

# LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS GSM COM SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY

RAFAEL SARAIVA CAMPOS\*, LISANDRO LOVISOLO\*

\* *Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, RJ, Brazil*

Emails: [rafael\\_saraiva@ig.com.br](mailto:rafael_saraiva@ig.com.br), [lisandro@uerj.br](mailto:lisandro@uerj.br)

**Resumo**— Neste trabalho dois sistemas de inferência fuzzy são propostos para estimar a posição de terminais móveis GSM. Em ambos os sistemas, o cálculo da posição é baseado no parâmetro de alinhamento temporal definido pela célula servidora e nos níveis de sinal recebidos das células vizinhas, medidos e reportados pela estação móvel. Vetores representando as rodovias principais são utilizados para restringir o erro de localização de unidades móveis veiculares. Testes de campo foram conduzidos para avaliar a acurácia das soluções apresentadas.

**Palavras-chave**— Localização de Estações Móveis, Nível de Sinal Recebido, Sistemas de Inferência Fuzzy.

**Abstract**— In this work two fuzzy inference systems are proposed for GSM mobile station positioning. In both systems the positioning is based on the time alignment parameter set by the serving cell and on the neighbour cells received signals, which are measured and reported by the mobile station. Vectors representing the main roads are used to further reduce the location error of vehicular mobile stations. Field tests were conducted to evaluate the accuracy of the proposed solutions.

**Keywords**— Mobile Station Positioning, Received Signal Strength, Fuzzy Inference Systems.

## 1 Introdução

Em vários países, órgãos reguladores definiram requisitos para a localização de telefones móveis celulares (MS - *mobile stations*) (Federal Communications Commission, 1999; European Commission, 2003) originando chamadas para números de emergência. No Brasil, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) ainda não adotou normas semelhantes, contudo isto pode tornar-se realidade num futuro próximo. Neste cenário, as operadoras deverão ser capazes de localizar qualquer MS originando uma chamada de emergência. Assim, torna-se essencial a proposição de alternativas para a localização dos terminais legados - i.e., sem qualquer suporte específico a serviços de localização - utilizando apenas informações já disponíveis na rede GSM (*Global System for Mobile Communications*) ou fornecidas pelo MS através do relatório de medidas (MR - *measurement report*).

O primeiro Sistema de Inferência Fuzzy (FIS - *Fuzzy Inference System*) proposto neste trabalho tem como variáveis de entrada os níveis de sinal (RSS - *Received Signal Strength*) de 5 células GSM: a melhor servidora e as 4 vizinhas recebidas com maior intensidade. Na saída, após a *defuzzificação*, este FIS fornece os valores numéricos dos pesos a serem aplicados às coordenadas geográficas destas 5 células na triangulação, ao final da qual é obtida uma estimativa da posição do MS. O segundo FIS tem como variáveis de entrada o alinhamento temporal (TA - *Time Alignment*), além dos valores de RSS de algumas células pré-selecionadas. Estas células atuam como referência (*radio beacons*) no processo de localização. Nesta segunda abor-

dagem, a utilização de vetores de rodovias referenciados geograficamente permite reduzir o erro de localização de MS's veiculares.

O restante deste trabalho divide-se nas seguintes seções: na Seção 2 são apresentados os parâmetros da interface aérea GSM utilizados na localização do MS; na Seção 3 são apresentados dois métodos de localização baseados na identidade da célula; na Seção 4 os dois FIS propostos são descritos; na Seção 5 os resultados dos testes de campo são discutidos. Por fim, na Seção 6 são apresentadas as conclusões e propostas de aprimoramentos.

## 2 Parâmetros da Interface Aérea GSM utilizados na Localização do MS

Os parâmetros listados nesta seção estão contidos no MR, com exceção do TA. Todos eles são repassados pela célula servidora à BSC (*Base Station Controller*), onde ficam disponíveis para utilização pela aplicação residente no servidor de localização.

