

Um Sistema Redundante de Frenagem Segura para Trens de Levitação Magnética

João B. Pinto Neto^{1,2}, Lucas C. Gomes², Eduardo M. Castanho²,
Miguel Elias M. Campista² e Luís Henrique M. K. Costa²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO

²Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEE/COPPE/GTA

Email: joao.pinto@ifro.edu.br, {gomes, castanho, miguel, luish}@gta.ufrj.br

Resumo— Sistemas de posicionamento de trens usam tipicamente sistemas GPS padrão que identificam a localização do veículo em sua trajetória, com precisão limitada. Esse problema pode ser contornado por um sistema equipado com vários sensores que, apesar de melhorarem a precisão do posicionamento, oneram a solução. Este trabalho propõe um sistema redundante de baixo custo chamado Sistema Autônomo de Frenagem Segura (SAFS) para trens urbanos. O SAFS utiliza receptores compatíveis com o Sistema Global de Navegação por Satélite instalados em estações e trens conectados por uma rede sem fio *ad hoc*. O SAFS opera de forma cooperativa, executando um algoritmo projetado para atingir uma precisão no posicionamento abaixo de um metro. Experimentos no protótipo de trem de levitação magnética MagLev-COBRA mostram que, usando o SAFS, a distância segura para o início do procedimento de frenagem pode ser determinada dinamicamente com precisão suficiente para este veículo.

Palavras-Chave— sistemas de transportes inteligentes; cidades inteligentes; redes sem-fio *ad hoc*.

Abstract— Train positioning systems typically use standard GPS which identify the vehicle location in the yard, with limited precision. This issue can be circumvented by a system equipped with various sensors which, although can improve positioning precision, incur in higher costs. This work proposes a low-cost redundant system called Autonomous Safety Braking System (ASBS) for urban magnetic levitation trains. ASBS uses compatible receivers to the Global Navigation Satellite System installed at stations and trains connected via an *ad hoc* wireless network. The proposed system operates in a cooperative fashion, executing an algorithm designed to achieve sub-meter distance precision. Experiments in the MagLev-COBRA magnetic levitation train prototype show that using ASBS, the secure distance to start the braking procedure can be dynamically set with enough precision for this vehicle.

Keywords— intelligent transportation systems; smart cities; wireless *ad hoc* networks.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de Transporte Inteligentes (*Intelligent Transportation Systems* - ITS) têm ganhado interesse crescente com novos padrões de comunicação veicular e aplicações de cidades inteligentes. Informações de posição e velocidade dos veículos são exemplos de dados que podem ser úteis neste ambiente que abriga uma vasta gama de sensores. Os dados transmitidos entre os veículos e para a infraestrutura fixa viabilizam aplicações desde segurança no trânsito a aplicações de conveniência ou até jogos online.

No entanto, as aplicações ITS de segurança se destacam. Nesse contexto, o uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para estimar posição e velocidade tem sido explorado como opção tecnológica de baixo custo e boa precisão [1]–[3]. O GNSS é combinado a outros tipos de sensores para aumentar a confiabilidade e tolerância a falhas [4], [5], inclusive em trens de alta velocidade [6]. No caso dos trens, há sistemas de frenagem redundantes para o caso de falha do sistema principal. Uma das características desses sistemas é que eles requerem o uso de múltiplos sensores, onerando a solução e aumentando a complexidade do sistema.

Este trabalho propõe um sistema autônomo de frenagem para trens de levitação magnética, ilustrado na Figura 1. O Sistema Autônomo de Frenagem Segura (SAFS) funciona como redundância ao sistema principal e opera em dois estágios. O primeiro, foco deste trabalho, é responsável por gerar um sinal elétrico a uma distância previamente determinada entre o veículo e a próxima estação, na qual o freio elétrico deve atuar. O segundo estágio recebe o sinal de controle do primeiro e gera uma desaceleração constante, forçando o veículo a obedecer uma curva de decaimento linear até alcançar a estação. O objetivo do SAFS é evitar colisões e permitir o posicionamento correto do trem na plataforma. Diferente de outras propostas, o SAFS usa unicamente receptores GNSS instalados nas estações e no trem para implementar um sistema cooperativo de frenagem. O SAFS dispensa sensores adicionais, o que permite a redução de custos e a simplificação da proposta. Os módulos de comunicação instalados em estações consecutivas e mais o módulo do trem trocam informações de posição e velocidade necessárias para a frenagem segura através de uma rede sem-fio *ad hoc*.

