáveis de entrada são: **número de sensores**, que indica a quantidade de sensores conectados a um determinado ponto de acesso; **throughput**, indica o tráfego de pacotes através de um determinado ponto de acesso; e **cobertura**, que indica se dentre os sensores conectados há algum cujo único ponto de acesso visível é o atual. Nesse caso, se o ponto de acesso for desligado, o sensor ficaria descoberto. A variável de saída (**porcentagem ON/OFF**) indica a taxa para desligar ou não o ponto de acesso. Se a taxa for abaixo de 50%, ele permanece ligado, caso contrário, é desligado.

As variáveis número de sensores, *throughput* e porcentagem ON/OFF foram modeladas em três conjuntos fuzzy, distribuídos uniformemente no domínio de cada variável, com funções de pertinência triangulares. A variável cobertura foi modelada em dois conjuntos fuzzy *singleton*: i) indispensável e ii) dispensável. Ou seja, indispensável significa que há sensores que só podem se conectar a este ponto de acesso e dispensável significa que todos os sensores podem se conectar a outros pontos de acesso.

As variáveis foram escolhidas de forma que se complementem entre si, com o objetivo de informar o grau de importância que um ponto de acesso específico exerce sobre a rede. A variável número de sensores informa quantos sensores estão conectados em um determinado ponto de acesso. Nesse caso, se um ponto de acesso tem muitos sensores conectados, seria custoso desligá-lo, pois todos os sensores deveriam passar pelo processo de escaneamento da rede e pelos protocolos de reconhecimento para se conectar com ou-

³<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

⁴https://github.com/mhankowsky/crosslayermischief/tree/master/Omnet/CLM.2/crosslayermischief/Matlab_Bridge

Tabela 3. Modelagem das variáveis do sistema fuzzy.

	Número de sensores									Throughput			Porcentagem ON/OFF		
	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3			Cenários 1, 2 e 3			Cenários 1, 2 e 3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
BAIXO	0	0	3.5	0	0	6	0	0	10	0	0	50	0	0	50
MÉDIO	0	3.5	7	0	6	12	0	10	20	0	50	100	0	50	100
ALTO	3.5	7	7	6	12	12	10	20	20	50	100	100	50	100	100

tro ponto de acesso. Por outro lado, se há poucos sensores conectados, esse processo é mais simples e exige menos recursos.

A variável *throughput* informa a carga de trabalho de um ponto de acesso. Se esse valor está alto, significa que a energia gasta para mantê-lo ligado está sendo aproveitada. Caso contrário, mantê-lo ligado pode ser um desperdício de recursos, já que seu trabalho pode ser feito por um outro ponto de acesso vizinho.

A variável cobertura tem um papel de controle de segurança. Nos cenários de simulação definidos (Figura 1), um sensor está sempre ao alcance de pelo menos dois pontos de acesso. No entanto, é possível que com o passar do tempo, pontos de acesso próximos sejam desligados, deixando os sensores com poucas opções. A variável de cobertura impede que todos os pontos de acesso visíveis a um sensor sejam desligados, isto é, se em certo momento um determinado sensor só possui um ponto de acesso em sua área de alcance, esse ponto não poderá ser desligado.

Baseado nessa análise e na observação de simulações sem a utilização de qualquer tipo de controle sobre os pontos de acesso, a base de regras do sistema fuzzy foi construída e está descrita na Tabela 4. Vale destacar que a regra 1 possui apenas a variável cobertura no antecedente da regra, sendo assim, a regra 1 é lida da seguinte forma:

SE cobertura é **INDISPENSÁVEL ENTÃO** porcentagem ON/OFF é **BAIXO**

Tabela 4. Base de regras do sistema fuzzy.