### 2.1 Identidade da Célula Servidora e das Células Vizinhas

A célula servidora é identificada unicamente pelo parâmetro CI (*Cell Identifier*). Os CI's das células vizinhas não são reportados no MR, porém podem ser obtidos a partir dos pares BCCH (*Broadcast Control Channel*) + BSIC (*Base Station Identity Code*) (ETSI, 1998). O CI tem valor único dentro de uma mesma Área de Localização (LA - *Loca-*

tion Area). Idealmente, cada par BCCH+BSIC também deve ser único em uma mesma LA.

## 2.2 Alinhamento Temporal

O alinhamento temporal dinâmico é empregado para evitar colisão de pacotes de diferentes MS's na recepção no setor servidor. Para este propósito, é utilizado o parâmetro TA, que é calculado pela célula servidora para cada MS em modo ativo. O valor de TA é expresso em múltiplos do período  $T_b$  de um bit na interface aérea GSM, podendo assumir valores inteiros entre 0 e 63. Sejam  $c$  a velocidade da luz e  $d$  a extensão do percurso do sinal entre a antena receptora e o MS. O valor de TA está relacionado à  $d$  por (ETSI, 1998):

$$TA = \left\lfloor \frac{2d/c}{T_b} \right\rfloor \quad (1)$$

## 2.3 Nível de Sinal Recebido

O MS em modo ativo monitora o RSS do canal de controle por difusão da célula servidora e de até 6 células vizinhas. O RSS é quantizado utilizando 6 bits em passos de 1 dB de 0 (-110 dBm ou inferior) até 63 (-48 dBm ou superior), e reportado no MR a cada 480 ms através do parâmetro Nível de Sinal Recebido (RXLEV - Received Signal Level). Como o canal de controle por difusão é transmitido com potência constante (ETSI, 1998), o RXLEV fornece uma maneira de estimar as distâncias entre o MS e as antenas da célula servidora e das células vizinhas.

## 3 Métodos de Localização Baseados na Identidade da Célula

O método de localização mais simples assume que a posição do MS é igual à da antena da célula servidora. Este método é denominado **CI-PLAIN** (Spirito et al., 2001). Outra alternativa consiste em utilizar não apenas o CI do melhor servidor, mas também o CI das células vizinhas. Neste caso assume-se que o MS está localizado no centróide do polígono cujos vértices estão situados nas coordenadas destas células. Este método é denominado **CI-AVG** (Campos and Lovisolo, 2008). Seja  $C$  o conjunto de células reportado pelo MS no MR. Sejam  $x_i$  e  $y_i$  as coordenadas da  $i$ -ésima célula e  $\#C$  a cardinalidade de  $C$ , onde  $1 \leq \#C \leq 7$ . A posição estimada  $(x, y)$  do MS é dada por:

$$x = \frac{1}{\#C} \sum_{i \in C} x_i, \quad y = \frac{1}{\#C} \sum_{i \in C} y_i. \quad (2)$$

A Fig. 1 mostra um conjunto de 7 Estações Rádio-Base (BS - Base Stations) omnidirecionais e dispostas em um padrão hexagonal. O ponto M indica a posição real do MS. Nesta posição, o MS recebe sinais da célula 0 (melhor servidora) e das células 1, 5 e 6 (células vizinhas). A posição estimada do MS pelo método **CI-AVG** é indicada pelo ponto

M', que corresponde ao centróide do polígono cujos vértices são BS<sub>0</sub>, BS<sub>1</sub>, BS<sub>5</sub> e BS<sub>6</sub>. O erro de localização é igual ao comprimento do segmento de reta MM'.

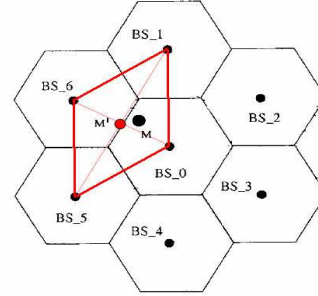


Figura 1: Estimativa de posição do MS pelo método CI-AVG.