Usando a distância real entre as estações como referência, um algoritmo em execução nos módulos de comunicação ajusta a estimativa da distância provida pelo GNSS. Os resultados experimentais em um trem de levitação magnética mostram que, com o uso do SAFS, o trem pode determinar dinamicamente com precisão menor que 1 m a distância segura para iniciar o procedimento de frenagem.

Este artigo está assim organizado. A Seção II introduz os módulos componentes do SAFS e suas interações. A Seção III descreve o cenário experimental no MagLev-COBRA. A Seção IV apresenta os resultados dos experimentos de campo. A Seção V conclui o trabalho e identifica direções futuras.

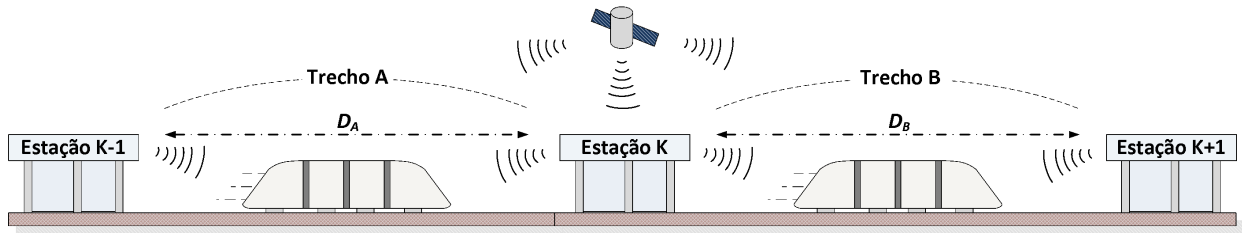


Fig. 1: Operação do Sistema Autônomo de Frenagem Segura (SAFS).

II. SISTEMA AUTÔNOMO DE FRENAGEM SEGURA

O SAFS é um sistema baseado no uso de receptores GNSS para a determinação da distância segura de frenagem. O objetivo é permitir o posicionamento correto do trem na plataforma da estação e evitar colisões em caso de falhas do sistema de frenagem principal. O SAFS determina a distância para a próxima estação combinando técnicas de posicionamento estático e dinâmico sem a interferência do condutor. A técnica de posicionamento estático é executada por todos os módulos do sistema de modo cooperativo, usando a rede sem fio *ad hoc*, enquanto a técnica de posicionamento dinâmico é executada somente pelo veículo, quando ele está em movimento.

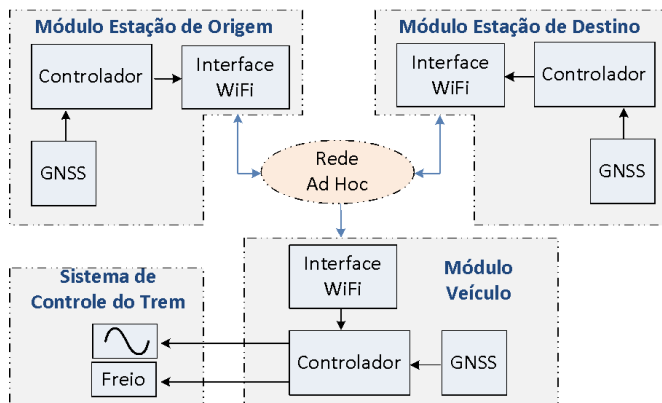


Fig. 2: Diagrama em blocos do SAFS.

A Figura 2 mostra os três módulos do SAFS, que se comunicam por meio de uma rede sem fio *ad hoc*. As direções das comunicações são representadas pelas setas: os módulos das estações trocam dados entre si, enquanto que o módulo do veículo apenas recebe dados de ambas as estações. Quando a distância segura de frenagem é alcançada, o controlador do veículo envia os sinais de aviso e controle do freio para o barramento elétrico do trem.

A. Operação

No SAFS, as estações assumem o papel de estação de origem ou de destino de acordo com a direção do movimento do veículo. A Figura 1 ilustra esse comportamento. Assumindo que o trem esteja se deslocando da estação $K - 1$ para a $K + 1$, a estação K assume o papel de estação de destino quando o veículo estiver no trecho A e estação de origem quando ele se encontrar no trecho B . Embora os papéis das estações mudem de acordo com o sentido do deslocamento do veículo, as funções de cada estação são pré-determinadas em

cada trecho do circuito. Por exemplo, no cenário em questão, as estações K e $K + 1$ executam sempre as rotinas de correção de erros e enviam dados para o veículo nos trechos A e B , respectivamente, independente de cumprirem o papel de estação de origem ou de destino.

