Estratégia centralizada energeticamente eficiente para RSSF heterogêneas utilizando Lógica Fuzzy

M. Christiano, M. Alexandre, C. Tassio, J. Jailton, T. Carlos

***Resumo* — As restrições de energia impostas pela capacidade limitada da bateria interna dos nós sensores estimulam o desenvolvimento de algoritmos energeticamente eficientes para aumentar o período de estabilidade e o tempo de vida útil das RSSF. Neste artigo, é proposto um controle centralizado na Estação Base para eleger *Cluster Heads* mais eficientes, considerando três tipos de nós sensores com diferentes níveis de energia. O controle centralizado utiliza o algoritmo *k-meas*, responsável pela divisão dos *clusters,* e Lógica *Fuzzy* pra a eleição dos *Cluster Heads*. As simulações indicam que um controle centralizado e a inserção de três níveis de heterogeneidade permitem aumentar o período de estabilidade e o tempo de vida útil em RSSF.**

.

***Palavras-chave* — RSSF heterogêneas, Cluster Head, Lógica Fuzzy, k-means.**

I. INTRODUÇÃO

Os avanços nas áreas de microprocessamento, sistemas micro eletromecânicos (MEMS – Micro Electro Mecanical System) e comunicação sem fio, estimulam o desenvolvimento de equipamentos sensores que podem ser utilizados em diversas áreas de aplicação.

Representando uma subclasse das redes *ad hoc* sem fio, as RSSF (Redes de Sensores Sem Fio) são consideradas como uma nova geração de sistemas embarcados de tempo real com recursos computacionais, energia e memória limitados. Estas redes podem apresentar grande número de nós sensores sem fio cooperando entre si para realizar tarefas substanciais, que simplificadamente, reportam a informação sobre um fenômeno monitorado para um ponto de coleta, denominado BS (*Base Station*).

Um dos principais entraves apresentados nestas redes está relacionado à restrição de energia devido à capacidade limitada das baterias internas dos nós sensores. Vários fatores são culminantes para o desgaste da bateria dos nós, sendo o modulo de rádio um dos principais consumidores de energia dos nós sensores no processo de transmissão de dados, [9].

O consumo de energia pode ser reduzido, admitindo que apenas alguns nós possam enviar dados para a BS. RSSF baseada em uma estrutura hierárquica organiza seus nós em agrupamentos (*clusters*) e elege 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 agrega-los e posteriormente os encaminha para a BS, [1].

A estrutura hierárquica pode ser formada por dois tipos de redes, homogêneas ou heterogêneas. Em redes homogêneas, os nós apresentam as mesmas características, como por exemplo, capacidade energética, processamento e rádio, [6]. Em estruturas heterogêneas, alguns nós sensores podem apresentam requisitos de hardware diferenciados, como melhor capacidade energética. Estes nós sensores, dão a rede um maior período de estabilidade [11, 10]. Trabalhos que consideram a heterogeneidade dos nós podem ser encontrados em [11, 8, 6, 2, 10, 12].

O algoritmo LEACH (*Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy*) proposto por [5], 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 lideres 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, este artigo propõe uma estratégia para eleição do CH ideal em RSSF heterogêneas utilizando Lógica *Fuzzy* com base em informações

M. Christiano. Author is with the Federal University of Pará (UFPA) Institute of Electrical and Computer Engineering, CO 66.075-110 Belém, Brazil. phone: 55-91-32017634; fax: ; e-mail: christiano@ufpa.br.

M. S. Alexandre, Author, is with the Department of Computer of Science, Federal University of Pará, Belém, Brazil, CO 66.075-110 Brazil. Fax: 55 – 91- 3201-7405; e-mail: amelo@ufpa.br.

