

PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS MICROELETROMECCÂNICOS (MEMS) VISANDO A INTEGRAÇÃO GPS/INS DE BAIXO CUSTO

SANDRO REGINATO SOARES DE LIMA
SÍLVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS
CLÁUDIA PEREIRA KRUEGER

Universidade Federal do Paraná - UFPR
Setor de Ciências da Terra, Departamento de Geomática
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - CPGCG, Curitiba - PR
reginato@geoc.ufpr.br
{sfreitas, ckrueger}@cce.ufpr.br

RESUMO – Em levantamentos geodésicos, a integração GPS/INS enfrenta desafios em relação a questões de alto custo dos instrumentos e ausência de recursos computacionais específicos. A utilização de dispositivos de baixo custo, baseados em tecnologia MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*), procura a redução do custo instrumental. Desta forma, utilizou-se um dispositivo de baixo custo contendo acelerômetros baseados em MEMS. Entretanto, os sensores inerciais foram observados apenas em modo estático, em laboratório. Neste caso, as observações representam ruído que pode ser utilizado como parâmetro no processo de integração GPS/INS. O monitoramento de vibrações e da inclinação de estruturas são exemplos de aplicações que podem utilizar sensores operando desta forma. Conclui-se que os dispositivos MEMS são uma realidade viável para a pesquisa de baixo custo. Além disso, é esperado o desenvolvimento de novos sensores inerciais baseados em NEMS (*NanoElectroMechanical Systems*) considerando-se os atuais investimentos em Nanotecnologia.

ABSTRACT – In geodesic surveying, GPS/INS integration faces challenges in relation to subjects of high instrumental costs and lack of specific computational resources. The use of low cost devices based on MEMS (*MicroElectroMechanical Systems*) technology seeks the reduction of instrumental cost. This way, a low cost device containing MEMS-based accelerometers was used. However, inertial sensors were only observed in static way in laboratory. In this case, observations represent noise that can be used as parameter in the GPS/INS integration process. Vibrations monitoring and structures inclination are examples of applications that can use sensors operating this way. In conclusion, MEMS devices are a viable reality for the low cost research. Besides, the development of new inertial sensors based on NEMS (*NanoElectroMechanical Systems*) is expected considering the current investments in Nanotechnology.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de aquisição e manipulação de grandes volumes de observações geodésicas tem impulsionado diversas pesquisas na direção da integração de sistemas de posicionamento que otimizem o tempo e o desempenho dos levantamentos. A integração de instrumentos que utilizam o Sistema de Posicionamento Global (GPS) e Sistemas de Navegação Inercial (INS) procura realizar esta otimização, mas enfrenta grandes dificuldades em relação ao alto custo de desenvolvimento ou aquisição instrumental (em geral, em torno de algumas centenas de milhares de dólares) e à falta de recursos computacionais específicos e eficientes (e.g., algoritmos, ambiente de programação e simuladores).

Como uma alternativa instrumental de baixo custo, pode-se considerar a utilização de Unidades de Medição Inercial (IMU) contendo sensores baseados em

tecnologia de Sistemas MicroEletroMecânicos (MEMS). Neste caso, a análise do comportamento dos sensores inerciais MEMS é fundamental para a avaliação das perspectivas de utilização destes dispositivos visando a integração de sistemas de baixo custo que apresentem desempenho compatível com determinados levantamentos geodésicos.

Desta forma, verificou-se o comportamento de um acelerômetro, em laboratório, seguindo-se procedimentos de observação simples e determinando-se características típicas do sensor, que possam ser levadas em conta na pesquisa de algoritmos de integração eficientes (e.g. estimadores, controladores, filtros).