Regra	Cobertura	Número de Sensores	Throughput	Porcentagem ON/OFF
1	INDISPENSÁVEL	-	-	BAIXO
2	DISPENSÁVEL	BAIXO	BAIXO	ALTO
3	DISPENSÁVEL	BAIXO	MÉDIO	MÉDIO
4	DISPENSÁVEL	BAIXO	ALTO	BAIXO
5	DISPENSÁVEL	MÉDIO	BAIXO	ALTO
6	DISPENSÁVEL	MÉDIO	MÉDIO	MÉDIO
7	DISPENSÁVEL	MÉDIO	ALTO	BAIXO
8	DISPENSÁVEL	ALTO	BAIXO	MÉDIO
9	DISPENSÁVEL	ALTO	MÉDIO	BAIXO
10	DISPENSÁVEL	ALTO	ALTO	BAIXO

5. Experimentos e análise dos resultados

Para analisar a eficiência do sistema fuzzy desenvolvido neste trabalho, que será referenciado nas tabelas a seguir por *Sistema Fuzzy proposto*, comparamos com outras três abordagens: *Sempre ligado*, *Aleatório* e *Collota et al. 2018*. Na abordagem *Sempre ligado*, os pontos de acesso estão sempre ligados. Na abordagem *Aleatório*, os pontos de

acesso são desligados de forma aleatória durante a simulação, porém obedecendo à uma restrição, que define que apenas metade do total dos pontos de acesso da rede podem ser desligados. A abordagem *Collota et al. 2018* implementa um sistema fuzzy proposto em [Collotta et al. 2018], que utilizou as seguintes variáveis de entrada: *received signal strength indicator* (RSSI), número de sensores, número de vizinhos e *throughput*. Conforme já mencionado na Seção 4, o sistema fuzzy que está sendo proposto neste trabalho utiliza as seguintes variáveis de entrada: número de sensores, *throughput* e cobertura.

Os resultados sobre o consumo total de energia e taxa de perda de pacotes das redes testadas e controladas por cada abordagem estão descritos nas Tabelas 5 e 6, respectivamente. As análises comparativas realizadas são em relação ao valor médio obtido a partir dos 10 casos de testes de cada cenário.

Tabela 5. Consumo energético (W).

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Média	Desvio Padrão
Cenário 1												
Sempre ligado	1,57	1,57	1,64	1,63	1,67	1,79	1,84	1,75	1,65	1,68	1,67	0,085
Aleatório	1,07	1,06	1,16	1,12	1,15	1,21	1,30	1,19	1,14	1,19	1,16	0,066
Collota et al. 2018	1,06	1,05	1,12	1,10	1,12	1,25	1,25	1,20	1,12	1,14	1,14	0,067
Sistema Fuzzy proposto	0,57	1,05	1,12	1,10	1,12	0,72	0,76	1,20	1,12	0,68	0,94	0,221
Cenário 2												
Sempre ligado	4,68	4,74	4,91	4,84	5,07	5,01	5,26	4,93	5,25	4,10	4,88	0,317
Aleatório	2,66	2,67	2,75	2,72	2,89	2,81	3,03	2,83	3,04	2,84	2,82	0,127
Collota et al. 2018	2,76	2,81	2,92	2,85	3,04	3,01	3,16	2,92	3,17	2,97	2,96	0,131
Sistema Fuzzy proposto	2,33	2,37	2,48	2,42	2,54	2,53	2,64	2,50	2,69	2,52	2,50	0,105
Cenário 3												
Sempre ligado	7,73	7,83	8,01	8,10	8,15	8,06	8,64	8,06	8,91	8,35	8,18	0,341
Aleatório	4,18	4,20	4,35	4,39	4,42	4,37	4,61	4,34	4,88	4,45	4,41	0,192
Collota et al. 2018	4,62	4,70	4,81	4,88	4,88	4,84	5,27	4,91	5,32	4,04	4,83	0,336
Sistema Fuzzy proposto	4,62	4,69	4,42	4,49	4,49	4,44	4,83	4,50	4,92	4,76	4,61	0,167

Tabela 6. Perda de pacotes (%).