O sistema de posicionamento do SAFS usa como referência as distâncias entre as estações para corrigir erros das coordenadas fornecidas pelos receptores GNSS. As estações vizinhas e o veículo executam um algoritmo colaborativo, mostrado adiante, baseado na distância entre as estações, D_A e D_B , no trecho onde o veículo se encontra (Figura 1).

B. Sistema de posicionamento

Um sistema GNSS usa uma constelação de satélites que enviam suas posições orbitais para receptores na Terra, fornecendo posição geográfica e tempo em todo o mundo. A precisão da posição é variável, dependente de condições meteorológicas, visibilidade e disponibilidade dos satélites e da reflexão dos sinais. Atualmente, dois sistemas de navegação estão em plena operação: o americano GPS (*Global Positioning System*) e o russo GLONASS (*Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema*) [7]. Os sistemas Galileo (Europeu) e Beidou (Chinês), embora em operação, estarão totalmente operacionais a partir de 2020. Embora sejam controlados pelos seus respectivos governos, eles fornecem dados gratuitamente com cobertura global. A posição pode ser obtida por um único receptor (ponto único) ou por dois receptores GPS operando em modo diferencial (DGPS). O primeiro, sob condições ideais, fornece precisão abaixo de 5 m. O último, com o suporte de uma estação referencial terrestre, pode alcançar uma precisão milimétrica [8].

No projeto do SAFS, a meta é calcular a distância segura de frenagem com precisão abaixo de 1 m com os receptores GNSS, que recebem dados de GPS em modo ponto único. A distância de 1 m foi estabelecida pela Divisão de Engenharia Elétrica do trem MagLev-Cobra, usado nos experimentos. Para aumentar a precisão das medidas, portanto, o ponto de partida é efetuar uma série de medições de latitude e longitude em pontos pré-fixados ao longo do trecho entre duas estações consecutivas. As distâncias medidas por meio de uma trena, a partir de um ponto de referência, podem ser comparadas com as distâncias obtidas pelas coordenadas do GPS nos mesmos pontos usando a fórmula de *Haversine* [9]. No cenário dos experimentos, a observação do comportamento do erro revela uma diferença positiva entre a distância real e a estimada pelo GPS em todas as medições. Empiricamente, um fator de correção pode ser calculado, chamado de $GPS\Delta$, que,

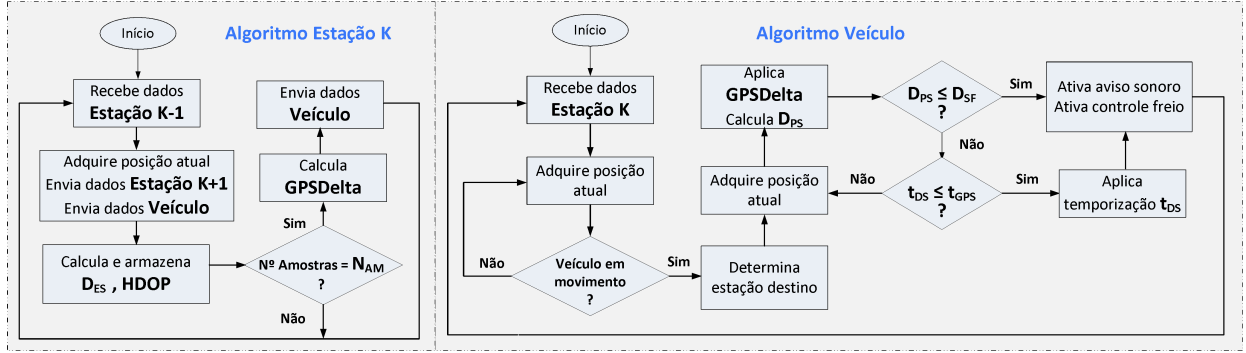


Fig. 3: Algoritmo cooperativo do Sistema Autônomo de Frenagem Segura.

uma vez aplicado às coordenadas, minimiza a Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* - RMSE), além de deslocar a média do erro para um valor próximo de zero. Sendo assim, o uso do GPSDelta pode ser usado para calibrar dois receptores GPS usando a distância real entre eles.