A seguir, a seção 2 apresenta uma breve descrição dos sistemas, instrumentos e sensores envolvidos no problema de integração GPS/INS. A seção 3 descreve os meios utilizados para a realização de um experimento em laboratório com o acelerômetro baseado em tecnologia

MEMS. A seção 4 faz a análise das observações realizadas. A seção 5 apresenta algumas perspectivas de utilização de tecnologia MEMS e cita alguns aspectos de Nanotecnologia. A seção de conclusão resume as algumas considerações deste estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Integração GPS/INS

O Sistema de Posicionamento Global NAVSTAR GPS (ou simplesmente GPS) é um sistema que se apoia na transmissão de sinais por satélites e foi projetado inicialmente para fins de navegação. Atualmente, o uso do GPS permite a determinação de coordenadas terrestres com precisão compatível com levantamentos geodésicos. Em geral, os receptores GPS vêm sendo utilizados com grande sucesso no chamado posicionamento de alta precisão, tanto em ambiente terrestre quanto marinho (KRUEGER, 1996 e MONICO, 2000). Entretanto, como são utilizados instrumentos que dependem da recepção de sinais enviados pelos satélites GPS, interrupções ou degradações destes sinais impedem a realização de observações com a confiabilidade necessária para o posicionamento geodésico.

Por outro lado, utilizando-se de observações de sensores inerciais (acelerômetros e giroscópios) um Sistema de Navegação Inercial (INS) não depende de sinais externos para realizar o posicionamento. Pois, conhecendo orientações e coordenadas iniciais (definidas em algum sistema de referência), um INS determina deslocamentos e mudanças de direção de forma relativa e ininterrupta, simplesmente integrando numericamente acelerações e velocidades angulares, desde que conheça as características do campo da gravidade no local de observação. Entretanto, as observações dos sensores inerciais acumulam erros com o tempo, fazendo com que o sistema necessite de correções periódicas em suas medidas, por meio de alguma referência externa.

As características complementares do GPS (precisão estável em longos períodos de observação) e do INS (observação sem interferências externas) podem ser integradas para proporcionar uma maior disponibilidade de observações durante um levantamento geodésico cinemático. Neste caso os instrumentos efetuam medições enquanto movem-se em relação à superfície terrestre (MORITZ, 1967). Sendo que, por um lado, se forem realizados percursos em locais onde existem obstruções momentâneas para os sinais dos satélites GPS, tais como em áreas urbanas ou de floresta, o INS poderá garantir a continuidade do levantamento por determinado período de tempo (e.g., segundos). Por outro lado, quando o receptor GPS estiver efetuando medidas sem interferências poderá fornecer informações confiáveis que permitam a correção das medidas do INS.

Além disso, para se determinar posições com precisão centimétrica, é necessário corrigir as observações do receptor GPS móvel (integrado com o INS) utilizando-se informações de um ou mais receptores GPS estacionados em pontos de referência com coordenadas

previamente conhecidas. Estas correções podem ser fornecidas em tempo real por meio de transmissões de rádio. A Figura 1 indica de forma esquemática este envio de correções GPS diferenciais para uma unidade GPS/INS.

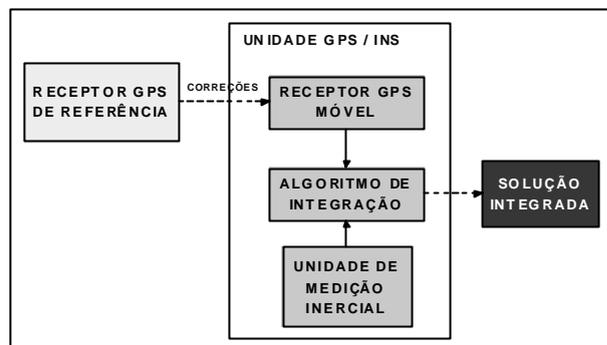


Figura 1 - Princípio da integração GPS/INS com uso de correções GPS diferenciais.

2.2 Filtragem de observações

Na Figura 2 indica-se, de forma simplificada (conceitual), as conexões necessárias entre os principais componentes de uma unidade GPS/INS integrada.

