

Controle energeticamente eficiente de múltiplos saltos para Redes de Sensores sem Fio heterogêneas utilizando Lógica Fuzzy

Alexandre M. Silva¹, Christiano Maciel²

¹Instituto de Ciências da Computação – PPGCC - Universidade Federal do Pará (UFPA)
Caixa Postal 479 – 66.075-110 – Belém – PA – Brasil

²Instituto de Engenharia Elétrica – PPGEE - Universidade Federal do Pará (UFPA)
Belém, PA - Brasil.

{amelo, christiano}@ufpa.br

Abstract. *This paper, we propose a centralized control to elect more appropriate Cluster Heads, assuming three levels of heterogeneity and multi-hop communication between Cluster Heads. The centralized control uses the k-means algorithm, responsible for the division of clusters and Fuzzy Logic to elect the Cluster Head and selecting the best route of communication between elected. The simulations indicate that the centralized control, the inclusion of three levels of heterogeneity and multi-hop communication to farthest Cluster Heads can increase the period of stability and lifetime in WSN.*

Resumo. *Neste artigo é proposto um controle centralizado para eleger Cluster Heads mais adequados, admitindo três níveis de heterogeneidade e uma comunicação de múltiplos saltos entre Cluster Heads. O controle centralizado utiliza o algoritmo k-means, responsável pela divisão dos clusters e Lógica Fuzzy para eleição do Cluster Head e seleção da melhor rota de comunicação entre os eleitos. As simulações indicam que um controle centralizado, a inserção de três níveis de heterogeneidade e a comunicação com múltiplos saltos para Cluster Heads mais afastados permitem aumentar o período de estabilidade e o tempo de vida útil em RSSF.*

1. Introdução

Representando uma subclasse das redes *ad hoc* sem fio, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são consideradas como uma nova geração de sistemas embarcados de tempo real com recursos computacionais, energia e memória limitados. Tendo na restrição de energia um dos principais entraves apresentados devido à capacidade limitada das baterias internas dos nós sensores. Vários fatores são culminantes para o desgaste da bateria dos nós, sendo o módulo de rádio um dos principais consumidores de energia dos nós sensores no processo de transmissão de dados [1].

O consumo de energia pode ser reduzido, admitindo que apenas alguns nós possam enviar dados para a Estação Base (*base station*). RSSF hierárquicas organizam seus nós em agrupamentos (*clusters*) e elegem um nó líder do grupo, denominado *cluster head* (CH). O CH é responsável por coletar todos os dados dos nós de seu *cluster*, informações provenientes de sensoriamento, podendo agregá-los e posteriormente encaminhá-los à Estação Base (BS) [2].

A estrutura hierárquica pode ser formada por dois tipos de redes, homogêneas ou heterogêneas. Em estruturas heterogêneas, tratado nesta proposta, alguns nós sensores podem apresentar requisitos de hardware diferenciados, como melhor capacidade energética. Estes nós sensores dão a rede um maior período de estabilidade [3, 4]. Trabalhos que consideram a heterogeneidade dos nós podem ser encontrados em [3, 5, 6, 2, 4, 7].

O algoritmo LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) proposto por [8] é a solução mais popular encontrada na literatura para formação de *clusters* e serve como base para inúmeros trabalhos voltados para clusterização. Como no LEACH, o grande problema destes algoritmos é a utilização de informações locais com base em cálculos de probabilidade para eleição dos líderes dos *clusters*. Esse tipo de seleção pode gerar CHs muito próximos da borda da rede, aumentando a dissipação de energia devido à distância de transmissão dos nós para o CH. Outro grande problema com a forma de eleição utilizada pelo algoritmo LEACH, é a falta de tratamento discriminatório sobre as discrepâncias energéticas dos nós que formam a rede, uma vez que os CHs selecionados devem possuir recursos energéticos suficientes para suportar as cargas de transmissão dos nós associados a ele.

Considerando os entraves relacionados à eleição de CHs com base em informações locais sem considerar critérios de posicionamento, este artigo propõe uma estratégia para eleição do CH ideal em RSSF heterogêneas, utilizando Lógica *Fuzzy* com base em informações centralizadas na BS. Este controle centralizado define o CH com base em informações adquiridas no momento de formação da rede. As informações coletadas são utilizadas para carregar o algoritmo *k-means*, responsável pela divisão dos *clusters*, como também, o sistema *fuzzy*, que se encarrega de selecionar o líder de cada grupo formado pelo algoritmo *k-means*.

O sistema *fuzzy* também é responsável por determinar quais CHs passarão pelo processo de encaminhamento de dados dos CHs mais afastados, nós eleitos que ultrapassam o limiar de comunicação com a BS devem enviar seus dados para os nós mais próximos. Para esta seleção o Sistema *Fuzzy* utiliza como critérios: distância de comunicação e níveis de energia. Os critérios adotados para seleção de CHs são: nível de energia, centralidade e proximidade para a BS. A inserção de três níveis de heterogeneidade, a utilização de informações centralizadas na BS e a comunicação através de múltiplos saltos permitem eleger CHs bem posicionados e com níveis adequados de energia para suportar a carga de transmissão de seu *cluster*, aumentando o período de estabilidade e vida útil da rede.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. Seção 2 apresenta alguns trabalhos relacionados à eleição de CHs, exemplos de motivação de algoritmos propostos e definições de termos. Seção 3 apresenta uma breve introdução a Lógica *Fuzzy* e algoritmo *k-means*. Os modelos analíticos e a modelagem utilizada na proposta são apresentados na Seção 4. Seção 5 discute os resultados e a simulação para o sistema *fuzzy* e, finalmente, Seção 6 conclui o artigo.