C. Tassio. Author is with the Federal University of Pará (UFPA) Institute of Electrical and Computer Engineering, CO 66.075-110 Belém, Brazil. phone: 55-91-32017634; fax: ; e-mail: tassioccarvalho@yahoo.com.br

J. Jailton. Author is with the Federal University of Pará (UFPA) Institute of Electrical and Computer Engineering, CO 66.075-110 Belém, Brazil. phone: 55-91-32017634; fax: ; e-mail: josejailtonjunior@yahoo.com.br

T. Carlos. Author is with the Federal University of Pará (UFPA) Institute of Electrical and Computer Engineering, CO 66.075-110 Belém, Brazil. phone: 55-91-32017634; fax: ; e-mail: cartav@ufpa.br

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*. Os critérios adotados para de seleção de CHs são: nível de energia, centralidade e proximidade para a BS. A inserção de três tipos de nós com recursos energéticos diferenciados e a utilização de informações centralizadas na BS, permitem eleger *cluster heads* 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.

II. Trabalhos Correlatos

O Algoritmo LEACH (*Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy*), proposto por [5], elege o CH com base em informações locais a cada novo ciclo (*round*). Para que o nó seja eleito, o numero escolhido deve ser menor que o limiar *T*. Após a eleição, o novo CH envia mensagens de anuncio 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 selecionar CH próximos à borda da rede. Outro problema do algoritmo é descrito no trabalho apresentado em [12] SEP, 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 LEACH, o algoritmo DEEC, proposto por [10] utiliza informações locais para eleição do CH. Entretanto, o algoritmo proposto pelos autores é capaz de tratar a heterogeneidade da rede. Os CHs são selecionados utilizando uma probabilidade com base na energia residual dos nós e a energia média da rede. A heterogeneidade inserida pelos autores de DEEC diz respeito apenas à capacidade energética diferenciada de um conjunto de nós de que formam a rede. Como a maioria dos algoritmos baseados no algoritmo LEACH, DEEC utiliza de informações locais para seleção dos CHs. As imagens apresentadas pelos autores ilustram claramente a eleição do lideres próximos da borda da rede.

Baseado no algoritmo DEEC, os algoritmos E-DEEC proposto por [11] e LEACH-HPR proposto por [6] também considera a energia residual dos nós no processo de eleição para o CH da rede. O diferencial dos algoritmos está na inserção de três tipos de nós com diferentes níveis de energia: nós normais, nós avançados e super nós. Os algoritmos propostos pelos autores permitem prolongar o período totalmente funcional da rede com a adição dos super nós. Tal como em DEEC, os trabalhos apresentados pelos autores 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 proposto por [3].

Em [13] os autores propõem um algoritmo que considera uma estratégia hibrida 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. O algoritmo BS-CH *hybrid mobile strategy* permite a movimentação da estação base para minimizar a distância para o CH e o consumo na transmissão de dados, desconsiderando a energia consumida e supondo que a estação base é móvel, sem informação se a fonte de alimentação é continua.

III. Lógica Fuzzy e Algoritmo k-means

Proposto por [14] 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 contrario da Lógica booleana, na lógica *fuzzy*, a avaliação de uma determinada preposição pode compreender valores, 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.

IV. Modelagem

Para a solução proposta neste trabalho, a escolha do *cluster head* se da 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 inicio do processo de formação dos *clusters*. A divisão dos *clusters* é feita utilizando o algoritmo *k-means*; (ii) A segunda etapa consiste na seleção do CH para cada *cluster* formado pelo *k-means*. Os dados dos de cada *cluster* são carregados no sistema *fuzzy*. Após o resultado de seleção do CH, 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 envia-los a BS.

A. 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 $\boldsymbol{d}$, o radio consome:

$$E_{Tx}(k,d) = E_{elec} * k + \varepsilon_{fs} * k * d^2 \quad para\ d < d_0$$

$$E_{Tx}(k,d) = E_{elec} * k + \varepsilon_{amp} * k * d^4 \quad para\ d \geq d_0 \qquad (1)$$

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

A energia dissipada na transmissão e recepção do radio é representada por $E_{elec} = 50\,nJ/bit$. Dois modelos são utilizados 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 a energia dissipada pelo amplificador de transmissão é dada por $E_{fs} = 10\ pJ/bit/m^2$, caso o limiar seja ultrapassado o modelo utilizado $E_{amp} = 0.0013\,pJ/bit/m^4$. Onde $d_0 = \sqrt{E_{fs}/E_{amp}}$, [11, 5].

