OS MÉTODOS HARDWARE IN THE LOOP, SOFTWARE IN THE LOOP E MODEL IN THE LOOP COMO FERRAMENTAS DE AUXILIO AO ENSINO E À PESQUISA NA GRADUAÇÃO

Nathalie M. Panoeiro – nathalie.panoeiro@member.isa.org
Kamila P. Rocha – kamila.rocha@member.isa.org
Lindolpho O. de Araujo Júnior – lindolpho@leopoldina.cefetmg.br
Ângelo R. de Oliveira – a.oliveira@ieee.org
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, *Campus* Leopoldina
Rua José Peres 558 - Centro
36700-000 – Leopoldina – Minas Gerais

Resumo: *Muitos processos industriais e produtos na área de engenharia mecânica e elétrica apresentam uma crescente integração da parte mecânica com eletrônica digital e processamento de informações. Essa integração entre hardware e software resulta em um sistema dinâmico. Para garantir que essa integração apresente resultados adequados algumas ferramentas podem ser utilizadas, como o Software in the loop (SIL), Hardware in the loop (HIL) e Model in the loop (MIL). A metodologia HIL é usada para desenvolver, testar e melhorar sistemas embarcados e de tempo real. Pode também ser usada em conjunto com tecnologia de jogos eletrônicos, em que softwares como o Opensimulator são usados para criar ambientes virtuais e até mesmo mundos como o de Second Life. A metodologia SIL é a inclusão de um código compilado de software que representa um modelo de planta por exemplo, e é usado quando um sistema de software é executado sob diferentes condições de entrada e avaliam o desempenho do software. A metodologia MIL é usada no desenvolvimento de estratégias de controle com a ajuda de um modelo representativo do sistema a ser controlado. Essa metodologia pode ser utilizada e simulada no Matlab® utilizando a ferramenta Simulink, também no Scilab, que representa uma solução open source, entre outros softwares. Estas três metodologias são utilizadas em muitas empresas e universidades em atividades de ensino e pesquisa e também para melhorar seus projetos. Assim, o presente trabalho pretende mostrar os métodos HIL, SIL e MIL, destacando sua importância e formas de utilização na graduação.*

Palavras-chave: *Hardware in the loop, Software in the loop, Model in the loop, Tecnologia de jogos*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a crescente integração da mecânica, eletrônica digital processamento de informação, em muitos processos e produtos resultam em sistemas dinâmicos. O desenvolvimento desses sistemas envolve a concepção simultânea de hardware,

software e sistemas embarcados (ISERMANN, 2008). A partir dessa integração, a fim de garantir resultados adequados algumas metodologias de testes, como Hardware in the loop (HIL), Software in the loop (SIL) e Model in the loop (MIL) podem ser usados.

Estes métodos representam uma combinação entre prototipagem física e virtual, e apresentam-se indispensáveis para diversas aplicações de forma a serem ferramentas essenciais para a engenharia atual. A crescente complexidade dos sistemas aliado à necessidade de avaliar os resultados das simulações motiva o uso dos métodos HIL, SIL e MIL. (FATHY *et al.*, 2006).

A simulação do Hardware in the loop inclui uma emulação dos sensores e atuadores que funcionam através de uma interface entre a planta simulada e o sistema embarcado. Esta tecnologia reduz a necessidade de um protótipo físico durante os testes e aumenta a precisão do sistema (FENNIBAY, 2010). Assim o método de Hardware in the loop fornece um controle eficiente e um ambiente seguro, em que o engenheiro pode se concentrar na funcionalidade do controlador. Esta simulação é muito utilizada tanto na etapa de pesquisa quanto na análise e no design, de forma que as vantagens da utilização desse método incluem economia de tempo, dinheiro e segurança (SHEN *et al.*, 2009).