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Média	Desvio Padrão
Cenário 1												
Sempre ligado	2,07	0,81	1,57	1,46	1,14	2,10	2,58	2,06	0,77	1,34	1,58	0,570
Aleatório	0,99	1,18	1,65	0,87	0,28	2,37	3,01	2,60	0,64	1,18	1,47	0,858
Collota et al. 2018	1,62	1,03	2,02	2,24	2,05	1,79	2,41	2,25	1,63	2,03	1,91	0,384
Sistema Fuzzy proposto	1,74	0,84	1,64	1,75	1,01	2,77	2,16	2,38	1,60	2,28	1,81	0,570
Cenário 2												
Sempre ligado	7,19	6,39	6,84	6,69	7,26	6,35	6,78	4,61	6,54	4,13	6,27	1,00
Aleatório	22,38	5,49	22,42	5,15	6,88	4,63	6,65	6,18	5,65	3,97	8,94	6,781
Collota et al. 2018	8,43	5,78	7,56	6,20	8,06	7,56	7,56	6,21	8,48	4,26	7,01	1,287
Sistema Fuzzy proposto	7,42	4,83	7,66	5,51	5,97	5,51	5,66	5,32	6,21	4,01	5,81	1,041
Cenário 3												
Sempre ligado	9,97	9,79	8,42	9,48	11,13	7,40	11,63	10,68	11,62	7,84	9,80	1,444
Aleatório	23,25	24,11	8,27	9,86	12,17	6,99	21,97	12,13	14,96	33,39	16,71	8,128
Collota et al. 2018	11,32	10,21	9,84	10,42	9,82	6,70	10,49	8,93	10,42	6,43	9,46	1,558
Sistema Fuzzy proposto	11,14	10,83	9,64	10,36	9,21	7,37	10,10	8,15	11,62	6,26	9,47	1,643

No cenário 1, o sistema proposto reduziu o consumo energético da rede em 43,71% em comparação com a abordagem *Sempre ligado*. Em relação à abordagem *Aleatório*, a redução foi de 18,97%, e em relação à *Collota et al. 2018* a redução foi de 17,54%. Analisando a perda de pacotes da rede, esta obteve a menor taxa quando a abordagem *Aleatório* foi usada. Comparando-se com as outras três, *Aleatório* foi superior a *Sempre ligado* em 6,96%, superior a *Collota et al. 2018* em 23,04% e 18,78% em relação à nossa proposta.

No cenário 2, tanto o consumo energético quanto a perda de pacotes foram melhores com a abordagem proposta neste trabalho. No consumo energético, ela foi 48,8% menor em relação à abordagem *Sempre ligado*, 15,54% menor em relação a *Collota et al. 2018* e 11,35% menor em relação à *Aleatório*. Analisando a perda de pacotes, o sistema proposto foi 7,34% menor que *Sempre ligado*, 16,55% menor que *Collota et al. 2018* e 35,01% menor que *Aleatório*.

Por fim, no cenário 3, o menor consumo energético foi obtido com a abordagem *Aleatório*, que foi 46,09% menor que *Sempre ligado*, 9,52% menor que *Collota et al. 2018* e apenas 4,34% menor que *Sistema Fuzzy proposto*. No que se refere à perda de pacotes, a menor taxa obtida foi com *Sistema Fuzzy proposto*. A diferença entre *Sempre ligado* foi de 3,37%, entre *Collota et al. 2018* foi de 0,11% e de 43,33% em relação à *Aleatório*.

De acordo com os resultados apresentados, com a utilização do nosso sistema, a rede consumiu menos energia nos cenários 1 e 2. No cenário 3, o menor consumo foi com a abordagem *Aleatório*, com pequena diferença entre o *Sistema Fuzzy proposto*. Isto demonstra a eficiência dos sistemas fuzzy implementados em cada ponto de acesso da rede. Como já era esperado, o consumo energético foi maior em todos os cenários com o uso da abordagem *Sempre ligado*. A utilização dos sistemas fuzzy também contribuiu em manter a qualidade da rede, pois nos cenários 2 e 3, a menor taxa de perda de pacotes foi com a abordagem *sistema Fuzzy proposto*. No cenário 1, a menor perda foi com a abordagem *Aleatório*. Exceto pelo cenário 1, os piores resultados de perda de pacotes foi com a utilização da abordagem *Aleatório*.