B. 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 à energia dos nós. Logo, os super nós e nós avançados representam maior probabilidade para eleição do CH, Fig. 1.

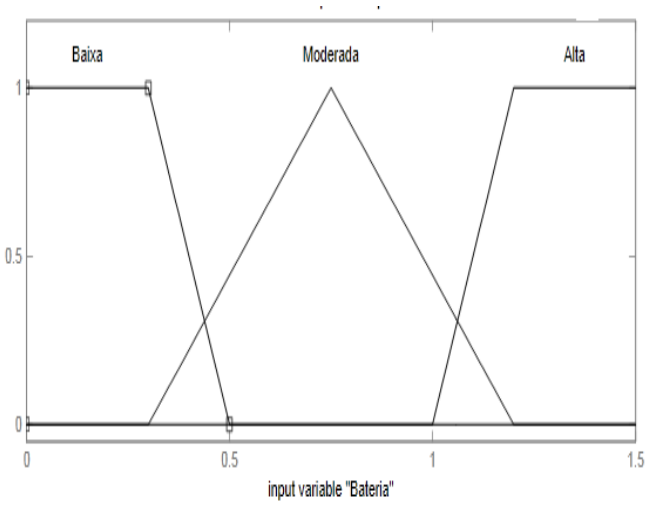

Fig. 1. Variável bateria com os valores linguísticos correspondentes aos níveis de energia dos três tipos de nós sensores disponíveis na rede.

(ii) Centralidade – A variável centralidade diz respeito ao posicionamento do nó em relação ao centro do *cluster*. 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, Fig. 2.

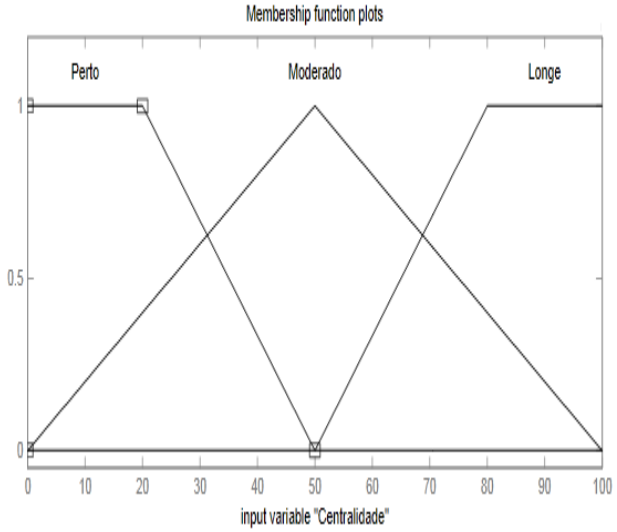

Fig. 2. Variável linguística centralidade.

(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, Fig. 3

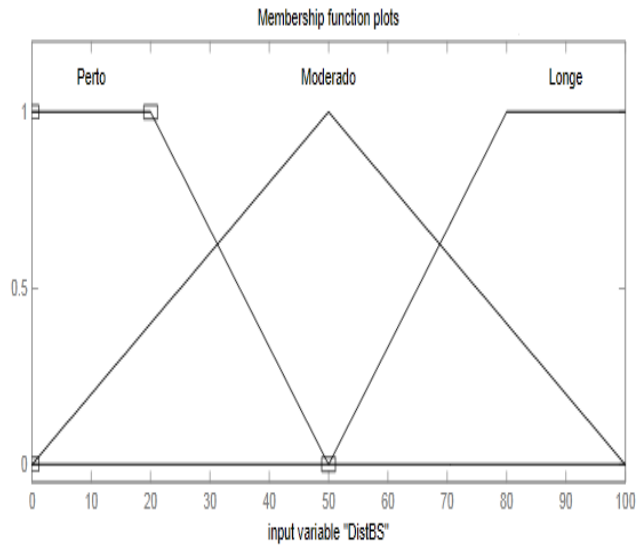

Fig. 3. Variável linguística Distância para BS.