A metodologia de hardware in the loop pode também ser utilizada juntamente com a tecnologia dos jogos através de softwares como o Opensimulator. Esse software, também chamado de Opensim é capaz de criar jogos e cenários em um ambiente virtual 3D semelhante ao do Second Life (OPENSIMULATOR, 2013).

A metodologia de software in the loop pode ser descrita como a inclusão de um software que emula o comportamento de um processo real, que é simulado para diferentes entradas, de forma que é possível se observar o comportamento do sistema. (DEMERS *et al*., 2007). As vantagens desse método incluem resolver problemas tradicionais de simulação e validação do modelo e pode ainda ser utilizado tanto na etapa de design quanto na etapa de testes de um processo. Os propósitos do SIL incluem também aumentar a velocidade de simulação a partir da utilização do software que emula uma planta e verificar se o código gerado a partir de um modelo funcionará de acordo com a especificação do modelo. Esta metodologia é uma forma de baixo custo para avaliar um sistema de software complexo antes de ser utilizado no mundo real.

A metodologia do model in the loop trabalha apenas com modelos de um sistema, diferente do software in the loop, não há um software que simula uma planta e sim um modelo matemático. Esse tipo de teste é utilizado para a verificação do desempenho e da robustez de um modelo matemático (ÇAKMAKCI *et al.*, 2011).

As metodologias HIL, SIL e MIL apresentam-se como ferramentas úteis no desenvolvimento, prototipagem, testes e validação de projetos. Por tudo isso, vem sendo cada vez mais utilizadas dentro da graduação, seja durante as aulas através de simulações, seja em pesquisas científicas ou trabalhos de conclusão de curso. Dessa forma, elas permitem ao aluno um contato diferente e uma visão mais prática sobre o conteúdo.

Sendo assim, o presente trabalho aborda as metodologias HIL, SIL e MIL destacando as vantagens da sua utilização dentro da graduação como ferramentas não só de auxílio ao discente, mas também de complementação do ensino. O trabalho encontra-se dividido da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma descrição da metodologia de hardware in the loop, destacando as vantagens e sua utilização juntamente à tecnologia dos jogos através do software Opensim; a seção 3 apresenta uma descrição da metodologia de software in the loop, destacando suas vantagens e aplicações dentro da graduação; a seção 4 apresenta uma descrição da metodologia de model in the loop,

destacando suas vantagens e utilizações na graduação, levando em consideração softwares como Matlab® e Scilab; e a seção 5 apresenta as conclusões desse trabalho.

2. HARDWARE IN THE LOOP

Hardware in the loop pode ser definido como sendo uma instalação que simula um sistema embarcado a partir de uma simulação virtual (FATHY *et al.*, 2006). A ideia é ter um sistema com interação bidirecional, ou até mesmo unidirecional entre a parte de hardware e a parte virtual.

A Figura 1 representa um diagrama de blocos com interações unidirecionais entre um sistema embutido e um simulador HIL. Este tipo de simulador é uma ferramenta poderosa que faz com que o sistema embarcado acredite estar interagindo com as entradas e saídas reais (GOMEZ, 2013).