2. Trabalhos Correlatos

O Algoritmo LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*), proposto por [8], elege o CH com base em informações locais a cada novo ciclo (*round*). Para que o nó seja eleito, o número escolhido deve ser menor que o limiar T . Após a eleição, o novo

CH envia mensagens de anúncio para todos os nodos da rede. Os demais nós associados decidem a que CH devem se conectar.

Embora o LEACH apresente uma estrutura hierárquica que permite reduzir o consumo de energia em RSSF, o mesmo não adota nenhum critério de posicionamento no momento de eleição do CH, podendo selecioná-lo próximo a borda da rede. Outro problema do algoritmo é descrito no trabalho apresentado em [7] SEP (*Stable Election Protocol*), comprovando que o LEACH não é eficiente em estruturas heterogêneas, por não considerar a discrepância de energia dos nós que formam a rede. Semelhante ao DEEC (*Distributed energy efficient clustering*) proposto por [9], utiliza informações locais para eleição do CH, entretanto, é capaz de tratar a heterogeneidade da rede. Sendo que a heterogeneidade inserida pelos autores diz respeito apenas à capacidade energética diferenciada de um conjunto de nós de que formam a rede.

Baseado no algoritmo DEEC, os algoritmos E-DEEC (*Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering*) proposto por [3] e LEACH-HPR proposto por [6] também consideram a energia residual dos nós no processo de eleição para o CH da rede. O diferencial está na inserção de três tipos de nós com diferentes níveis de energia: nós normais, nós avançados e super nós, permitindo prolongar o período totalmente funcional da rede com a adição dos super nós. Utilizam informações locais para eleição do CH. Para minimizar a dissipação de energia na fase de comunicação entre os CHs mais afastados e a BS, os autores de LEACH-HPR propõem um algoritmo de múltiplos saltos entre os CHs eleitos, semelhante ao ACHTLEACH (*Adaptive Cluster Head Election and Two-hop LEACH*) proposto por [3].

Em [10] os autores propõem um algoritmo que considera uma estratégia híbrida móvel com o objetivo de distribuir o consumo de energia por toda a rede com o CH movimentando-se para um local de maior concentração de energia quando ocorrer um evento e com possibilidade de controlar sua potência de transmissão. Entretanto, este deslocamento pode maximizar o consumo de energia gasto no envio de dados para a BS. A estratégia móvel híbrida do algoritmo BS-CH permite a movimentação da estação base para minimizar a distância para o CH e o consumo na transmissão de dados, desconsiderando a energia consumida, supondo que a estação base é móvel e sem informação se a fonte de alimentação é contínua.

3. Lógica Fuzzy e Algoritmo K-Means

Proposto por [11], a Lógica *Fuzzy* utiliza métodos com o objetivo de controlar a linguagem vaga e a imprecisão utilizada diretamente pelo homem, por meio de um conjunto de valores representados por variáveis linguísticas. Cada conjunto de valores tem um intervalo diretamente associado a regras semânticas. Ao contrário da Lógica booleana, na lógica *fuzzy* a avaliação de uma determinada proposição pode compreender valores e graus de pertinência que variam no intervalo de (0,1).

O algoritmo *k-means* é uma técnica de agrupamento de dados por k-médias muito popular por sua facilidade de implementação. Normalmente os algoritmos de clusterização são amplamente utilizados em aplicações que necessitem gerar padrões, dividindo os objetos em grupos úteis ou significativos [7]. Para a proposta apresentada neste trabalho o algoritmo *k-means* é carregado com as coordenadas de todos os nós que foram à rede. Desta forma o algoritmo gera um padrão, dividindo os clusters, estes, formados pelos nós mais próximos.

4. Modelagem

Para a solução proposta neste trabalho, a escolha do *cluster head* se dá a cada *round*. Um *round* termina no final do processo de agregação e envio de dados para a BS. Basicamente o processo é dividido em três etapas: (i) A primeira etapa consiste no início do processo de formação dos *clusters*. A divisão dos *clusters* é feita utilizando o algoritmo *k-means*; (ii) A segunda etapa é dividida em duas fases. A primeira fase consiste na seleção do CH para cada *cluster* formado pelo *k-means*. Os dados de cada *cluster* são carregados no Sistema *Fuzzy*, e este, baseado nos critérios adotados seleciona os CHs mais adequados para cada *cluster*.

Na segunda fase, após o resultado da seleção de líderes, a BS calcula a distância dos CHs que ultrapassaram o limiar de comunicação para todos os *Cluster Heads* eleitos. Este cálculo é utilizado para definir para que líder o CH mais afastado deve transmitir seus dados já agregados. Após a conclusão das duas fases, a estação base envia mensagens em *broadcast* para os nós da rede informando o ID do líder do grupo para que os nós possam enviar dados para seu respectivo CH; (iii) A terceira etapa concerne no processo de agregação dos dados pelo CH. Este processo consiste em comprimir os dados e enviá-los a BS.

No processo de associação dos nós de um determinado *cluster* para seu respectivo CH, os nós que formam o *cluster* recebem a mensagem de anúncio da BS informando a que líder deve enviar pedidos de associação. O líder reserva um *slot* TDMA (*Time Division Multiple Access*) para cada nó associado, para que possam transmitir seus dados. Os líderes responsáveis por propagar para o ponto de coleta os dados já agregados de CHs mais afastados, recebem da BS, juntamente com a mensagem de anúncio, o pedido de reserva de um *slot* TDMA para este processo.