## 4 Localização utilizando FIS

Os dois sistemas de inferência fuzzy propostos são apresentados a seguir. Ambos utilizam os operadores de Zadeh (Cox, 1994) para a intersecção (*min*), união (*max*), implicação (*min*) e agregação (*max*). O método de defuzzificação é o centróide.

### 4.1 FIS-1: o método do centróide ponderado

Geralmente, quanto maior o valor de  $RXLEV_i$ , mais próximo o MS está da  $i$ -ésima célula. Porém, em condições de propagação sem linha de visada - predominantes em áreas urbanas - isto pode não ocorrer. O valor de  $RXLEV$  de uma célula mais distante pode ser maior, devido à presença de obstáculos entre o MS e uma estação próxima. Contudo, considerando o caso mais geral, é possível aplicar um fator de ponderação relacionado ao  $RXLEV$  para reduzir o erro de localização do método **CI-AVG**. Assim, as células com maior  $RXLEV$  teriam maior peso na triangulação, conforme a equação:

$$x = \frac{\sum_{i \in C} x_i W_i}{\sum_{i \in C} W_i}, \quad y = \frac{\sum_{i \in C} y_i W_i}{\sum_{i \in C} W_i}. \quad (3)$$

onde  $W_i$  é o peso da  $i$ -ésima célula. O valor de  $W_i$  é obtido após a defuzzificação da  $i$ -ésima variável linguística na saída do FIS-1.

O FIS-1 tem 5 variáveis linguísticas de entrada obtidas pela fuzzificação dos valores de  $RXLEV$  do melhor servidor e das 4 células vizinhas recebidas com maior intensidade. Seja a  $i$ -ésima variável de entrada  $u_i$ , com  $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ . O universo de discurso de  $u_i$  é expresso pelo conjunto  $U_i = \{0, 1, 2, \dots, 63\}$ . Os valores de  $u_i$  são representados por um conjunto de termos  $T_i$  que cobre todo o universo de discurso  $U_i$ : extremamente pequeno (ES - extremely small), muito pequeno (VS - very small), pequeno (S - small), médio (M - medium), grande (L - large) e muito grande (VL - very large). A cada elemento  $t_{i,k} \in T_i$ , com  $k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , corresponderá um conjunto

fuzzy representado por uma função de pertinência definida empiricamente, de modo a minimizar o erro de localização. No FIS-1, as funções de pertinência dos conjuntos fuzzy de entrada são triangulares e uniformemente distribuídas ao longo do universo de discurso de cada variável de entrada, conforme ilustra a Fig. 2.

O FIS-1 é uma variante do sistema proposto em (Shen et al., 2002), onde os autores utilizam um FIS cujas variáveis de entrada são os níveis recebidos do canal piloto de até 3 estações CDMA (*Code Division Multiple Access*). Um modelo representando o canal rádio-móvel permite transformar estes níveis de sinal medidos em distâncias. Cada distância, obtida após a *defuzzificação*, corresponde ao raio de um círculo centrado na respectiva estação rádio-base. Com 3 raios, obtém-se 3 círculos secantes. A partir das intersecções destes círculos, é possível estimar a posição do MS. Já o FIS-1 utiliza os níveis de sinal medidos no canal de controle de até 5 estações GSM e obtém a estimativa de posição de maneira mais simples e computacionalmente menos intensa, apenas traduzindo estes níveis de sinal em pesos a serem aplicados no cálculo do centróide do polígono definido pelas estações medidas. Além disso, no FIS-1, o nível de sinal do setor melhor servidor é tratado de forma diferenciada, pois observou-se empiricamente que quando todos os canais de controle monitorados são recebidos com valor muito alto, deve-se atribuir um peso maior ao setor melhor servidor para reduzir o erro de localização. A localização anterior do MS pode ser usada para reduzir o erro das estimativas futuras, seja através de filtros de média móvel (Shen et al., 2002) ou através da inserção dessa informação como variáveis linguísticas na entrada do FIS (Lee et al., 2004).