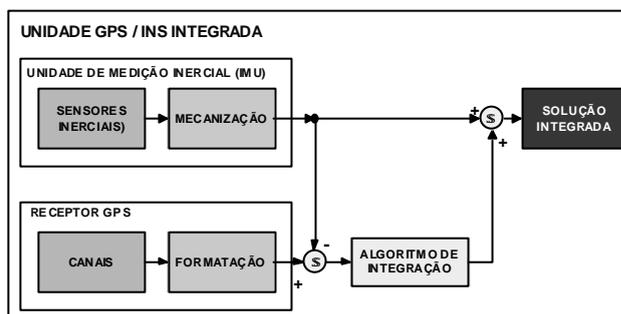


Figura 2 - Conexão dos componentes de uma unidade GPS/INS.

O exemplo apresentado na Figura 2 corresponde à topologia básica de integração conhecida como *open loop* ou *feedforward*. Neste caso, a solução integrada é obtida simplesmente pela correção das informações de saída do Unidade de Medição Inercial (IMU) que é o módulo que contém os sensores de um INS. Observa-se que existe uma etapa (somatório na entrada do algoritmo de integração) onde efetua-se uma diferença entre as observações GPS e INS. Como, a princípio, os dois sistemas devem fazer o mesmo levantamento (posicionamento), o resultado do somatório representa a diferença dos erros de observação dos dois sistemas. Se os erros de observação INS forem muito maiores que os devidos ao GPS (pela utilização de sensores de baixo custo), pode-se considerar que a entrada do algoritmo de integração receberá maior influência dos erros causados pelas medições dos sensores inerciais (neste caso, com inversão do sinal algébrico). Em seguida, o algoritmo de

integração fornece uma saída que procura corrigir a saída INS original, e isso faz com que os erros sejam atenuados no resultado final do levantamento.

A ferramenta computacional que vem sendo empregada com maior frequência e com melhores resultados na integração GPS/INS é o chamado filtro de Kalman (GREENSPAN, 1996; FARRELL e BARTH, 1999). Após ter sido elaborado por Rudolf. E. Kalman, a mais de 40 anos, diversas variações deste algoritmo vêm sendo empregadas com sucesso em várias áreas da ciência e em muitas aplicações de engenharia. O filtro de Kalman é um algoritmo considerado ótimo no sentido de fornecer variância mínima na estimação de variáveis de estado de um sistema de posicionamento. O termo filtro deve-se ao fato de ter se difundido rapidamente em aplicações de engenharia que condicionam (filtram) sinais eletrônicos que estejam sujeitos a interferências ou a degradações. A Figura 3 representa o processo básico empregado pelo filtro de Kalman (BROWN e HWANG, 1997).

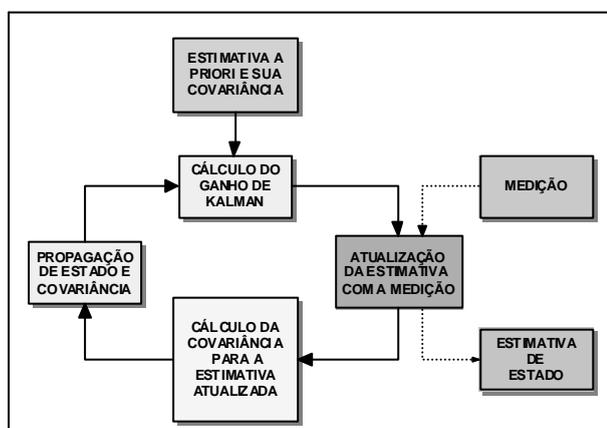


Figura 3 - Princípio básico do processamento com filtro de Kalman (BROWN e HWANG, 1997).

2.3 Sistemas MicroEletroMecânicos (MEMS)

Atualmente, a tecnologia conhecida como MEMS (*MicroElectroMechanical System*) ou também como MST (*Micro System Technology*) é empregada na fabricação de diversos tipos de sensores disponíveis comercialmente (e.g., sensores magnéticos, de pressão, de gases, para análises de DNA, etc.). Sendo que os acelerômetros MEMS foram alguns dos primeiros sensores inerciais a aparecer no mercado, devido à grande quantidade de aplicações, principalmente na indústria automobilística (FUJIMASA, 1996; MADOU, 1997).