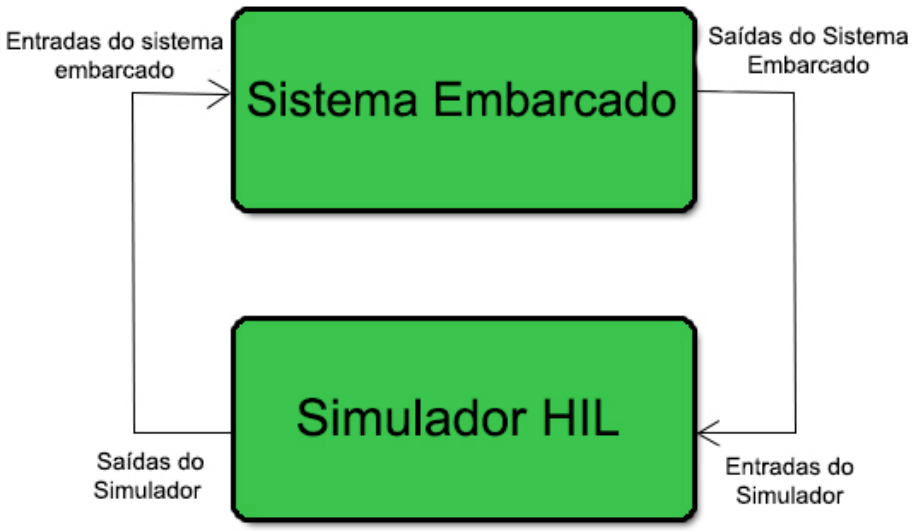

Figura 1. Diagrama de bloco de Hardware in the loop com interação unidirecional.

O crescente uso do hardware in the loop reflete as vantagens da utilização dessa metodologia. Isso porque é de baixo custo, de rápida prototipação e requer menos hardware do que um protótipo físico do sistema. Outra vantagem é o alto nível de fidelidade ao comportamento do sistema quando comparado com simulações puramente virtuais (FATHY *et al.*, 2006).

Deve-se ainda levar em consideração que não é um método destrutivo, de forma que é possível ainda simular processos destrutivos sem realmente destruir a parte física. HIL pode também ser utilizado para treinamento de pessoas e operadores, como no caso dos simuladores de voo.

Entretanto, HIL também tem suas desvantagens uma vez que não é um substituto para o circuito interno de um processo, o analisador lógico ou software debugger, esse tipo de método não é capaz de informar o que está acontecendo na parte interna do software embarcado uma vez que apenas lê as saídas (GOMEZ, 2013).

2.1. Hardware in the loop com Tecnologia de jogos - Opensimulator

Há muitos mundos e plataformas virtuais, e o jogo Second Life tem sido um dos mais usados no desenvolvimento de protótipos orientados à educação e treinamento. Essa plataforma do Second Life pode ser utilizada para implementar mundos alternativos virtuais privados. Entretanto, as informações desses mundos privados são relativamente limitadas (VILELA *et al.*, 2010). Por outro lado, há plataformas alternativas como a do Opensim que é semelhante à do Second Life uma vez que incorpora muitas de suas funcionalidades, e é open source.

Opensim é um software opensource que representa uma alternativa às infraestruturas privadas como a de Second Life e é um forte candidato a uma futura web 3D. Os mundos criados pelo Opensim são baseados em áreas de 256mx256m de espaço virtual e o usuário pode controlar sua vista independente do movimento do avatar.

Um projeto em desenvolvimento pela Intel é o ScienceSim, que usa os componentes do Opensim e seu ambiente virtual como ferramentas para colaboração, visualização e experimentação, de forma a integrar tecnologias para criação de aplicativos (FAROOQ & GLAUERT, 2001).

> *Opensim também pode ser utilizado para a integração de mundos 3D e equipamentos reais de laboratório. Essa integração consiste de usar os mundos 3D e os laboratórios virtuais no ensino de engenharia, mais precisamente um laboratório de eletropneumática, em que os alunos poderiam acessar os equipamentos do laboratório virtual através da Internet e conectar uma parte real de hardware para se comunicar com a planta virtual. (MÜLLER et al., 2012)*

Atualmente está sendo desenvolvido um projeto de Hardware in the loop no âmbito do Programa de Educação Tutorial, PET- Controle e Automação do CEFET MG, em parceria com estudantes estagiários oriundos de um convênio de mobilidade internacional com a universidade Joseph Fourrier de Grenoble, França.

3. SOFTWARE IN THE LOOP

Software in the loop pode ser definido como a inclusão de um software que emula um determinado comportamento em um modelo de simulação. Isso significa que uma parte do modelo existe em uma ferramenta de simulação como Matlab Simulink® e parte como um software (EMMESKAY,2013). Nesse tipo de simulação o software e o controlador virtual funcionam no mesmo computador comunicando-se entre si. A Figura 2 apresenta um diagrama de blocos dessa integração e comunicação entre o software e o modelo simulado.