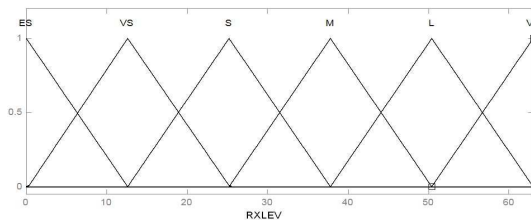


Figura 2: Funções de pertinência das variáveis de entrada do FIS-1.

O FIS-1 tem 5 variáveis linguísticas na saída, uma para cada variável de entrada. Seja a  $i$ -ésima variável de saída  $v_i$ , com  $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ . O universo de discurso de  $v_i$  é o conjunto  $V_i = \{v_i \in \mathbb{R}_+ | v_i \in [0, 1]\}$ . O conjunto de termos que descreve o universo de discurso das variáveis de saída é igual ao das variáveis de entrada. No FIS-1, as funções de pertinência para a primeira variável de saída (que corresponde ao peso do melhor servidor) são ligeiramente diferentes em relação às

demais variáveis de saída (que correspondem aos pesos das células vizinhas), conforme ilustrado na Fig. 3 e na Fig. 4. A principal diferença é que, mesmo que todas as variáveis linguísticas de saída sejam VL, a primeira variável, após a *defuzzificação*, receberá o maior valor numérico.

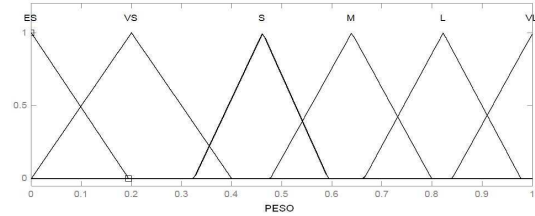


Figura 3: Funções de pertinência da 1ª variável de saída do FIS-1.

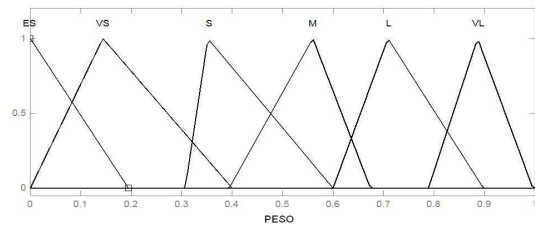


Figura 4: Funções de pertinência da 2ª à 5ª variáveis de saída do FIS 1.

As regras do FIS-1 são obtidas mapeando cada conjunto de entrada no seu correspondente de saída. Como há 5 variáveis de entrada ( $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ), cada uma descrita por 6 termos ( $k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ), haverá 30 regras. Estas podem ser generalizadas como  $R_{i,k}$ : se  $u_i$  é  $t_{i,k}$ , então  $v_i$  é  $t_{i,k}$ , onde  $i$  referencia a  $i$ -ésima variável e  $k$  referencia o  $k$ -ésimo conjunto fuzzy.

#### 4.2 FIS-2: rastreamento veicular utilizando estações de referência

Para a localização de MS's em veículos é possível limitar as estimativas de posição a pontos sobre a malha viária de uma dada região. Se esta região é representada por uma matriz, devem-se saber quais elementos desta matriz estão sobre rodovias. Para tal, é necessário dispor de uma representação vetorial ou matricial geo-referenciada desta malha viária. Para aplicação do FIS-2 neste contexto, selecionou-se um trecho de rodovia na Zona Oeste do Rio de Janeiro com aproximadamente 14 km de extensão. Este trecho foi dividido em 6 seções, e as coordenadas do ponto médio de cada seção foram identificadas. Em seguida, 4 células GSM ao longo desta rodovia foram selecionadas como estações de referência. Estas células são identificadas na Seção 5. A comparação dos valores de RSS e TA em relação a estas estações de referência,

medidos em teste veicular na rodovia, permitiram identificar em que trecho o MS está localizado.