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.

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*, Fig. 4.

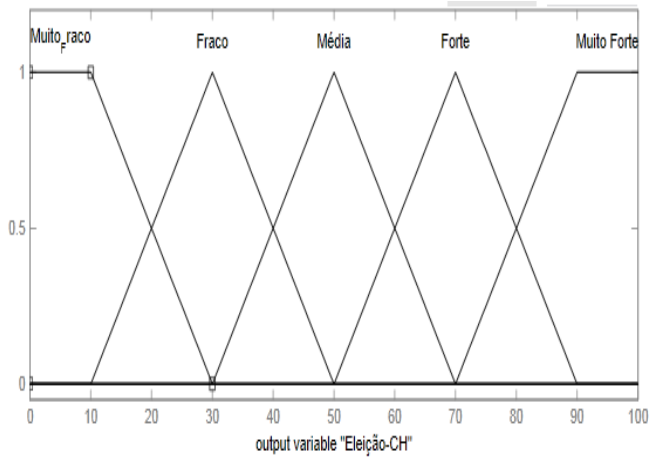

Fig. 4. Saída do sistema *fuzzy*, consequentes do sistema.

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 formação da Base de Regras do sistema é compreendida por vinte e sete regras 3^3=27, Tabela I. 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.

C. *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. Os nós dissipam energia neste processo. Para determinar os valores de centralidade, a BS seleciona cada nó e utiliza o cálculo da 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 seja 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 I
BASE DE REGRAS DO SISTEMA FUZZY

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

O mesmo processo ocorre no calculo 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.

D. *Modelo de Sistema Fuzzy*

Para o modelo de Lógica *Fuzzy*, foi utilizado o *Fuzzificador Singleton*, máquina de inferência *Mamdani* e *defuzzificador* centro de gravidade. Para cada entrada (x_1, x_2, x_3), a Saída do sistema é calculada, como mostra a Eq. (4).

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

E. Modelagem da rede

Para o modelo de rede, assumimos que *N* sensores estão distribuídos em uma área N x 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 avançado e super sensores na rede é semelhante ao utilizado por E-DEEC:

$$N.(1 - mf) \quad (5)$$

$$N.mf(1 - mp) \quad (6)$$

$$N.mf.mp \quad (7)$$

Onde mf é a fração do numero total de N nós sensores e mp a percentagem para o numero 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 [11].

$$E_{total} = N.(1 - mf).E_o + N.mf(1 - mp).(2).E_o + N.mf.mp.E_o(1 + e) = N.E_o(1 + mf(2 + mp.e) \quad (8)$$

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 $1 + mf(2 + mp.e)$.

F. Propriedades da rede

No modelo de rede descrito anteriormente, apresentamos as características dos nós que formam a rede, quanto ao seu nível de energia. 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 tem dados para transmitir para o CH.

VI. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A simulação é dividida em *rounds*, a cada *round* obtém-se um valor de saída com base nós parâmetros de entrada do sistema e um novo CH é eleito para cada *k cluster*. Estes valores são atualizados para entrada do *round* seguinte. Cada *round* executa as fases descritas na seção 4.

Cada nó é distribuído aleatoriamente em uma área de 100 m^2, onde á classificação do numero de nós normais, avançados e super com seus respectivos níveis de energia, é calculada utilizando as Eq. 5 e 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 e para os nós avançados e de 1.0J e para super nós 1.5J. A BS é previamente definida com as coordenadas x= 50 e y=50. O modelo de rádio que foi utilizado segue a descrição em (1) e (2).