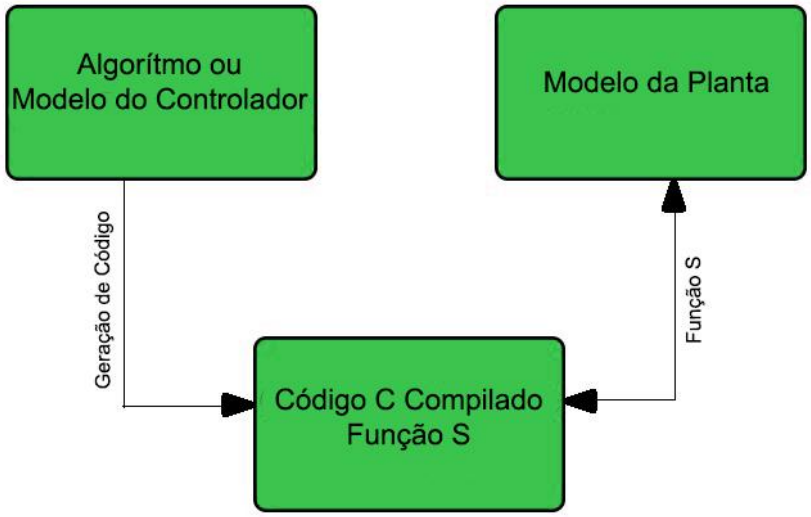

Figura 2. Interações do Software in the loop

Software in the loop foi desenvolvido para superar a complexidade dos controladores físicos da metodologia do Hardware in the loop (ZLATKOVIC *et al.*, 2011). Em comparação com software in the loop, simulações tradicionais e HIL são menos versáteis durante a etapa de testes, Dessa forma SIL representa uma solução de baixo custo, rápida implementação e promove resultados rápidos (DEMERS *et al.*, 2007).

Na parte de design, a metodologia do software in the loop apresenta benefícios como detectar cedo possíveis *bugs*, falhas de dimensionamento e falhas relacionadas aos parâmetros do controlador. A simulação também não requer que ocorra em tempo real, dessa forma, a partir de modelos simples SIL é mais rápido do que simulações de tempo real, e mesmo as simulações mais lentas podem ser utilizadas sem muitas limitações.

A metodologia do SIL complementa a do HIL, e auxilia ainda naqueles casos em que não é possível de se utilizar a HIL. Por outro lado, a metodologia SIL não pode substituir completamente a HIL, apesar de ser parte importante no desenvolvimento de um protótipo.

3.1. Aplicações na graduação

Atualmente pode se verificar um aumento significativo de estratégias de controle e automação de processos distribuídos, assim a demanda por profissionais capacitados neste tipo de tecnologia também aumenta. Foi aprovado o padrão IEC 61499, criado para o desenvolvimento da próxima geração de sistemas distribuídos, que visa a redução do tempo e o aumento da reusabilidade dos projetos de controle automático em desenvolvimento.

Com a finalidade de uso industrial e de se obter uma ferramenta para se utilizar no ensino de disciplinas de controle lógico de sistemas distribuídos, foi desenvolvido, no laboratório do grupo de pesquisa em Controle, Automação e Energia do CEFET MG campus Leopoldina, um software do tipo "softplc" chamado de ProPLC, de baixo custo, que permite a modelagem e a execução de sistemas distribuídos pouco volumosos baseados no padrão IEC 61499. A importância desse conhecimento no ensino da

engenharia está no fato de que nos próximos anos o padrão IEC 61499 se tornará mais comum na indústria. (LIMA *et al.*, 2012)

O software desenvolvido utiliza blocos funcionais, com os quais é possível descrever instrumentos e os nós de controle que são utilizados no sistema de controle. Foram utilizados no desenvolvimento da ferramenta, blocos funcionais compostos que pode ser visualizado através do fluxograma da figura 3.