4.1. Modelo de dissipação de energia

O modelo de dissipação de energia adotado é semelhante ao modelo utilizado pelo LEACH. O modelo consiste na energia dissipada na transmissão e recepção de *k-bit* de mensagem em uma distância *d*, o radio consome:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \epsilon_{fs} * k * d^2 \text{ para } d < d_0 \quad E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + \epsilon_{amp} * k * d^4 \text{ para } d \geq d_0 \quad (1)$$

$$E_{Rx}(k, d) = E_{elec} * k \quad (2)$$

A energia dissipada na transmissão e recepção do radio é representada por $E_{elec} = 50 \frac{nJ}{bit}$. Dois modelos são utilizados, *Free space* e *Multipath*, para que o amplificador de transmissão alcance um nível aceitável, dependendo da distância entre o transmissor e o receptor. Se esta distância não ultrapassar o limiar d_0 , o modelo de *Free space* é utilizado. A energia dissipada pelo amplificador de transmissão é dada por

$$E_{fs} = 10 \frac{pJ}{m^2}$$

, caso o limiar seja ultrapassado o modelo *Multipath* é utilizado $E_{amp} = 0.0013 \frac{pJ}{bit}$. Onde $d_0 = \sqrt{\frac{E_{fs}}{E_{amp}}}$, [12, 5].

O modelo de *Multipath* gera maior dissipação de energia no processo de comunicação. Estratégias energeticamente eficientes devem considerar o

posicionamento dos nós no processo de seleção de CHs para que o modelo de *Free space* seja mantido.

4.2. Critérios para eleição do CH

Os critérios utilizados para carregar o sistema *fuzzy* são: (i) Energia – O nível de energia de cada nó da rede é representado pela variável linguística Bateria e possui os valores linguísticos Baixa, Moderada e Alta. Consideramos que a rede possui características heterogêneas no que diz respeito a energia dos nós. Logo, os super nós e nós avançados representam maior chance para eleição do CH, Figura 1. (ii) Centralidade – A variável centralidade diz respeito ao posicionamento do nó em relação ao centro do *cluster*. E respectivamente os valores linguísticos que representam a variável centralidade são: Perto, Moderado e Longe. Quanto menor o valor de centralidade mais próximo o nó está do centro do cluster, Figuras 1 e 2.

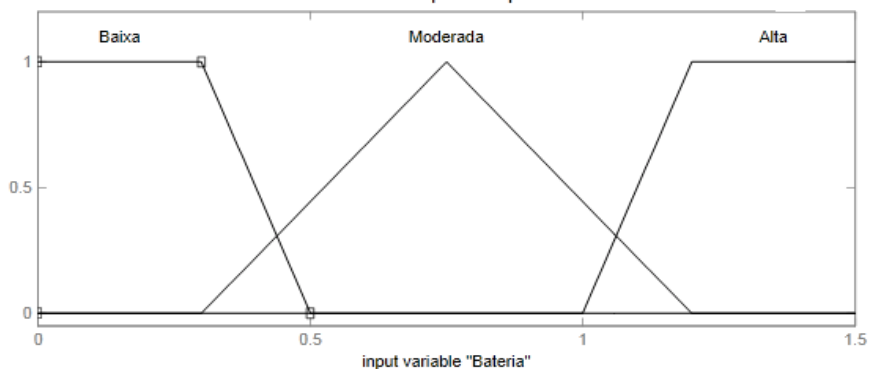


Figura 1. Variável bateria com os valores linguísticos correspondentes aos níveis de energia dos três tipos de nós sensores disponíveis na rede.

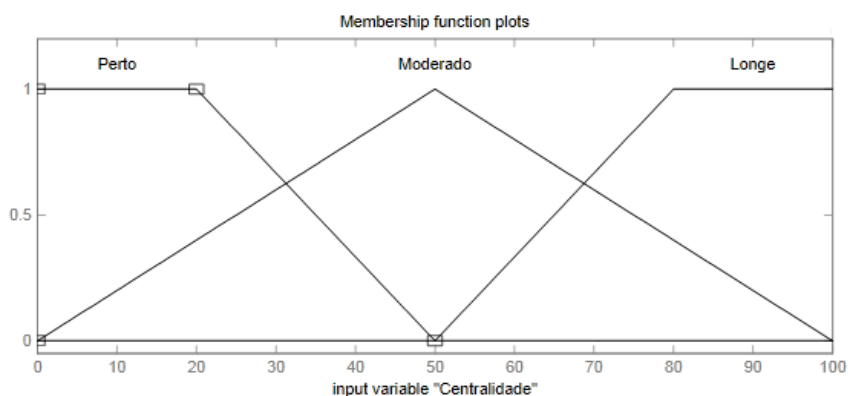


Figura 2. Variável linguística centralidade.

(iii) Distância para BS – A variável é representada no sistema como DistBS. Semelhante a variável centralidade, utiliza os valores linguísticos: Perto, Moderado e Longe. O critério de distância para a BS é utilizado para gerar uma aproximação do CH com a BS, objetivando minimizar o consumo de energia do CH na fase de transmissão de dados, Figura 3.

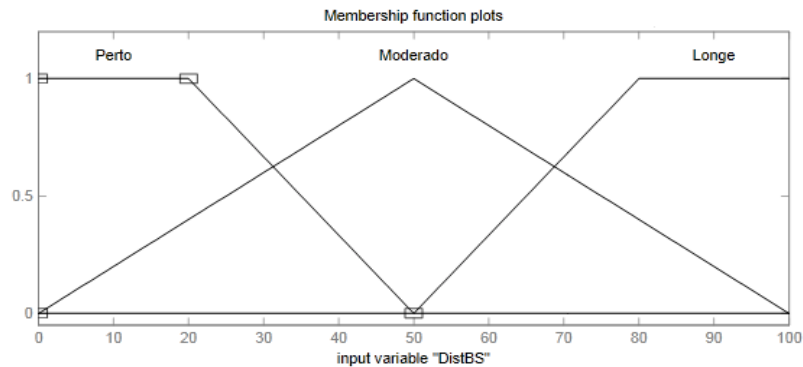


Figura 3. Distância para BS.