Possuindo dimensões reduzidas (micrométricas) em relação aos sensores convencionais, os sensores inerciais MEMS (acelerômetros e giroscópios) apresentam vantagens em relação ao peso, resistência ao impacto, consumo de energia e, principalmente, quanto ao custo reduzido de produção. Os processos de fabricação destes sensores são similares aos utilizados pela indústria de componentes microeletrônicos (circuitos integrados), facilitando a produção em grande quantidade.

Atualmente, os dispositivos MEMS têm permitido medições com precisões compatíveis com as condições existentes em aplicações industriais (e.g., sensores automotivos, aeroespaciais e de controle de discos rígidos, etc.). Tais medições apresentam desempenho inferior ao necessário para a maioria das aplicações geodésicas. Entretanto, nos próximos anos, a utilização de sensores MEMS em instrumentos de medida voltados para levantamentos geodésicos pode se tornar viável, pois são grandes os investimentos (milhões de dólares) no desenvolvimento de novos sensores inerciais que proporcionarão níveis de precisão consideravelmente melhores que os atuais (SCHWARZ e EL-SHEIMY, 1999).

Além dos acelerômetros também pode-se fabricar giroscópios baseados em MEMS, sendo que algumas Unidades de Medição Inercial (IMU) já estão sendo produzidas e testadas com estes dois tipos de sensores sendo projetados num único substrato. Na Figura 4, adaptada de ALLEN et al. (1998), apresenta-se um exemplo com dimensões de área em torno de 1 cm².

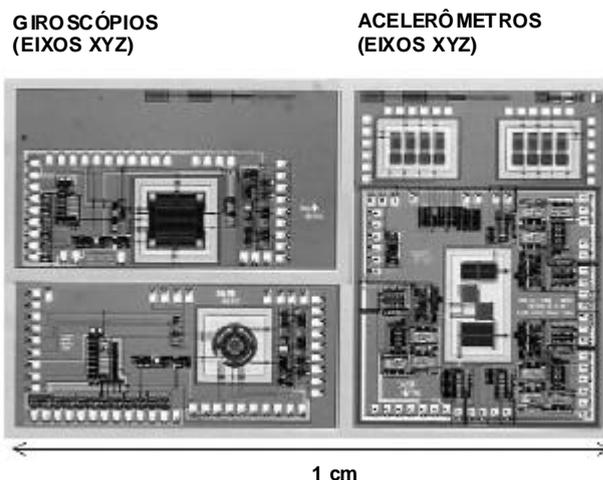


Figura 4 - IMU integrada em substrato único (adaptada de ALLEN et al., 1998).

Com isso, a perspectiva atual é que um único substrato MEMS poderá conter, em breve, todos os sensores de uma IMU e os circuitos eletrônicos de receptores GPS, fortemente integrados, compartilhando recursos computacionais, por um custo relativamente baixo. Este processo de forte integração instrumental, envolvendo diversos dispositivos em um único substrato, é conhecido como *system-on-a-chip* e procura atender às expectativas de utilização do sistema GPS integrado com INS, de forma acessível e com desempenho compatível com as necessidades de determinadas tarefas geodésicas (FREITAS, 1980; LIMA, 2000). Como, por exemplo, em sistemas de posicionamento voltados para tarefas de mapeamento móvel envolvendo observações em regiões urbanas (com condições impróprias para a utilização de instrumentos convencionais) ou em áreas remotas, com grandes extensões, topografia acidentada e com cobertura florestal densa.

3 EXPERIMENTO COM DISPOSITIVO MEMS

Realizou-se um experimento em laboratório com um dispositivo que utiliza sensores inerciais MEMS de baixo custo. O dispositivo utilizado, ADXL202EB232, contém acelerômetros com características transdutoras baseadas na observação da capacitância (fornecida por um conjunto de elementos microeletromecânicos) que varia proporcionalmente à aceleração (tanto inercial como gravitacional) que lhe for imposta.