C. Determinação do GPSDelta

O GPSDelta é calculado em tempo real para cada trecho do circuito. Considerando o trecho *A* da Figura 1, a estação *K* adquire uma coordenada do GPS local, recebe pela rede *ad hoc* uma coordenada da estação *K-1*, calcula e armazena a distância entre elas. Este processo é repetido por um número pré-definido (N_{AM}) de amostras a uma taxa fixa. O RMSE é calculado a partir dos erros gerados pela comparação de cada amostra com a distância real D_A entre as estações. Para determinar o valor GPSDelta que minimiza o RMSE das amostras, um intervalo de busca e um valor de incremento de cada passo devem ser fixados para garantir que o RMSE convirja para um valor mínimo. No entanto, quanto maior o intervalo de busca e menor o valor do incremento, maior é o esforço computacional necessário. Portanto, o valor do intervalo de busca deve ser limitado pelo erro e inversamente proporcional à precisão do GPS, denominada Diluição Horizontal da Precisão (*Horizontal Dilution of Precision* - HDOP), fornecida pelo receptor GPS e calculada como:

$$HDOP = \sqrt{\hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2}, \quad (1)$$

onde $\hat{\sigma}_x$ e $\hat{\sigma}_y$ são os desvios padrão normalizados das coordenadas *X* e *Y* horizontais [10]. Considerando que um HDOP menor resulta em um menor erro de posição de coordenadas, o intervalo de busca torna-se $[-\varepsilon_{max} * HDOP, +\varepsilon_{max} * HDOP]$, onde ε_{max} é o erro máximo das N_{AM} amostras em relação à distância real D_A . Quanto ao incremento, seu valor deve ser escolhido conforme a precisão desejada do GPSDelta.

D. Algoritmo cooperativo proposto

O SAFS usa a técnica de posicionamento estático para determinar com precisão a distância segura de frenagem, que consiste na colaboração dos três módulos (Figura 2) através da execução do algoritmo cooperativo ilustrado na Figura 3. O módulo da estação *K* executa o procedimento de determinação

do GPSDelta, descrito anteriormente. Em seguida, o módulo da estação *K* envia para o módulo do veículo a média das N_{AM} coordenadas das duas estações do trecho e o último GPSDelta calculado. O módulo do veículo recebe uma única vez os dados que serão usados ao longo do trecho e, após determinar a estação de destino, com base nas distâncias das estações, inicia a técnica de posicionamento dinâmico.

A cadência do posicionamento dinâmico é regida pela taxa de atualização do GPS. A cada posição adquirida ao longo do trecho, o GPSDelta é aplicado às coordenadas do veículo. Com as coordenadas corrigidas, as distâncias d_{EO} e d_{ED} entre o veículo e as estações de origem *K-1* e de destino *K*, respectivamente, são calculadas. Considerando que a soma real das distâncias do veículo para as estações é conhecida e igual a d_A , o erro (ε_{ET}) resultante da diferença entre o valor real e o estimado é distribuído harmonicamente para calcular a distância para a próxima estação, d_{PS} , como:

$$d_{PS} = d_{ED} + \left(\frac{d_{ED}}{d_{ED} + d_{EO}} \right) * \varepsilon_{ET}, \quad (2)$$

onde $\varepsilon_{ET} = d_A - (d_{ED} + d_{EO})$.

A distância entre o veículo e a estação *K* (d_{PS}) é recalculada a cada atualização das coordenadas do veículo pelo GPS. Enquanto o veículo não alcança a distância segura de frenagem (d_{SF}), o MV executa o algoritmo ACORA [11], que consiste em calcular o tempo para o disparo (t_{DS}) com base na velocidade atual v , informada pelo GPS:

$$t_{DS} = \frac{d_{PS} - d_{SF}}{v}. \quad (3)$$

Caso t_{DS} seja menor ou igual ao período de atualização do GPS (t_{GPS}), o módulo ativa o aviso sonoro e o controle do freio após executar uma temporização por t_{DS} segundos. O objetivo dessa compensação é aumentar a precisão do SAFS em altas velocidades, já que uma taxa de atualização típica de 1 Hz do GPS pode produzir um erro de até 40 m a 150 km/h.