As variáveis descritas acima correspondem aos antecedentes do sistema *fuzzy* e dão entrada ao processo de fuzzyficação. Cada valor de entrada é mapeado para um conjunto *fuzzy* de entrada com seu determinado grau de pertinência e os consequentes do sistema, conjuntos *fuzzy* de saída do sistema que vão determinar o CH ideal em um *cluster x*, usam os seguintes valores linguísticos: *muito fraco*, *fraco*, *médio*, *forte* e *muito forte*, Figura. 4.

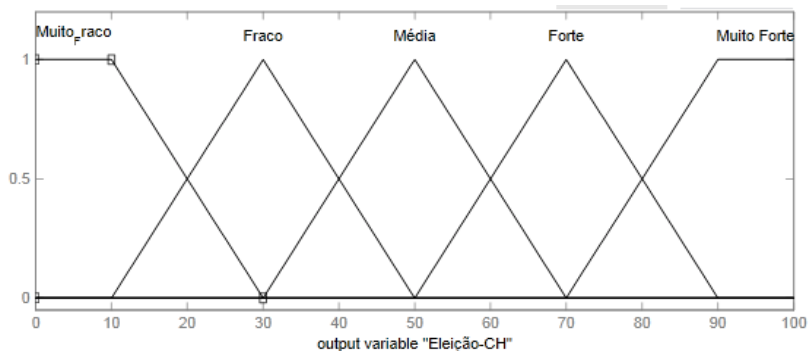


Figura 4. Saída do sistema *fuzzy*.

No processo de mapeamento dos conjuntos *fuzzy* de saída para valores *crisp* (defuzzificação), cada nó sensor apresenta seu respectivo valor de saída do sistema *fuzzy*. Os maiores valores de saída indicam os *cluster heads* selecionados para o *round* atual. A da Base de Regras do sistema é composta por vinte e sete regras $3^3=27$, Tabela 1. A melhor condição para a eleição do *cluster head* é dada pela seguinte regra: Se *Centralidade* é PERTO e *Bateria* é ALTA e *DistBS* é PERTO então *Eleição cluster head* ou *Saída* é MUITO FORTE.

4.3. Centralidade dos nós e distância para BS

Assumimos que a BS detém o conhecimento de nível de energia e posicionamento dos nós. Estas informações são enviadas no início de formação da rede e os nós dissipam energia neste processo. Para determinar os valores de centralidade, a BS seleciona cada nó e calcula a distância euclidiana destes nós para o centro dos seus respectivos *clusters*, definidos pelo algoritmo *k-means*, Eq. (3). O nó que apresentar maior centralidade, como CH, permitirá que a dissipação de energia na comunicação ocorra de forma mais homogênea em relação aos demais nós associados.

$$d(P_i, P_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

Tabela 1. Base de regras do sistema fuzzy

Regras	Entradas			Saída
	Centralidade	Bateria	DistBS	Eleição
25.	Longe	Alta	Longe	Fraco
23.	Longe	Alta	Moderado	Fraco
9.	Longe	Alta	Perto	Média
7.	Longe	Baixa	Longe	Muito Fraco
22.	Longe	Baixa	Moderado	Muito Fraco
20.	Longe	Baixa	Perto	Muito Fraco
24.	Longe	Moderada	Longe	Muito Fraco
8.	Longe	Moderada	Moderado	Fraco
21.	Longe	Moderada	Perto	Muito Fraco
27.	Moderado	Alta	Longe	Média
16.	Moderado	Alta	Moderado	Forte
6.	Moderado	Alta	Perto	Forte
4.	Moderado	Baixa	Longe	Muito Fraco
15.	Moderado	Baixa	Moderado	Fraco
17.	Moderado	Baixa	Perto	Muito Fraco
19.	Moderado	Moderada	Longe	Fraco
5.	Moderado	Moderada	Moderado	Forte
18.	Moderado	Moderada	Perto	Média
3.	Perto	Alta	é Perto	Muito Forte
10.	Perto	Alta	Longe	Forte
14.	Perto	Alta	Moderado	Muito Forte
1.	Perto	Baixa	Longe	Muito Fraco
26.	Perto	Baixa	Moderado	Muito_Fraco
13.	Perto	Baixa	Perto	Muito Fraco
11.	Perto	Moderada	Longe	Média
2.	Perto	Moderada	Moderado	Forte
12.	Perto	Moderada	Perto	Forte

O mesmo processo ocorre no cálculo da distância de cada nó para a BS. Entretanto, vale resaltar que este critério é muito importante quando a BS não está localizada demasiadamente longe do cluster em questão. Logo, a disposição da rede deve ser considerada para que o critério distância para BS seja válido. Com isso, definimos regras seguras para não gerar CHs próximo da borda da rede, já que a centralidade é mais importante.

4.4. Múltiplos Saltos entre CHs

Esta estratégia é utilizada para *Cluster Heads* que ultrapassam o limiar de comunicação, $d > d_0$, para o ponto de coleta. A aproximação para a BS, apresentada anteriormente, nem sempre se aplicará, uma vez que dependendo da disposição dos nós, *clusters* podem ser formados demasiadamente longe. A estratégia de múltiplos saltos é implementada para minimizar a dissipação de energia com comunicação.

Nesta proposta, para determinar que líderes passarão pelo processo de propagação de dados dos CHs mais afastados, o Sistema *Fuzzy* adota critérios de níveis de energia e distância. Primeiramente é utilizado o cálculo (3) para determinar as distâncias de comunicação entre os CHs mais afastados e o restante dos líderes eleitos. Com o resultado do cálculo de distância e os níveis de energia de cada líder, o Sistema *Fuzzy* é carregado. As variáveis linguísticas que representam o nível de Bateria dos líderes e distância de todos os CHs eleitos para os CHs mais afastados são representadas, respectivamente, abaixo, Figuras 5 e 6.