Efetuu-se a aquisição do sinal fornecido pelo sensor na forma digital utilizando-se a porta de comunicação serial RS-232C de um computador pessoal rodando o aplicativo X-Analyze, implementado com LabView™. Com o dispositivo de teste estacionado sobre a mesa do Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica (LAIG), obteve-se níveis de ruído (sinal medido) com a mesma ordem de grandeza fornecida pelas especificações nominais do sensor e apresentando o comportamento típico esperado de distribuição normal (gaussiana). O monitoramento de deformações, vibrações e inclinação de estruturas e edificações são exemplos de aplicações que podem utilizar sensores operando desta forma. Entretanto, aqui o sinal observado pode ser considerado apenas como um parâmetro de ruído. Sendo que, eventualmente estas observações podem ser utilizadas como informação de variância essencial à elaboração de um procedimento inicialização do filtro de Kalman utilizado na integração GPS/INS.

A Figura 5 apresenta uma amostra da saída do acelerômetro, nos domínios do tempo e da frequência.

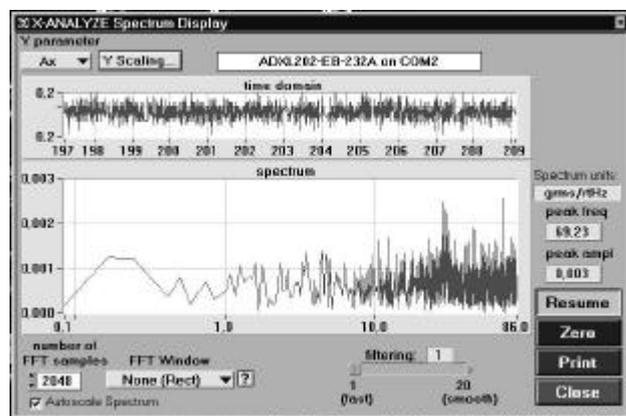


Figura 5 - Visualização gráfica do sinal do acelerômetro obtido com o aplicativo X-Analyze.

Apesar da pequena quantidade de recursos empregados para o experimento (*notebook*, termômetros de mercúrio, mesa fixa) foram poucas as dificuldades encontradas em laboratório. A falta de um sensor de temperatura automatizado não comprometeu o resultado dos experimentos, pois o período das observações foi relativamente curto (intervalos de 120 segundos). Neste caso, considerou-se que o laboratório permaneceu termicamente estável em 25° C (com base na observação de quatro termômetros analógicos próximos à mesa de ensaio). Entretanto, para experimentos posteriores, mais

prolongados e ao ar livre, é essencial contar com um monitoramento automático do ambiente.

A Figura 6 apresenta um exemplo do sinal obtido na saída digital do acelerômetro em laboratório.

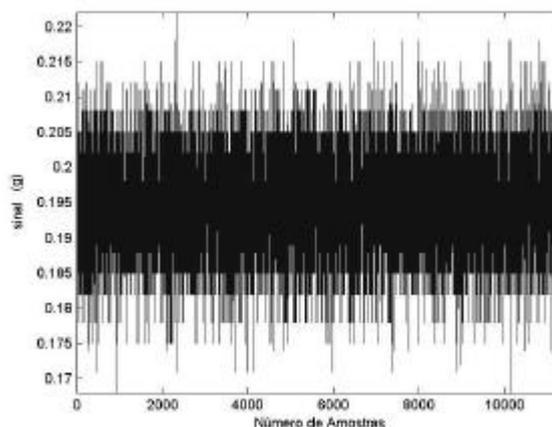


Figura 6 – Exemplo de sinal obtido com acelerômetro sobre a mesa de ensaios.