O FIS-2 tem 5 variáveis linguísticas de entrada, obtidas pela *fuzzificação* dos valores de RXLEV das 4 células de referência e do valor de TA. Seja a  $i$ -ésima variável de entrada  $u_i$ , com  $i \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ . O universo de discurso de  $u_i$  é expresso pelo conjunto  $U_i = \{0, 1, 2, \dots, 63\}$ . Os conjuntos de termos que cobrem todo o universo de discurso das variáveis de entrada são  $T_i = \{VS, S, M, L, VL\}$  para  $i < 5$  e  $T_5 = \{S, M, L, VL\}$ . As funções de pertinência dos conjuntos fuzzy representando o universo de discurso da primeira à quarta variáveis de entrada são exibidas na Fig. 5. As funções de pertinência para a quinta variável de saída são exibidas na Fig. 6. Todas as funções de pertinência foram definidas empiricamente de modo a minimizar o erro de localização.

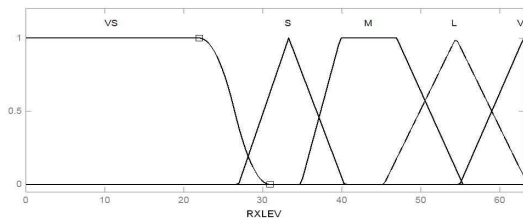


Figura 5: Funções de pertinência da 1ª à 4ª variáveis de entrada do FIS-2.

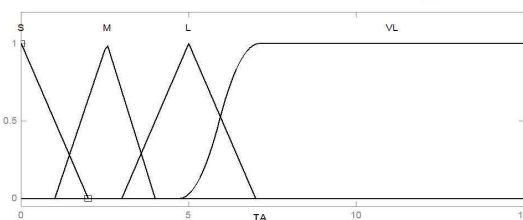


Figura 6: Funções de pertinência da 5ª variável de entrada do FIS-2.

O FIS-2 tem 1 única variável linguística  $v$  na saída, que é a seção da rodovia onde estima-se que o MS esteja localizado. O universo de discurso de  $v$  é o conjunto  $V = \{v \in \mathbb{R}_+ | v \in [1, 6]\}$ . O conjunto de termos que descreve o conjunto  $V$  é  $T = \{S1, S2, S3, S4, S5, S6\}$ . Cada termo descreve uma das seções em que a rodovia foi dividida. As funções de pertinência dos conjuntos fuzzy representando o universo de discurso da variável de saída são exibidas na Fig. 7.

As regras do FIS-2 foram definidas empiricamente, a partir dos valores de RSS e TA observados no teste veicular (ver Seção 5). Apenas 10 regras foram necessárias:

1. Se ( $u_1$  é S) e ( $u_2$  é L) e ( $u_4$  é VS) e ( $u_5$  é M) então ( $v$  é S3).

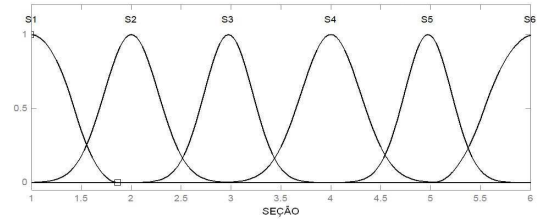


Figura 7: Funções de pertinência da variável de saída do FIS-2.

2. Se ( $u_1$  é VS) e ( $u_2$  é VL) e ( $u_5$  é S) então ( $v$  é S4).
3. Se ( $u_1$  é L) e ( $u_2$  é VS) e ( $u_5$  é S) então ( $v$  é S1).
4. Se ( $u_1$  é VL) e ( $u_2$  é VS) e ( $u_5$  é S) então ( $v$  é S1).
5. Se ( $u_1$  é L) e ( $u_2$  é S) e ( $u_5$  é M) então ( $v$  é S2).
6. Se ( $u_1$  é L) e ( $u_2$  é M) e ( $u_5$  é M) então ( $v$  é S2).
7. Se ( $u_2$  é S) e ( $u_4$  é S) e ( $u_5$  é M) então ( $v$  é S5).
8. Se ( $u_2$  é S) e ( $u_4$  é M) e ( $u_5$  é M) então ( $v$  é S6).
9. Se ( $u_1$  é VS) e ( $u_2$  é VS) e ( $u_4$  é L) e ( $u_5$  é S) então ( $v$  é S6).
10. Se ( $u_3$  é M) e ( $u_5$  é S) então ( $v$  é S6).