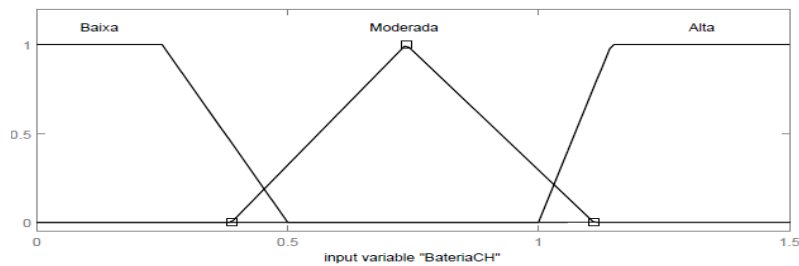


Figura 5. Variável Bateria CH.

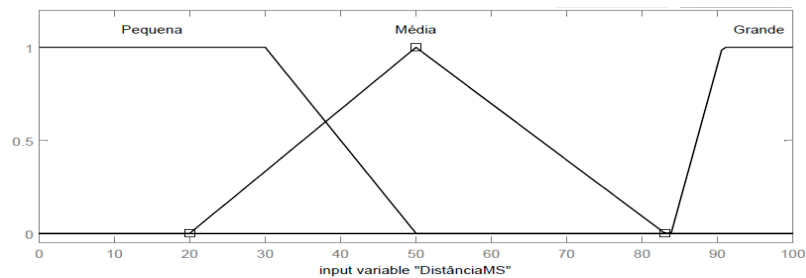


Figura 6. Distância para Múltiplos Saltos.

Ao longo do tempo de simulação é natural que os nós apresentem um declínio de nível de energia. Logo, para evitar que nós líderes com baixo nível de energia passem pelo processo de encaminhamento de dados dos nós mais afastados, o critério energia é utilizado de forma discriminatória a fim de excluir estes nós do processo. Os sensores avançados e super nós tem maior chance de participarem do processo de propagação, uma vez que seus recursos energéticos são aumentados. A variável DistânciaMS é utilizada para selecionar os nós líderes que propagarão os dados, já agregados, dos CHs cuja distância de comunicação para a BS ultrapassa o limiar d_0 . A variável possui os valores linguísticos: *Pequena*, *Moderada* e *Grande*, e o universo de discurso varia entre 0 e 100 m. A função de pertinência que representa o conjunto nebuloso *Grande* é definida a partir de 83 m, limiar de comunicação estabelecido com base no quociente dos amplificadores de potência de sinal, $d_0 = \sqrt{E_{fs}/E_{atm}}$.

A base de regras é formada por 9 regras, uma vez que temos dois antecedentes como entrada, 3^2 . A melhor condição utilizada na seleção do CH ideal para propagação é dada por: *Se DistanciaMS é Pequena e BateriaCH é Alta Então a Saída é Forte*. Sendo a distância fator agravante, a base de regras exclui os nós que apresentam distância significativa para o CH mais afastado. A Figura 7 mostra o gráfico de superfície do sistema.

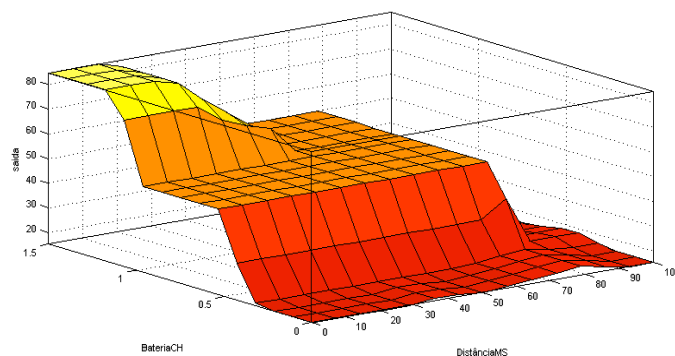


Figura 7. Gráfico de Superfície.

4.5. Modelo de Sistema Fuzzy

Para o modelo de Lógica *Fuzzy*, foram utilizadas funções de pertinência triangulares e trapezoidais, máquina de inferência de *Mamdani* e Defuzzificador Centro Ponderado. No processo de seleção de CH, para cada entrada (x_1, x_2, x_3) , a saída do sistema é calculada, como mostra a Eq. (4).

$$y(x_1, x_2, x_3) = \frac{\sum_{l=1}^{27} \mu_{F_l^1}(x_1) \mu_{F_l^2}(x_2) \mu_{F_l^3}(x_3) C_{avg}^l}{\sum_{l=1}^{27} \mu_{F_l^1}(x_1) \mu_{F_l^2}(x_2) \mu_{F_l^3}(x_3)} \quad (4)$$

Para a seleção dos nós líderes que participarão do processo de propagação de dados de CHs mais afastados, a saída é calculada como mostra a Eq. (5). Onde (x_1, x_2) compreendem as entradas *BateriaCH* e *DistânciaMS*.

$$y(x_1, x_2) = \frac{\sum_{l=1}^9 \mu_{F_l^1}(x_1) \mu_{F_l^2}(x_2) C_{avg}^l}{\sum_{l=1}^9 \mu_{F_l^1}(x_1) \mu_{F_l^2}(x_2)} \quad (5)$$