4 ANÁLISE DAS OBSERVAÇÕES

Foram realizadas aquisições com períodos em torno de 120 segundos com taxas de amostragem de 50Hz, 20Hz e 1Hz, sendo que a distribuição normalizada obtida para a taxa de amostragem de 50 Hz é apresentada no gráfico da Figura 7.

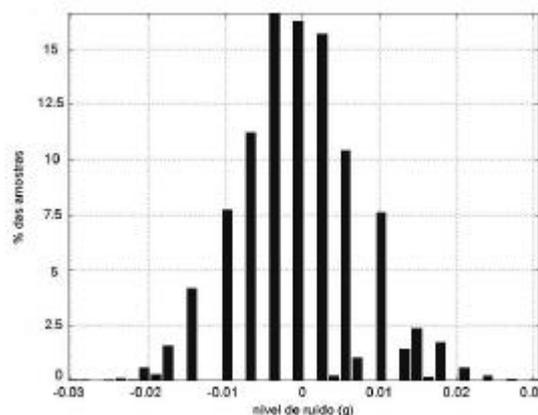


Figura 7 - Distribuição do ruído observado durante 120 s com uma taxa de amostragem de 50 Hz.

Observou-se que a variância do nível de ruído apresentou-se ligeiramente menor que o valor nominal do sensor. Isso deve-se ao fato de ter sido testado apenas um sensor e não uma quantidade estatisticamente representativa para que se pudesse obter um gráfico de valores médios. Como esperado, observou-se que o ruído aumenta com o aumento da frequência de aquisição, isto é, com o aumento de amostras obtidas num determinado intervalo de tempo de medição. No caso do dispositivo utilizado, a faixa de frequências dos circuitos analógicos sofre um corte interno em 106 Hz, efetuando assim uma redução prévia do ruído do sinal da saída digital.

Integrando-se numericamente duas vezes as observações do acelerômetro, obteve-se o resultado apresentado na Figura 8, que representaria um erro em distância (deslocamento) que se acumularia com o tempo caso fossem efetuadas medições de um percurso (trajetória) utilizando-se este sensor na implementação de um INS. Observe-se, também, que este erro aumentaria de forma ilimitada e aleatória, com um comportamento diferente cada vez que o sensor fosse ativado.

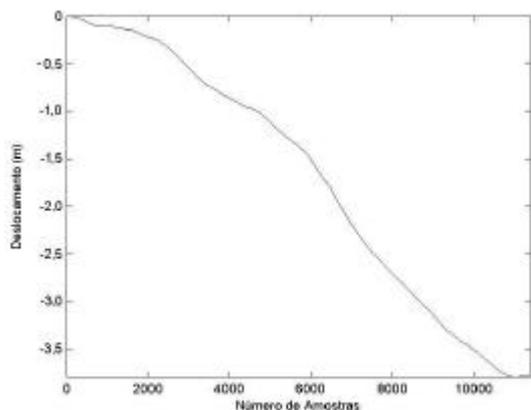


Figura 8 - Resultado após a dupla integração numérica do sinal do acelerômetro.

Portanto, num levantamento, existe a necessidade de eliminar ou minimizar periodicamente os erros nas observações. Para isso, é necessário dispor de uma referência externa, que pode ser obtida de várias formas, seja pela utilização de uma unidade de medição inercial mais precisa (como no caso do direcionamento em armamentos de aviões de combate), seja pela realização de paradas periódicas da plataforma de medição em relação à superfície terrestre (obtendo-se velocidades e deslocamentos nulos) ou, de forma mais eficiente, usando-se observações de receptores GPS.

O processamento destas observações constatou o efeito característico de acúmulo ilimitado de erros de observação devido ao ruído dos sensores, sendo que o dispositivo de testes utilizado cumpriu o objetivo de iniciação aos experimentos com sensores inerciais MEMS. Evidentemente, ainda serão necessários outros testes e procedimentos para se chegar a resultados com parâmetros significativos para processo de integração GPS/INS.