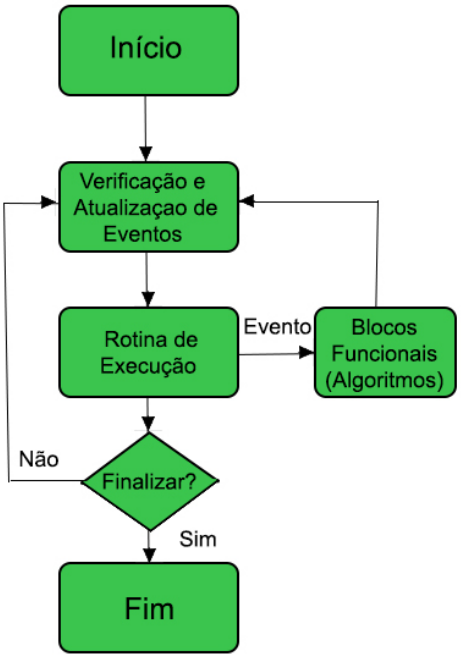

Figura 3. Estrutura de execução de blocos funcionais do ProPLC

4. MODEL IN THE LOOP

No Model in the loop o modelo inteiro é virtual. Entretanto, diferente do software in the loop, não há um software que emule o comportamento de um equipamento e sim um modelo matemático (EMMESKAY, 2013).

Essa metodologia verifica o comportamento do algoritmo de controle, por exemplo, e garante que as interações entre uma planta e o controlador não violarão os requisitos do sistema (MATINNEJAD *et al.*, 2013). A Figura 4 apresenta um diagrama de blocos que ilustra um modelo matemático de uma planta e um controlador em uma malha fechada.

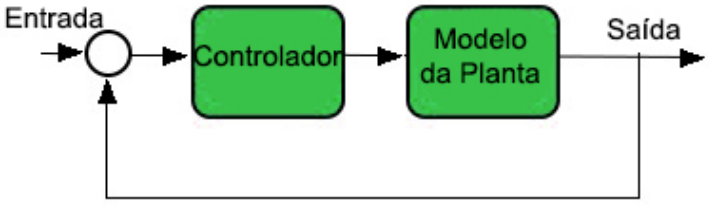

Figura 4. Diagrama de blocos representando model in the loop

Dessa forma, o model in the loop permite conhecer o comportamento do sistema em certo ambiente e determinadas entradas. Sendo assim, o controlador pode então ser projetado de forma adequada à operação. Por tudo isso, algumas vantagens da utilização do model in the loop são o compromisso entre precisão e o tempo de execução e ainda redução dos riscos de atraso.

4.1. Aplicações na graduação

Os maiores problemas encontrados em processos controlados são ações de controle bruscas, onde ocorrem muitas oscilações e sobre elevação que podem acarretar a danificação e desgaste de atuadores, diminuindo assim sua vida útil consideravelmente. (OLIVEIRA *et al.*, 2012)

A fim de garantir uma boa estratégia de controle, está sendo desenvolvido, em laboratórios do CEFET MG Campus Leopoldina, um ambiente baseado em LabView® com comunicação OPC (*Ole for process control*) para auditoria de malhas de controle industriais (MENEZES *et al.*, 2012). Além de poder auxiliar no controle de processos industriais, esse modelo pode ser utilizado no ensino de disciplina de controle onde pode se realizar estudos e comparações entre diferentes estratégias de controle escolhida pelo usuário.

O controle realizado é de nível de um tanque da planta didática SMAR, representada na figura 5 que simula em menor escala malhas de controle industriais, com tecnologia *Foundation Fieldbus*. O processo consiste basicamente no bombeamento de água na planta e na abertura ou fechamento de uma válvula a fim de manter o nível de água desejado no tanque de armazenamento.