4.6. Modelagem da Rede

Para o modelo de rede assumimos que N sensores estão distribuídos em uma área $N \times M$. Três tipos de nós sensores, sensores normais, sensores avançados e super sensores, apresentando diferentes níveis de energia inicial, representam a heterogeneidade da rede. O cálculo que determina a quantidade de sensores normais, sensores avançados e super sensores na rede é semelhante ao utilizado por E-DEEC:

$$N \cdot (1 - mf) \quad (6)$$

$$N \cdot mf(1 - mp) \quad (7)$$

$$N \cdot mf \cdot mp \quad (8)$$

Onde mf é a fração do número total de N nós sensores e mp a porcentagem para o número total de nós sensores que apresentam e mais energia que o nó sensor normal na rede. O cálculo de energia inicial total da rede adotado é o mesmo apresentado em [3].

$$E_{total} = N \cdot (1 - mf) \cdot E_{10} + N \cdot mf(1 - mp) \cdot \lfloor (2) \cdot E \rfloor_{10} + N \cdot mf \cdot mp \cdot E_{10} (1 + e) = N \cdot E_{10} (1 + mf(2 + mp \cdot e)) \quad (9)$$

Para a proposta apresentando três níveis de heterogeneidade, a energia total da rede é acrescida, considerando a maior capacidade energética dos sensores avançados e super sensores. Esta diferença é dada pelo fator $1 + mf(2 + mp \cdot e)$.

4.7. Propriedades da Rede

Para o cenário de rede proposto, assumimos algumas propriedades: (i) No que concerne à distribuição de N nós da rede, esta é feita de forma aleatória e não possuem nenhuma mobilidade; (ii) Os nós enviam sua localização para a BS utilizando GPS; (iii) Os nós dissipam energia para o envio de informação; (iv) Todos os nós detêm a mesma capacidade de transmissão e processamento, a heterogeneidade é aplicada a níveis de

energia, já que alguns nós possuem recurso energético aumentado, o que difere dos sensores normais. (v) A BS é fixa e sua localização é pré-definida no algoritmo; (vi) Os nós sempre têm dados para transmitir para o CH.

5. Simulação e Resultados

A simulação é dividida em *rounds*, a cada *round* obtém-se um valor de saída com base nos parâmetros de entrada do sistema e um novo CH é eleito para cada *k cluster*. Os valores são atualizados para entrada do *round* seguinte, onde executa as fases descritas na seção 4. Cada nó é distribuído aleatoriamente em uma área de 100 m², onde a classificação do número de nós normais, avançados e super, com seus respectivos níveis de energia, é calculada utilizando as Eq. 5, Eq. 6 e 7, sendo $e = 1$, $mf = 1$ e $mp = 0.6$. O nível de energia inicial para os nós normais é de 0.5J, para os nós avançados e de 1.0J e para super nós 1.5J. A BS é previamente definida com as coordenadas x= 5 e y=95. O modelo de rádio utilizado segue a descrição da Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros do Modelo de Rádio

Parâmetros	Valores
E_{elec}	$50 \frac{nJ}{bit}$
ϵ_{fs}	$\frac{10 \frac{pJ}{bit}}{m^2}$
E_{amp}	$\frac{0.0013 \frac{pJ}{bit}}{m^4}$
E_{DA} (Energia dissipada na agregação de dados)	$\frac{5 \frac{nJ}{bit}}{sinal}$
<i>K-bit mensagem (dados)</i>	4000 bits
<i>K-bit mensagem (info)</i>	100 bit s
d_0 (Limiar de distância)	87m

Estão distribuídos 100 nós, divididos em *k clusters*. Cada nó envia 4000 Bits de mensagem por *round* para o *cluster head* da rede. A taxa de compressão dos dados é de 5%. A simulação é feita com 5000 rounds. Neste cenário é aplicada a métrica FND (*First Node Dies*) para determinar o período de estabilidade da rede.

Na primeira fase da simulação é obtida a coordenada e nível de energia de cada nó que compõe a rede. A energia dissipada no envio das informações de cada nó é calculada utilizando a Eq. (1). A energia inicial de cada nó é decrementada neste processo. Após o envio das coordenadas, o algoritmo *k-means*, implementado na BS, estipula um padrão com base na coordenada dos nós, calculando o posicionamento de cada nó e dividindo os que formam a rede em *k clusters*. O algoritmo também calcula o centro de cada cluster, informação utilizada posteriormente para o processo de eleição do CH, descrito na subseção 4.2. O número de *clusters* utilizados para simulação é $k=5$.

Cada nó, com seu respectivo valor de centralidade, proximidade para BS e nível de energia, terá um consequente. Um valor com grau de pertinência γ , determinando a chance deste nó se tornar *cluster head*. No processo de *defuzzyficação*, o nó que apresentar maior valor de saída *crisp*, será eleito como CH ideal no *round* atual. Após este processo, a fase dois da segunda etapa é iniciada, verificando se algum nó ultrapassa o limiar de comunicação. No caso do limiar ultrapassado, o Sistema Fuzzy determina o nó líder mais adequado para propagar os dados do líder mais afastado, considerando seu nível de energia e distância para o nó que ultrapassa o limiar.

A Figura 8, exibe a divisão dos *clusters*, em uma área de 100 m², e o final da eleição de CHs no *round* 0, sendo representado por ‘◇’ vermelho o *cluster head* eleito pelo sistema e □ representa a BS. Os nós circulados representam os CHs eleitos que ultrapassam o limiar de comunicação com a BS.

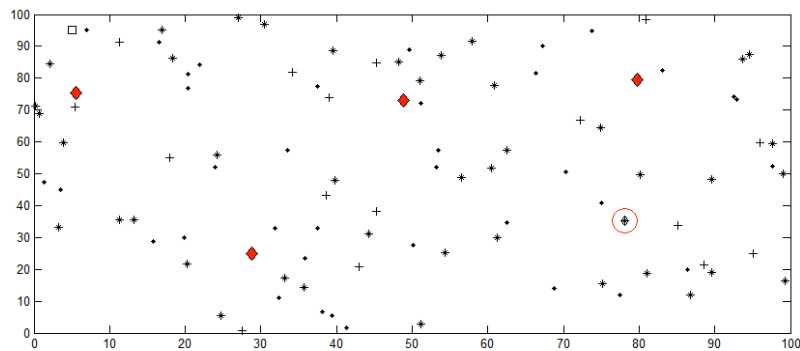


Figura 8. CHs Selecionados pelo Sistema Fuzzy no Round 0.