100 nós estão distribuídos, 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 e gerada em 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. O consumo de energia dissipada no envio das informações de cada nó é calculado 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 divide os nós 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 *C*. 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 y, determinando a chance deste nó se tornar *cluster head*. No processo de *defuzzyficação*, o nó que apresentar maior valor de saída, será eleito como CH ideal no *round* atual.

A Fig. 5, exibe a divisão dos *clusters*, em uma área de 100 m , e o final da eleição de CHs no *round* 0, sendo representado por '◊' o *cluster head* eleito pelo sistema, 'O' o centro do cluster e □ representa a BS.

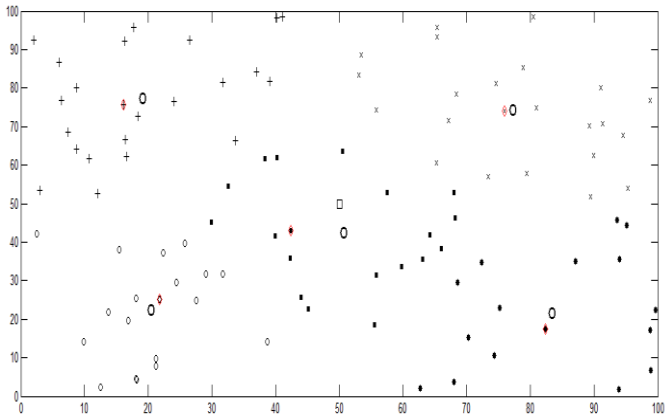

Fig. 5. CHs selecionados pelo sistema *fuzzy* no *round* 0.

Comparamos nossa proposta com os algoritmos LEACH e DEEC. Para avaliação de desempenho utilizamos 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 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 DEEC, considera a heterogeneidade dos nós para eleição do CH. Entretanto, utiliza informações locais para eleição do líder e apenas dois

níveis de heterogeneidade enquanto nossa proposta utiliza três níveis.

A Fig. 6 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 toda sua energia em um determinado período de simulação.

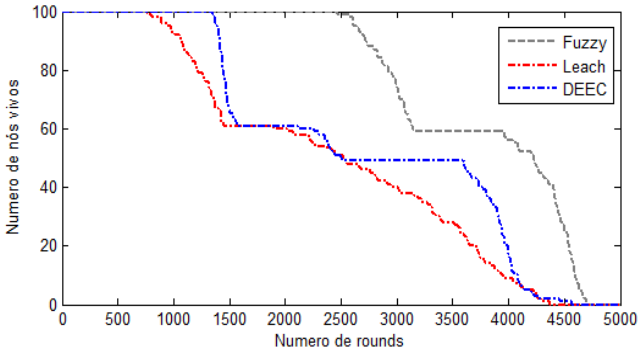

Fig. 6. Numero de sensores ativos no período de simulação

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

A proposta resulta em melhores resultados, quando comparado com os algoritmos LEACH e DEEC. O algoritmo LEACH apresentou o menor período de estabilidade, com a FND ocorrendo no *round* 765. O algoritmo DEEC apresentou melhor desempenho sobre o LEACH, com o período de instabilidade da rede iniciado por volta 1350 *rounds*. Nossa proposta, como observado na Fig. 6, mostra um melhor desempenho sobre os algoritmos comparados, aumentando o período de estabilidade da rede até aproximadamente 2470 *rounds*, quando ocorre a primeira inatividade de um nó por falta de energia.