III. CENÁRIO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados no MagLev-Cobra, protótipo de trem de levitação magnética desenvolvido no Laboratório de Supercondutividade Aplicada (LASUP) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) [12]. O protótipo pesa 1.050 kg e é composto de quatro seções de 1,5 m de comprimento cada. Durante a fase experimental, o

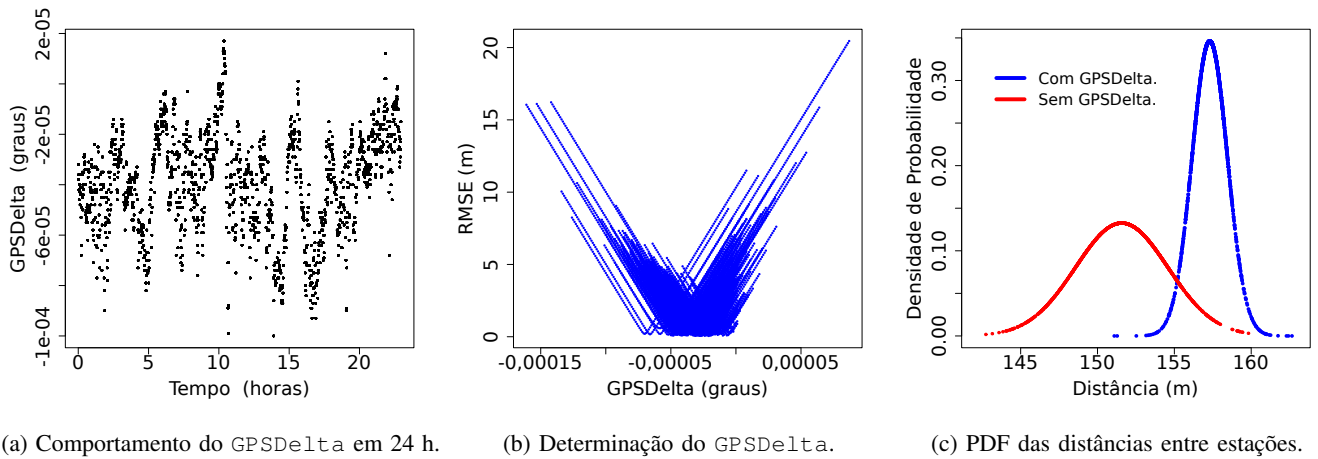


Fig. 4: Processo de obtenção do GPSDelta.

trem pode transportar por volta de 10 passageiros, além de um condutor, e alcança velocidades que variam entre 11 e 12,5 km/h em um trecho com 157,3 m de trilhos que interliga duas estações (Figura 5). As estações CT1 e CT2 possuem um desnível que faz com que as distâncias seguras de frenagem sejam diferentes. No sentido CT1→CT2, $d_{SF} = 18,5\text{ m}$; já no sentido inverso, $d_{SF} = 62,0\text{ m}$. Em um processo ininterrupto, o módulo da estação CT1 ($MCT1$) envia dados a uma taxa de 3 Hz para o módulo da estação CT2 ($MCT2$), que calcula o GPSDelta em aproximadamente 70 s usando $N_{AM} = 50$ amostras. A cada 1,5 s, o $MCT2$ envia o último GPSDelta calculado para o módulo do veículo (MV), instalado no trem.



Fig. 5: Circuito experimental do MAGLEV-Cobra.

As Figuras 4a e 4b exibem a variação e o processo de obtenção do GPSDelta, respectivamente. Avaliando o comportamento do GPSDelta em um período de 24 h, observa-se uma variação de $1,2e-4$ graus, equivalente à distância de 18,9 m. Essa variação justifica a avaliação periódica da distância entre as estações para que seja possível garantir a obtenção do GPSDelta em tempo real de acordo com as condições ambientais. O desempenho do GPSDelta pode ser avaliado a partir das funções de densidade de probabilidade (PDF), relativas a 1500 pacotes enviados para o veículo, como mostrado na Figura 4c e detalhado na Tabela I. Observa-se a convergência da média para a distância real (157,30 m) e a redução significativa do desvio padrão e dos intervalos de confiança, confirmando o aumento da confiabilidade da estimativa da distância entre as estações com o uso do GPSDelta.

TABELA I: Desempenho do GPSDelta (m).