5 PERSPECTIVAS FUTURAS

O mercado mundial para a aplicação da tecnologia MEMS é estimado em bilhões de dólares, principalmente em aplicações da indústria automobilística (e.g., *air bags*, *Anti-Blocking System - ABS*), aeroespacial e na área militar. Sendo que os investimentos e as aplicações em MEMS visando levantamentos vêm aumentando a cada ano, segundo o relatório de atividades do grupo de trabalho SC4-WG01 da Associação Internacional de Geodésia (IAG), apresentado por EL-SHEIMY (2000). Para os próximos dez anos espera-se que os valores de precisão dos sensores melhorem, no mínimo, uma ou duas

ordens de grandeza, aproximando-se dos valores necessários para se alcançar precisões geodésicas. Entretanto, algumas empresas já vêm desenvolvendo sensores com precisão suficiente para monitoramento de nanogravidade, utilizando unidades de medição inercial baseadas em sensores MEMS (acelerômetros) com sensibilidade suficiente para monitorar sinais sísmicos (GOLDBERG et al., 2000). Estes dispositivos também já estão sendo utilizados no apoio à prospecção petrolífera. Por outro lado, o desenvolvimento de giroscópios MEMS com desempenho satisfatório tem sido relativamente mais difícil que no caso dos acelerômetros, devendo demorar mais tempo para alcançar níveis adequados de precisão para aplicações em levantamentos geodésicos.

Até agora considerou-se apenas a utilização da tecnologia MEMS, composta por estruturas de ordem micrométrica, pois já existem sensores inerciais disponíveis no mercado. Por outro lado, os sistemas que se utilizam de componentes projetados abaixo destes limites pertencem à área da Nanotecnologia. Neste caso, as escalas consideradas representam dimensões de estruturas moleculares, o que eleva consideravelmente o esforço analítico, computacional e de investimentos necessários na pesquisa de sensores. Neste caso, Nanocosmos, Nanomundo e Nanotecnologia são algumas das terminologias consideradas na definição desta nova fronteira para o desenvolvimento de sistemas eletrônicos e mecânicos, existindo potencialmente uma quantidade enorme de aplicações para os dispositivos baseados nos chamados Sistemas NanoEletoMecânicos (NEMS), envolvendo, por exemplo, pesquisas em medicina, biologia, física e engenharia espacial, incluindo-se projetos com sensores inerciais.

Assim como a tecnologia MEMS se beneficiou dos investimentos e das ferramentas desenvolvidas para microeletrônica, a pesquisa com NEMS deve aproveitar a capacidade de medição e manipulação microscópica dos dispositivos MEMS (TIMP, 1999; ANTÓN, 2001). Sendo que, para os próximos anos, espera-se que a pesquisa na área de sensores inerciais de baixo custo também possa ser beneficiada por estes investimentos.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho representa apenas o início dos nossos estudos com sensores MEMS visando a integração GPS/INS de baixo custo. Sendo que, quando os sensores inerciais alcançarem níveis de precisão apropriados será comum a utilização de Sistemas MicroEletoMecânicos (MEMS) em instrumentos voltados para levantamentos geodésicos.

Apesar da pequena quantidade de recursos disponíveis, efetuou-se um experimento básico com acelerômetro MEMS em laboratório. Entretanto, serão necessários mais testes para se chegar a resultados com parâmetros que possam ser utilizados no processo de integração GPS/INS. Mesmo assim, apesar do desempenho insuficiente para tarefas geodésicas, observa-se que os benefícios imediatos foram significativos, tais como a disponibilidade ilimitada de dados, a utilização de

instrumental próprio e com o custo total dos sensores inerciais MEMS utilizados no experimento relativamente baixo (algumas centenas de dólares).

Por isso, a abordagem principal do experimento foi a execução de procedimentos básicos de observação que também poderão ser realizados com sensores de melhor desempenho.

Além da constatação de que os dispositivos MEMS já são uma realidade viável para a pesquisa de baixo custo, espera-se que, nos próximos anos, um único substrato MEMS possa conter sensores inerciais e receptores GPS, fortemente integrados.