O FIS-2 fornece, após a *defuzzificação*, um número real  $v$  entre 1 e 6. As coordenadas da posição estimada do MS são obtidas interpolando as coordenadas dos pontos médios dos segmentos adjacentes. Ou seja:

$$x = X(\lfloor v \rfloor) + \{X(\lfloor v \rfloor + 1) - X(\lfloor v \rfloor)\} \cdot (v - \lfloor v \rfloor) \quad (4)$$

$$y = Y(\lfloor v \rfloor) + \{Y(\lfloor v \rfloor + 1) - Y(\lfloor v \rfloor)\} \cdot (v - \lfloor v \rfloor) \quad (5)$$

onde  $X(k)$  e  $Y(k)$  são as coordenadas do ponto médio da  $k$ -ésima seção da rodovia, com  $k = 1, 2, 3, 4, 5$ .

## 5 Resultados Experimentais

Os dados de entrada foram obtidos a partir de testes realizados nos bairros Centro (Área I) e Santa Cruz (Área II) do município do Rio de Janeiro (Campos and Lovisolo, 2008). O conjunto de equipamentos de teste incluía um telefone GSM ligado e um receptor GPS, ambos conectados a um *laptop* instalado no interior de um veículo. O MS estava em modo ativo em uma rede GSM 850 MHz e para cada MR transmitido o valor de TA foi identificado e a posição do MS foi calculada via GPS. A localização calculada pelo GPS foi tomada como referência, então, para cada MR, o erro de localização é a distância Euclidiana entre a posição fornecida pelo GPS e a posição estimada pelo FIS. Foram coletados 155 MR's na Área I e 527 MR's na Área II.

A Fig. 8 mostra a função de distribuição de probabilidade cumulativa (CDF - *Cumulative Distribution Function*) do erro de localização na Área I. O FIS-1 produziu os melhores resultados, com desvios de 126, 161 e 225 metros para o 50º, 67º e 95º percentis, respectivamente. O erro médio alcançado pelo FIS-1 é 12% inferior ao do **CI-AVG** e 33% menor do que o do **CI-PLAIN**. Os resultados

obtidos na Área I são comparáveis àqueles reportados em (Spirito et al., 2001) para áreas urbanas. A Fig. 9 mostra a rota de teste na Área I (pontos azuis), destacando também as posições estimadas do MS pelo FIS-1 (pontos vermelhos). As células GSM (círculos negros), o contorno dos prédios e o arruamento também são visíveis.

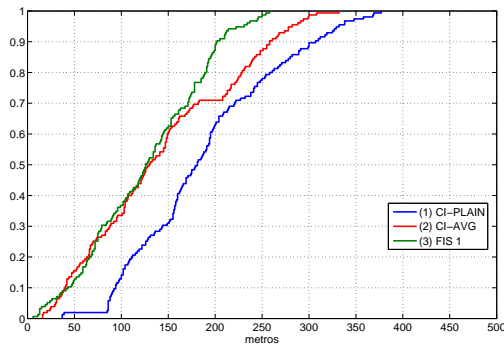


Figura 8: CDF do erro de localização na Área I.

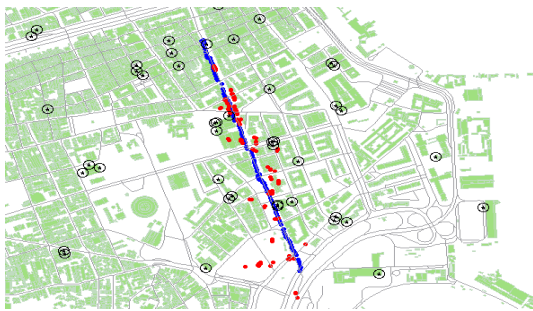


Figura 9: Rota de teste na Área I.