Modo	Média	D. Padrão	I.C. 95%	I.C. 99%
Sem GPSDelta	151,13	3,15	6,18	8,13
Com GPSDelta	157,31	1,24	2,43	3,20

A. Descrição do hardware

Os dispositivos de hardware que integram os módulos do SAFS são dotados de um kit U-Blox EVK-7P que opera em modo de ponto único com um taxa de atualização de 1 Hz nas estações e 4 Hz no veículo. A interface sem fio é compatível com o padrão IEEE 802.11n, funcionando em modo *ad hoc* com transmissão a 20 dBm. Todas as comunicações entre módulos são *unicast* e os controladores, implementados por um computador embarcado Raspberry Pi, executam o sistema operacional Raspbian v7. O projeto do trem de levitação magnética Maglev-Cobra contempla um sistema autônomo de frenagem segura controlado por sensores de distância a laser, de alta confiabilidade. Um dos pontos fortes do SAFS é a sua concepção simples, implementada, enquanto protótipo, com baixos custos. Porém, a versão operacional do SAFS deverá atender a especificações das normas europeias de segurança ferroviária EN 50128 e EN 50155.

IV. RESULTADOS

O desempenho do SAFS foi avaliado por meio de medições realizadas em 41 viagens de ida e volta no trem MagLev-Cobra. A Figura 6a mostra as distâncias, normalizadas pela média (linha verde horizontal), capturadas no instante em que o controlador do MV dispara o procedimento de correção do erro relativo ao período de atualização do GPS (t_{GPS}). Para todas as distâncias acima da distância segura de frenagem (62 m), o valor de t_{DS} calculado pela Equação 3 foi menor ou igual a 250 ms (t_{GPS}). Foi observado que as viagens 14 e 18 não receberam a correção devido ao fato de que t_{DS} e t_{GPS} eram muito próximos. Em outras palavras, quando o GPS atualizou, t_{DS} era maior que 250 ms. Um pequeno acréscimo, porém, na velocidade do veículo no intervalo de atualização

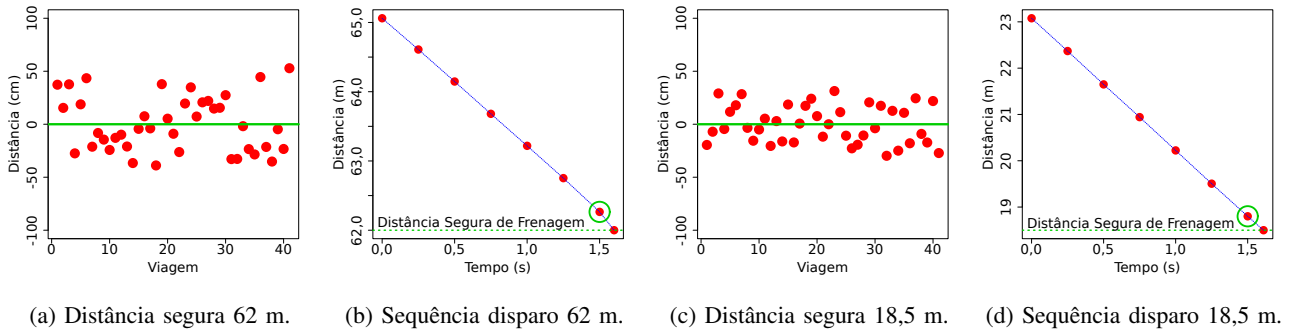


Fig. 6: Desempenho do SAFS no MagLev-Cobra.

antecipou o alcance da distância segura de frenagem, resultando em erros de no máximo 0,02 m no cálculo feito pelo SAFS. A Figura 6b ilustra os últimos segundos antes do início da sequência de frenagem. Os pontos vermelhos representam as distâncias entre o veículo e a estação CT1 a cada 250 ms e o círculo verde marca o ponto de início da temporização correspondente ao valor de t_{DS} .

As Figuras 6c e 6d mostram o comportamento no sentido oposto (CT1→CT2) em que foram realizadas todas as correções dos possíveis erros, relacionados ao período de atualização do GPS, em todas as viagens. Uma possível causa para esse fenômeno pode ser o fato da estação CT1 estar próxima a edificações altas, o que não é o caso na estação CT2, e poderia resultar na perda de precisão do GPS para estimar a posição e a velocidade.

TABELA II: Distâncias de disparo calculadas pelo SAFS (m).