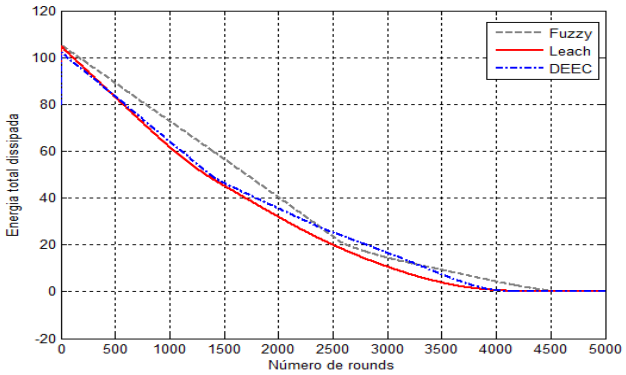

Fig. 7. Energia total residual de LEACH, DEEC e FUZZY.

A Fig. 7 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 nossa proposta e para o algoritmo 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 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.

VII. Conclusões

Os resultados indicam que a proposta apresentada em nosso trabalho, oferece grandes vantagens, permitindo selecionar os nós mais adequados para lideres do grupo a cada *round*, com base nos valores de defuzificação do sistema *fuzzy*. 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, logo que, com esta inserção, a rede passa a possuir maiores recursos energéticos. Entretanto, os resultados indicam que, se esta discrepância não for considerada no momento de seleção do CH, não influencia de forma considerável no aumento do período de estabilidade.

Outra grande vantagem que contribui para os resultados obtidos neste trabalho é a utilização de um cotrole 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 do CH. 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 concerne no momento de seleção do CH, por ter o papel de informar a rede sobre os lideres selecionados para cada *cluster*, previamente dividido 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 eficientes, considerando sua localização e discrepâncias de níveis de energia, como também, na inclusão de novos níveis de heterogeneidade, permitindo, desta forma, 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 redes de sensores sem fio heterogêneas.

Referencias

[1] Akyildiz, I.F.; Weilian Su; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E.; , "A survey on sensor networks," *Communications Magazine, IEEE* , vol.40, no.8, pp. 102- 114, Aug 2002.

[2] Badi, A., Mahgoub, I., Slavik, M., Ilyas, M. , "Investigation of the effects of network density on the optimal number of clusters in hierarchical Wireless Sensor Networks (WSNs)," High-Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET), 2010 , vol., no., pp.171-177, 19-21 Dec. 2010.

[3] Guo, L., Xie, Y., Yang, C., Jing, Z., "Improvement on LEACH by combining Adaptive Cluster Head Election and Two-hop transmission," *Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), 2010 International Conference on* , vol.4, no., pp.1678-1683, 11-14 July 2010.

[4] Gupta I., Riordan, D.; Srinivas S., "Cluster-head election using fuzzy logic for wireless sensor networks," *Communication Networks and Services Research Conference, 2005. Proceedings of the 3rd Annual* , vol., no., pp. 255- 260, 16-18 May 2005.

[5] Heinzelman, W., Chandrakasan A., and H. Balakrishnan, **"**Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proc. of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences(HICSS)*, Maui, HI, Jan. 2000, pp. 3005 – 3014.

[6] Han, L., "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 Oct. 2010.

[7] Jain, A. K., Murty, M. N., and Flynn, P. J. (1999). Data clustering: a review. ACM Comput. Surv., 31(3):264–323.

[8] Mubarak, T.M., Sattar, S. A., Rao, G. A., Sajitha, M., "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 March 2011.

[9] Pottie, G. J., Kaiser, W. J., "Wireless integrated network sensors (WINS)". Communications of the ACM. 43, 5 (maio de 2000), 51-58.

[10] Quing, L., Zhu, Q., Wang, M., "Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks". ELSEVIER, Computer Communications 29, 2006, pp 2230- 2237.

[11] Saini, P., Sharma, A. K., "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 Oct. 2010.

[12] Smaragdakis, G., I. M., Bestavros A., "SEP: A Stable Election Protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks", in: Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA 2004), 2004.

[13] Yan, B., Wu, X., Zhou, X. "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 set. 2010.

[14] Zadeh, L. A. "Fuzzy Sets. Information and Control", 1965.