Sendo considerado um dos principais temas estratégicos internacionais, observa-se também que o desenvolvimento atual em Nanotecnologia deve ser acompanhado com muita atenção, pois os volumes de investimentos voltados para esta área são muito significativos (milhões de dólares). Eventualmente, a pesquisa e o desenvolvimento de Sistemas NanoEletro-Mecânicos (NEMS) poderá gerar sensores inerciais potencialmente melhores que os atuais sensores baseados em MEMS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Pedro Luiz Faggion pela disponibilização do Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica (LAIG), do CPGCG, ao Prof. Dr. Jorge Silva Centeno pelo empréstimo do microcomputador para a realização do experimento e ao Prof. Dr. Cyro Ketzer Saul, do Departamento de Física da UFPR, pela participação em banca de Seminário II, do CPGCG, onde também foram considerados conteúdos do presente trabalho.

Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fornecimento da bolsa de pesquisa para o programa de doutorado do CPGCG.

REFERÊNCIAS

ALLEN, J. J.; KINNEY, R. D.; SANSFIELD, J.; DAILY, M. R.; ELLIS, J. R.; SMITH, J. H.; MONTAGUE, S.; HOWE, R. T.; BOSER, B. E.; HOROWITZ, R.; PISANO, A. P.; LEMKIN, M. A.; CLARK, W. A.; JUNEAU, T.; **Integrated Micro-Electro-Mechanical Sensor Development for Inertial Applications**. PLANS'98 Position Location and Navigation Symposium April 20 - 23, 1998, Rancho Mirage, CA. New York: IEEE, 1998.

ANTÓN, P. S.; SILBERGLITT, R.; SCHNEIDER, J. **The global technology revolution: bio/nano/materials trends and their synergies with information technology by 2015**. Santa Monica: RAND, 2001.

BROWN, Robert G.; HWANG, Patrick Y. **Introduction to random signals and applied Kalman filtering**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1997

EL-SHEIMY, Nasser. **Report of IAG Special Commission 4, Activities of Working Group 1: Real-time mobile multi-sensor systems and their applications in GIS and mapping**. Calgary, 2000. Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.

FARRELL, Jay; BARTH, Matthew. **The global positioning system and inertial navigation**. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 1999.

FREITAS, Sílvio R. C. de. **Posicionadores inerciais**. Curitiba, 1980. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), CPGCG, UFPR.

FUJIMASA, Iwao. **Micromachines: a new era in mechanical engineering**. Oxford: Oxford University Press, 1996.

GOLDBERG, Howard; GANNON, Jeff; MARSH, James; REICHERT, Bruce; ZAVALETA, Mauricio. **An extremely Low-noise MST accelerometer using custom ASIC circuitry**. Stanford: I/O, Inc., 2000

GREENSPAN, R. L. **GPS and inertial integration**. In: PARKINSON, Bradford; SPILKER Jr., James J. (Ed.). **Global positioning system: theory and applications**. Washington: AIAA, Inc., 1996, v.2, p.187-220.

KRUEGER, Cláudia P. **Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no ambiente marinho**. Curitiba, 1996. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) CPGCG, UFPR.

LIMA, Sandro R. S. de. **Sistemas, Referenciais e Processos associados à integração GPS/INS**. Curitiba, 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), CPGCG, UFPR.

MADOU, Marc. **Fundamentals of Microfabrication**. Boca Raton: CRC Press, 1997.

MONICO, João F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR GPS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

MORITZ, Helmut. **Kinematical Geodesy**. Columbus: 1967. Relatório AFCRL-67-0626, Department of Geodetic Science, The Ohio State University.

SCHWARZ, Klaus-Peter; EL-SHEIMY, Nasser. **Future positioning and navigation technologies**. Calgary, 1999. Report from Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary (UofC).

TIMP, Gregory. **Nanotechnology**. New York: Springer-Verlag, 1999.