Direção	Média	D. Padrão	I.C. 95%	I.C. 99%
CT1 ← CT2	62,35	0,26	0,17	0,22
CT1 → CT2	18,80	0,17	0,11	0,15

A Tabela II mostra os dados estatísticos referentes às medições mostradas nas Figuras 6a e 6c, onde pode-se constatar a convergência das médias para os valores pré-determinados das distâncias seguras (18,5 m e 62,0 m). O desempenho do SAFS pode ser avaliado pelos valores do desvio padrão e dos intervalos de confiança inferiores a 1 m, em ambos os sentidos. Observam-se valores de desvio padrão e intervalos de confiança maiores quando o veículo se desloca no sentido CT2→CT1, reforçando a suspeita da influência das edificações na precisão do GPS da estação CT1.

V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um Sistema Autônomo de Frenagem Segura implementado por meio de um novo algoritmo cooperativo de posicionamento baseado em GNSS e comunicação *ad hoc* sem-fio. Os resultados apresentados comprovam que o objetivo de obter uma precisão de posicionamento abaixo de 1 m foi alcançado, graças à correção feita pelo controlador da estação usando um fator GPS_{Δ} e a correção dinâmica das distâncias entre as estações feita pelo controlador de trem. Além disso, através de experimentos reais, foi demonstrado que o sistema pode ser implantado

em um cenário de múltiplas estações com baixo custo de hardware e baixa complexidade de montagem. Como trabalhos futuros, pretende-se investigar a influência do uso de filtros de Kalman no desempenho do SAFS e efetuar experimentos com velocidades mais altas.

AGRADECIMENTOS

Ao laboratório de Supercondutividade Aplicada responsável pelo projeto MagLev-Cobra e às agências de fomento governamentais FAPERJ, CNPq, CAPES e FAPERÓ.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Liu, J. Wan, Q. Wang, P. Deng, K. Zhou, and Y. Qiao, "A survey on position-based routing for vehicular ad hoc networks," *Telecommunication Systems*, vol. 62, no. 1, pp. 15–30, 2015.
- [2] G. Zhu, L. Fillatre, and I. Nikiforov, *Personal Satellite Services: 5th International ICST Conference, PSATS 2013, Toulouse, France, June 27-28, 2013, Revised Selected Papers*. Cham: Springer International Publishing, 2013, ch. Impact of the Railway Centerline Geometry Uncertainties on the Train Velocity Estimation by GPS, pp. 156–161.
- [3] J. Santa, R. Toledo-Moreo, M. A. Zamora-Izquierdo, B. Asbada, and A. F. Gomez-Skarmeta, "An analysis of communication and navigation issues in collision avoidance support systems," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 18, no. 3, pp. 351 – 366, 2010, 11th {IFAC} Symposium: The Role of Control.
- [4] H. YAMAMOTO, T. SASAKI, and H. SUGAHARA, "Application of gps to train control systems for secondary lines," *Quarterly Report of RTRI*, vol. 51, no. 4, pp. 196–204, 2010.
- [5] J. Roth, T. Schaich, and G. F. Trommer, "Cooperative gnss-based method for vehicle positioning," *Gyroscopy and Navigation*, vol. 3, no. 4, pp. 245–254, 2012.
- [6] K. Kim, S. Seol, and S.-H. Kong, "High-speed train navigation system based on multi-sensor data fusion and map matching algorithm," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 503–512, 2015.
- [7] C. J. Hegarty, "Gnss signals – an overview," in *2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings*, May 2012, pp. 1–7.
- [8] T. Williams, P. Alves, G. Lachapelle, and C. Basnayake, "Evaluation of gps-based methods of relative positioning for automotive safety applications," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 23, pp. 98 – 108, 2012.
- [9] F. Ivis, "Calculating geographic distance: Concepts and Methods," 2006, 2006, Canadian Institute for Health Information.
- [10] A. Bensusky, *Wireless Positioning Technologies and Applications*. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc., 2007.
- [11] J. B. Pinto Neto, E. M. Castanho, L. C. Gomes, M. E. M. Campista, and L. H. M. K. Costa, "Um algoritmo para cálculo de distância segura de frenagem para prevenção de colisão dianteira em redes veiculares," in *XXI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*, 2016.
- [12] G. G. Sotelo, R. de Andrade, D. H. N. Dias, A. C. Ferreira, F. Costa, O. J. Machado, R. A. H. de Oliveira, M. D. A. Santos, and R. M. Stephan, "Tests with one module of the brazilian maglev-cobra vehicle," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 3 601 204–3 601 204, June 2013.