Figura 5. Planta Didática SMAR

O processo a ser controlado pode ser visualizado na figura 6. Serão realizadas simulações na planta e comunicação para testes de controle para o algoritmo inicial para verificar a resposta dos atuadores aos sinais enviados. Realizadas aferições quanto ao envio e aquisição de dados, deve-se então elaborar o ambiente de controle e parametrização do controlador, onde podem ser aplicadas técnicas de controle de acordo com a dinâmica do processo.

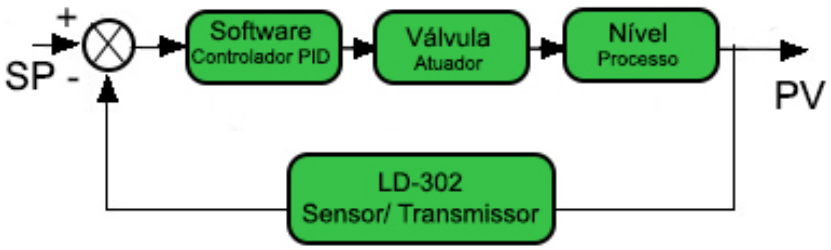

Figura 6. Diagrama esquemático da planta de controle de nível

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou as metodologias de hardware in the loop, software in the loop e model in the loop, destacando algumas aplicações na graduação e na pesquisa, levando em consideração a importância dessas metodologias como ferramenta de auxílio ao aluno de graduação no processo de aprendizagem a partir de práticas e, também, no desenvolvimento de novos métodos e técnicas.

É interessante observar a utilização da metodologia de hardware in the loop juntamente à tecnologia de jogos a partir do Opensim, o que torna possível o desenvolvimento de laboratórios virtuais controlados a partir de sistemas físicos reais através de hardwares.

Com relação ao software in the loop e model in the loop, dentro da graduação vem sendo cada vez mais utilizados em práticas de laboratório no ensino, por exemplo, de disciplinas de controle em que se simula um modelo matemático de um controlador através do Matlab® Simulink.

Por tudo isso, HIL, SIL e MIL mostram-se importantes no desenvolvimento de novas tecnologias e também no processo de aprendizagem. Deve-se ainda levar em consideração que não só universidades, mas também industrias, utilizam essas metodologias, uma vez que elas diminuem o risco de haver problemas futuros como acidentes, perda de dinheiro entre outros no que diz respeito ao desenvolvimento de produtos e processos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG, Fundação CEFETMINAS e CEFET-MG pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇAKMAKCI, M.; LI, Y.; LIU, S. Model-in-the-loop development for fuel cell vehicle. Anais: American Control Conference. São Francisco, 2011.

DEMERS, S.; GOPALAKRISHNAN, P.; KANT, L. A Generic Solution to Software-in-the-Loop. Anais: IEEE Military Communications Conference. Orlando, 2007.

EMMESKAY. **MIL/SIL Tutorial.** Disponível em: <http://www.emmeskay.com/presentation-files/Emmeskay_MIL-SIL_Tutorial.pdf>. Acesso em: 12 de maio 2013.

FAROOQ, U.; GLAUERT, J. Scalable and consistent virtual worlds: An extension to the architecture of OpenSimulator. Anais: International Conference on Computer Networks and Information Technology. Abbottabad, 2011.

FATHY, H. K.; FILIPI, Z. S.; HAGENA J.; STEIN, J. L. Review of Hardware-in-the Loop Simulation and Its Prospects in the Automotive Area. Modeling and Simulation for Military Applications. Proceedings of the SPIE. v. 6228, pp. 62280E, 2006.

FENNIBAY, D.; YURDAKUL, A.; SEN, A. Introducing Hardware-in-Loop Concept to the Hardware/Software Co-design of Real-time Embedded Systems. Anais: IEEE 10th International Conference on Computer and Information Technology. Bradford, 2010.