A Fig. 10 mostra a CDF do erro de localização na Área II. Nesta área o FIS-1, embora tenha produzido resultados melhores que o método **CI-AVG**, teve um desempenho ruim, ficando próximo da acurácia atingida pelo método **CI-PLAIN**. Já o FIS-2 reduziu a incerteza no posicionamento do MS, atingindo erros de 596, 757 e 3268 metros para o 50°, 67° e 95° percentis, respectivamente. O erro médio do FIS-2 foi 58% inferior ao do **CI-AVG** e 45% menor que o do **CI-PLAIN**. A Fig. 11 mostra a rota de teste na Área II (pontos azuis), além das posições estimadas do MS pelo FIS-2 (pontos vermelhos) e pelo FIS-1 (pontos negros). As estações de referência também estão indicadas.

## 6 Conclusão

Neste trabalho foram desenvolvidos dois sistemas de inferência fuzzy para a localização de terminais GSM legados. A acurácia destes sistemas foi comparada com outros métodos por meio de testes de campo. Vetores de rodovias foram utilizados para restringir a incerteza de localização de terminais móveis veiculares em áreas suburbanas. A utilização de sistemas neuro-fuzzy - que possibilitaria a

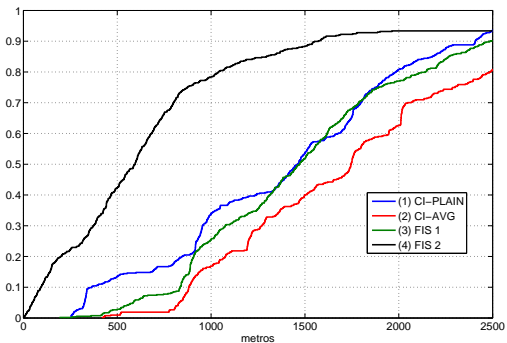


Figura 10: CDF do erro de localização na Área II.

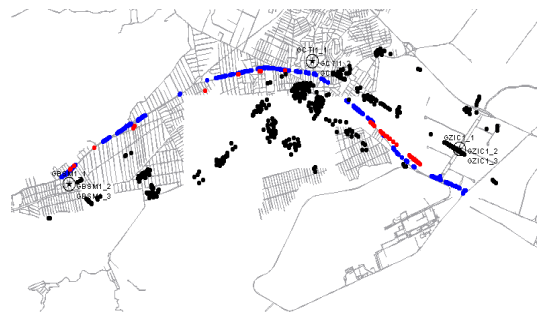


Figura 11: Rota de teste na Área II.

obtenção automática das regras e funções de pertinência - deve ser investigada como uma alternativa para ampliar o número de estações de referência e com isso melhorar a acurácia de localização do segundo sistema de inferência fuzzy proposto.

## Referências

- Campos, R. S. and Lovisolo, L. (2008). Location Methods for Legacy GSM Handsets using Coverage Prediction, *Proc. of 9th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*.
- Cox, E. (1994). The Fuzzy Systems Handbook - A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems.
- ETSI (1998). Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio subsystem link control (GSM 05.08 version 6.2.0 Release 1997).
- European Commission (2003). Commission recommendation 2003/558/EC, *Official Journal of the European Union*.
- Federal Communications Commission (1999). FCC Wireless Enhanced E911 Requirements.
- Lee, J., Yoo, S.-J. and Lee, D. C. (2004). Fuzzy Logic Adaptive Mobile Location Estimation, *Lecture Notes in Computer Science vol. 3222/2004*.
- Shen, X., Mark, J. W. and Ye, J. (2002). Mobile Location Estimation in CDMA Cellular Networks by Using Fuzzy Logic, *Wireless Personal Communications no. 22*.
- Spirito, M. A., Pöykko, S. and Knuuttila, O. (2001). Experimental Performance of Methods to Estimate the Location of Legacy Handsets in GSM, *Proc. of 54th IEEE Vehicular Tech. Conf.*.