A Tabela 3 exibe o resultado de seleção de líderes para o *round* 0. Os valores de energia dos nós, exibidos na Tabela 3 já apresentam a dissipação de energia gerada na transmissão de informações para o ponto de coleta e dissipação na comunicação gerada no processo de associação ao CH eleito. O CH 5 apresentou maior dissipação de energia devido a quantidade de nós associados.

Tabela 3. Resultados da Seleção de *Cluster Heads*

CH	Nível de energia	Centralidade No Cluster	Número de nós p/ cluster	Distância para BS
1	1.4965	7.7574	21	19,6 m < d_0
2	1.4965	2.4817	21	49,0 m < d_0
3	1.4972	12.2433	17	76,3 m < d_0
4	1.4975	12.1966	15	94,5 m > d_0
5	1.4957	4.6183	26	73,9 m < d_0

O CH 4, selecionado pelo Sistema Fuzzy, ultrapassa o limiar de comunicação. Em uma transmissão direta para o ponto de coleta, este nó, precisaria utilizar o modelo *Multipath*, gerando maior dissipação de energia no processo de comunicação, uma vez que o expoente de *path loss* seria d^4 . O consumo de energia gerado neste tipo de transmissão seria de aproximadamente 2.3935 J, levando o nó à inatividade de forma prematura e quebrando o período de estabilidade da rede. Entretanto, com a estratégia de múltiplos saltos adotada, o CH comunica-se com líder mais adequado, mantendo o

modelo *Free space* de rádio. A Tabela 4 exibe a saída do Sistema *Fuzzy*, no *round* 0, para seleção do nó líder adequado para propagação dos dados do CH mais afastado. O maior valor de saída *crisp* corresponde ao nó líder selecionado, CH 3.

Tabela 4. Saída do Sistema *Fuzzy*

CH	Nível de energia	Distância para o CH > d_0	Saída <i>Fuzzy</i>
1	1.4965	83.1566	18.2613
2	1.4965	47.8956	52.9779
3	1.4972	44.4752	57.3361
5	1.4957	50.3652	50.0000

A proposta deste artigo foi comparada com os algoritmos LEACH e E-DEEC. Para avaliação de desempenho é utilizado o final do período de estabilidade da rede e o tempo de vida útil. A escolha dos algoritmos para comparação se dá principalmente pela utilização de informações locais sem considerar critérios de posicionamento, para eleição dos CHs. Além do método de escolha do líder, o algoritmo LEACH, não trata as discrepâncias de energia dos nós que compõem a rede.

Diferente de LEACH, o algoritmo E-DEEC, considera a heterogeneidade dos nós para eleição do CH. Entretanto, utiliza informações locais para eleição do líder e insere três níveis de heterogeneidade, semelhante a proposta apresentada neste artigo.

A Figura 9 exibe a quantidade de nós sensores ativos no tempo de vida útil da rede. Esta medida reflete o número total de nós que ainda não esgotaram sua energia.

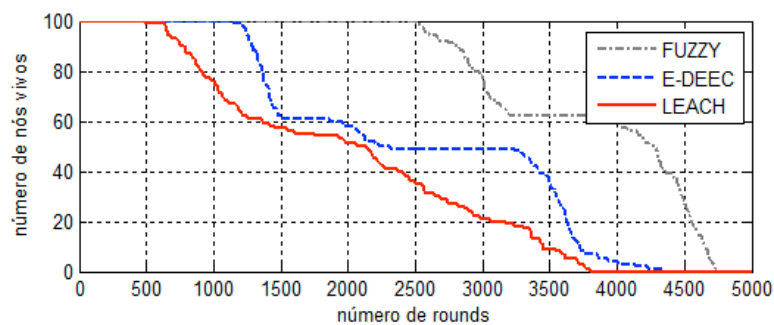


Figura 9. Numero de Sensores Ativos no Período de Simulação.

Os resultados indicam claramente que a inserção de novos níveis de heterogeneidade, a abordagem da lógica *fuzzy* como ferramenta de seleção, a utilização de múltiplos saltos entre os CHs e informações centralizadas na BS, permitem eleger líderes mais eficientes, aumentando o período de estabilidade e o tempo de vida da rede.

A proposta apresenta melhores resultados, quando comparado com os algoritmos LEACH e E-DEEC. O algoritmo LEACH apresentou o menor período de estabilidade, ocorrendo por volta de 500 *rounds*. O algoritmo E-DEEC apresentou melhor desempenho sobre o LEACH, com o período de instabilidade da rede iniciado por volta 1148 *rounds*. Como observado na Figura 10, a proposta mostra um melhor desempenho

sobre os algoritmos comparados, aumentando o período de estabilidade da rede até aproximadamente 2500 *rounds*, quando ocorre a primeira inatividade de um nó por falta de energia.

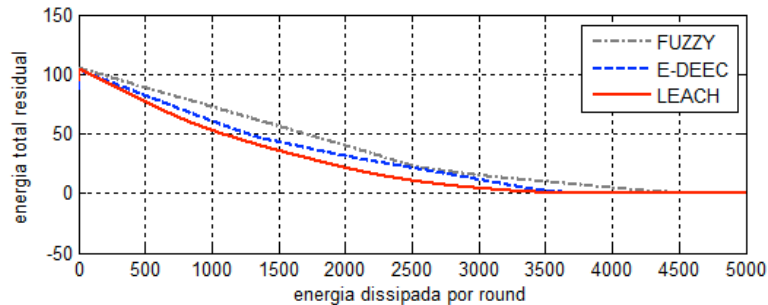


Figura 10. Energia Total Residual de LEACH, E-DEEC e FUZZY.