GOMEZ, M. **Hardware in the loop simulation.** Disponível em: <http://www.embedded.com/story/OEG20011129S0054.>. Acesso em: 11 de maio 2013.

ISERMANN, R. Mechatronic systems- Innovative products with embedded control. Control Engineering Practice, Philadelphia, v. 16, p.14-29, 2008.

LIMA, L. N.; SANTOS FILHO, D. J.; LOPES, L. C. G.; ARAÚJO JR, L. O. Especificação e Desenvolvimento de uma Ferramenta 'SOFTPLC' para Pequenas e Médias Empresas Baseado no Padrão IEC61499. Anais: XIX Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande, 2012.

MATINNEJAD, R.; NEJATI, S.; BRIAND, L.; BRUCKMANN, T.; POULL, C. Automated Model-in-the-Loop Testing of Continuous Controllers using Search. Anais: 5th International Symposium on Search-Based Software Engineering. St. Petersburg, 2013.

MENEZES, M.; TEIXEIRA, D. P.; OLIVEIRA, L. M.; CARMO, M. J.; OLIVEIRA, A. R.; OLIVEIRA JUNIOR, L. A. Ambiente Foss para controle, supervisão e avaliação de desempenho de uma planta didática Foundation Fieldbus. Anais: XIX Congresso Brasileiro de Automática. Campina Grande, 2012.

MÜLLER, D.; CHILLIISCHI, A.; LANGER, S. Integrating Immersive 3D Worlds and Real Lab Equipment for Teaching Mechatronics. Anais: 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation. Bilbao, 2012.

OLIVEIRA, L. M.; CARMO. M. J.; TEIXEIRA, D. P.; OLIVEIRA JR, L. A. Utilização de uma planta didática Smar para complementação do ensino de Engenharia de Controle e Automação. Anais: XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Belém, 2012.

OPENSIMULATOR. **What is Opensimulator?** Disponível em: <http://www.opensimulator.org /wiki/Main_Page > Acesso em: 10 de maio 2013.

VILELA, A.; CARDOSO, M.; MARTINS, D.; SANTOS, A., MOREIRA, L.; PAREDES, H.; MARTINS, P.; MORGADO, L. Privacy Challenges and Methods for

Virtual Classrooms in Second Life Grid and OpenSimulator. Anais: Second International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications. Braga, 2010.

ZLATKOVIC, M.; MARTIN, P. T.; TASIC, I. Implementation of Transit Signal Priority and Predictive Priority Strategies in ASC/3 Software-in-the-Loop Simulation. Anais: 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation System. Washington, 2011.

THE METHODS HARDWARE IN THE LOOP, SOFTWARE IN THE LOOP AND MODEL IN THE LOOP AS SUPPORT TOOLS TO TEACHING AND RESEARCH IN GRADUATION

Abstract: *Many technical processes and products in the area of mechanical and electrical engineering are showing an increasing integration of mechanics with digital electronics and information processing. The integration between hardware and software result in a dynamic system. To ensure this integration will show proper results some tools can be used such as the Software in the loop (SIL), Hardware in the loop (HIL) and Model in the loop (MIL). The HIL methodology is used to develop, improve and test complex real-time embedded systems and can also be used with games technology. In this integration with games technology a software such as Opensimulator, can be used to create virtual environments or even worlds like Second Life. The SIL methodology represents the inclusion of a compiled production software code into a simulation model and it's used when a software system is executed under different simulated input conditions intending to evaluate how well the software system works. The MIL methodology is used to design control strategies with the help of a representative model of the system to pilot. These models can be developed with Matlab® using the Simulink tool, Scilab that represents an open source solution and many others. These three methodologies are used in many companies and universities during clases, research and to improve their projects. Thus, the present paper intends to show these methods, HIL, SIL and MIL, highlighting their importance and use in university.*

Key-words: *Hardware in the loop, Software in the loop, Model in the loop, Games Technology.*