6. Conclusão

O objetivo deste trabalho foi reduzir o consumo energético de Redes de Sensores sem Fio e ao mesmo tempo, manter a qualidade do serviço da rede, que foi analisada pela taxa de perda de pacotes. Como observado na literatura, o maior consumo de energia das RSSF está localizado nos pontos de acesso da rede, que consomem energia mesmo se estiverem ociosos. Assim, neste artigo propomos a utilização de sistemas fuzzy para decidir quais pontos de acesso não são essenciais, e assim, efetuar o desligamento dos mesmos.

Para demonstrar a eficiência do nosso sistema, ela foi comparada com outras três abordagens: *Sempre ligado*, *Aleatório* e *Collota et al. 2018*, em três diferentes cenários, variando a quantidade e o tipo de sensores e pontos de acesso. Além disso, em cada cenário foram configurado 10 testes com diferentes padrões de transmissão.

Os resultados obtidos mostraram que o nosso sistema foi eficiente no consumo energético, obtendo os melhores resultados nos cenários 1 e 2, e com pequena diferença para a abordagem *Aleatório* no cenário 3. Como esperado, com a abordagem *Sempre ligado*, a rede consumiu mais energia nos três cenários. Em relação à taxa de perda de pacotes, a abordagem proposta também foi a melhor nos cenários 2 e 3, perdendo para a *Aleatório* no cenário 1. Nessa situação específica, tanto o *Sistema Fuzzy proposto* quanto a *Collota et al. 2018* tomaram uma decisão pior que a *Aleatório*. Esse problema será tratado em trabalhos futuros, onde pretende-se aplicar algoritmos especializados na geração de regras. A base de regras é um dos principais componentes da base de conhecimento de sistemas fuzzy, e sendo assim, exerce influência direta no desempenho final do sistema. Um bom conjunto de regras é fundamental para um melhor desempenho do sistema.

Referências

- Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422.
- Castillo-Effer, M., Quintela, D., Moreno, W., Jordan, R., and Westhoff, W. (2004). Wireless sensor networks for flash-flood alerting. In *Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, 2004.*, volume 1, pages 142–146.
- Collotta, M., Pau, G., and Costa, D. G. (2018). A fuzzy-based approach for energy-efficient wi-fi communications in dense wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 134:127–139.
- Collotta, M., Pau, G., and Maniscalco, V. (2017). A fuzzy logic approach by using particle swarm optimization for effective energy management in iwsns. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(12):9496–9506.
- Costa, D. G., Collotta, M., Pau, G., and Duran-Faundez, C. (2017). A fuzzy-based approach for sensing, coding and transmission configuration of visual sensors in smart city applications. *Sensors*, 17(1):93.
- Daskalakis, C., Diakonikolas, I., and Servedio, R. A. (2015). Learning poisson binomial distributions. *Algorithmica*, 72(1):316–357.
- Fanian, F., Kuchaki Rafsanjani, M., and Borumand Saeid, A. (2021). Fuzzy multi-hop clustering protocol: Selection fuzzy input parameters and rule tuning for wsns. *Applied Soft Computing*, 99:106923.
- Gao, T., Greenspan, D., Welsh, M., Juang, R., and Alm, A. (2005). Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network. In *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*, pages 102–105.
- Jafari, R., Encarnacao, A., Zahoory, A., Dabiri, F., Noshadi, H., and Sarrafzadeh, M. (2005). Wireless sensor networks for health monitoring. In *The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, pages 479–481.
- Mena, D. M., Papapanagiotou, I., and Yang, B. (2018). Internet of things: Survey on security. *Information Security Journal: A Global Perspective*, 27(3):162–182.
- Mohd Kassim, M. R., Mat, I., and Harun, A. N. (2014). Wireless sensor network in precision agriculture application. In *2014 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, pages 1–5.
- Sarrafzadeh, M., Dabiri, F., Jafari, R., Massey, T., and Nahapetian, A. (2006). Low power light-weight embedded systems. In *Proceedings of the 2006 International Symposium on Low Power Electronics and Design, ISLPED '06*, page 207–212, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Stankovic, J. A. (2008). Wireless sensor networks. *Computer*, 41(10):92–95.
- Yick, J., Mukherjee, B., and Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52:2292–2330.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353.