A Figura 10 exibe a energia dissipada pela rede ao longo dos 5000 rounds de simulação para cada algoritmo comparado. O total de energia para cada rede é de 104.5J. A dissipação de energia apresenta um declínio linear ao longo de 2500 *rounds*, para a proposta apresentada e para o algoritmo E-DEEC por volta de 1500 *rounds*, mudando a partir do momento em que o primeiro nó na rede fica inativo, quebrando o período de estabilidade. Ambos os algoritmos, *Fuzzy* e E-DEEC, permitem tratar as discrepâncias energéticas de cada nó na rede para eleição do CH, enquanto o algoritmo LEACH apresenta maior dissipação de energia por *round*, consequência dos problemas descritos anteriormente sobre a forma de eleição de CH pelo algoritmo e a falta de tratamento discriminatório das discrepâncias energéticas dos nós que formam a rede.

6. Conclusões

Os resultados indicam que a proposta apresentada oferece grandes vantagens, permitindo selecionar os nós mais adequados para líderes do grupo a cada *round* com base nos valores de defuzzificação do Sistema *Fuzzy*, como também, a utilização da Lógica *Fuzzy* como ferramenta de decisão para implementação de múltiplos saltos entre CHs, uma vez que minimiza a dissipação de energia dos CHs selecionados mais afastados do ponto de coleta. A inserção de três níveis de heterogeneidade, correspondente aos sensores normais, avançados e super sensores, contribui consideravelmente para o aumento do período de estabilidade da rede, uma vez que esta inserção dá a rede maior recurso energético. Entretanto, os resultados indicam que se esta discrepância não for considerada no momento de seleção do CH ela não influencia de forma considerável no aumento do período estável.

Outra grande vantagem que contribui para os resultados obtidos neste trabalho é a utilização de um controle central na BS. Por não possuir severas limitações de energia, processamento e armazenamento como os nós que formam a rede, a BS apresenta vantagens sobre o processamento local de informações em cada nó, processo este encontrado nos algoritmos tradicionais para eleição de CHs, o envio de atualizações das informações de nível de energia dissipada dos nós em cada *round*. Entretanto, mesmo com esta atualização a proposta ainda apresenta melhorias sobre os outros modelos apresentados. Outra vantagem do controle central na BS está no momento de seleção do CH, por ter o papel de informar a rede sobre os líderes selecionados para cada *cluster*, previamente divididos pelo algoritmo *k-means*.

Este processo difere-se do processo encontrado nos algoritmos que utilizam informações locais para seleção de seu líder, cabendo ao próprio CH eleito enviar mensagens em *broadcast* para a rede, gerando dissipação de energia no momento da propagação. Finalmente, o trabalho apresentado tem a principal contribuição na eleição do CH mais eficiente, considerando sua localização e discrepâncias de níveis de energia, como também, na inclusão de novos níveis de heterogeneidade, permitindo aumentar o período de estabilidade da rede, ou seja, o período que a rede é totalmente funcional, aumentando consideravelmente o tempo de vida útil em RSSF heterogêneas.

Referências

- [1] Pottie, G. J., Kaiser, W. J. (2000) "Wireless integrated network sensors (WINS)". *Communications of the ACM*. 43, 5, 51-58.
- [2] Akyildiz, I.F.; Weilian Su; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E. (2002) "A survey on sensor networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol.40, no.8, pp. 102- 114.
- [3] Saini, P., Sharma, A. K., (2010) "E-DEEC- Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering scheme for heterogeneous WSN," *Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC)*, 1st International Conference on , vol., no., pp.205-210, 28-30.
- [4] Quing, L., Zhu, Q., Wang, M. (2006) "Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks". *ELSEVIER, Computer Communications* 29, pp 2230- 2237.
- [5] Mubarak, T.M., Sattar, S. A., Rao, G. A., Sajitha, M. (2011)"Intrusion detection: An energy efficient approach in heterogeneous WSN," *Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)*, International Conference on vol., no., pp.1092-1096, 23-24.
- [6] Han, L. (2010) "LEACH-HPR: An energy efficient routing algorithm for Heterogeneous WSN," *Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS)*, 2010 IEEE International Conference on , vol.2, no., pp. 507-511, 29-31.
- [7] Smaragdakis, G., I. M., Bestavros A. (2004) "SEP: A Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks", in: *Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA)*.
- [8] Mubarak, T.M., Sattar, S. A., Rao, G. A., Sajitha, M. (2011) "Intrusion detection: An energy efficient approach in heterogeneous WSN," *Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT)*, 2011 International Conference on , vol., no., pp.1092-1096, 23-24.
- [9] Quing, L., Zhu, Q., Wang, M., (2006) "Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks". *ELSEVIER, Computer Communications* 29, pp 2230- 2237.
- [10] Yan, B., Wu, X., Zhou, X. (2010) "A Improved Base Station Cooperative Mobile Strategy for WSN with Finite Powered Cluster Heads" *Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 6th International Conference, vol., no., p.1-4, 23-25.
- [11] Zadeh, L. A. (1965) "Fuzzy Sets. Information and Control", vol. 8, pp 338- 353.
- [12] Saini, P., Sharma, A. K. (2010) "E-DEEC- Enhanced Distributed Energy Efficient Clustering scheme for heterogeneous WSN," *Parallel Distributed and Grid Computing (PDGC)*, 2010 1st International Conference on , vol., no., pp.205-210, 28-30.