

TÉCNICA *HARDWARE-IN-THE-LOOP* NO DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO*

TIAGO OGIONI COSTALONGA**
Primeiro-Tenente (QC-CA)

SUMÁRIO

Introdução
Sistemas em tempo real
Model-Based Design
Hardware-in-the-Loop
Materiais e Métodos
Resultados e Discussões
Conclusão

INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, o desenvolvimento de processadores computacionais cada vez mais rápidos (EDENFELD *et al.*, 2004), juntamente com o avanço em tecnologias de informação e em novas técnicas de programação,

permitiu o surgimento de ferramentas mais sofisticadas e, com isso, de novas metodologias de desenvolvimento de projetos de sistemas embarcados (FARIAS, 2016).

Para garantir que um sistema funcione com alto grau de confiabilidade, é necessário que sejam realizados diversos testes em diferentes condições de operação,

* Artigo adaptado de TCC destaque no Curso de Aperfeiçoamento Avançado do CIAW/2020.

** Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Participante do Programa de Graduação Sanduíche Brafitec/Capes, entre a UFV e o Institut National Polytechnique de Lorraine, em Nancy, França, com ênfase em Automação e Robótica pela Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique.

avaliando-se e validando-se, continuamente, o comportamento do sistema. Entretanto a realização desses testes pode se tornar uma tarefa complexa, dado que os altos custos para a construção de um protótipo físico apenas para testes podem ser significativos. Além disso, eles podem ser considerados potencialmente perigosos tanto para as pessoas envolvidas quanto para o equipamento a ser testado. Tem-se, ainda, a questão de que, na fase de projeto do sistema de controle, o próprio equipamento a se controlar não está acessível, ou seja, a planta física ainda não foi concebida (IRENO, 2014). Adiciona-se também o fato de que, atualmente, os engenheiros têm um prazo cada vez menor para o desenvolvimento desses sistemas. Nesses casos, uma forma de se contornar alguns desses problemas é a realização de testes simulados em computadores.

Nesse contexto, uma metodologia que vem sendo utilizada por diversos setores é o *Model-Based Design* (MBD) (ZANDER; SCHIEFERDECKER; MOSTERMAN, 2011), a qual é voltada para o desenvolvimento de projetos de sistemas de controle de modo que o processo seja continuamente verificado e testado, a fim de garantir que os requisitos de projeto estejam sendo cumpridos. Cada etapa de um projeto dessa natureza usando este modelo é caracterizado por uma das seguintes técnicas: *Model-in-the-loop* (MIL), *Software-in-the-loop* (SIL), *Processor-in-the-loop* (PIL) e *Hardware-in-the-loop* (HIL), sendo que esta última é o foco deste artigo.

A simulação em HIL geralmente é utilizada para validação de sistemas antes de sua conclusão. Seu procedimento é, basicamente, simular uma parte do sistema (*software*), sendo seu controle efetuado por uma parte física (*hardware*) (LOPES, 2017). A simulação é feita o mais

próximo possível da realidade, de modo que torne possível o teste do sistema em diversas situações, até mesmo potencialmente perigosas, mesmo que raras, sem que seja necessário construir protótipos e sem causar danos às pessoas envolvidas no projeto (SCHLAGER, 2008).

Sua utilização pelas indústrias aeroespacial e de defesa foi introduzida nos anos 1950 (NABI *et al.*, 2004). Naquele tempo, os altos custos não permitiram maior difusão dessa técnica, porém, atualmente, a simulação HIL é aplicada a diversos segmentos de atuação, como a indústria aeroespacial, química, de produção, da robótica e de defesa. Na indústria automobilística, vem sendo amplamente aplicada pelo fato de ser este um segmento de mercado bastante competitivo, exigindo que os custos e o tempo de entrega do produto sejam reduzidos (LOPES, 2017).

Com a constante e rápida evolução tecnológica no setor de defesa, surgiu para a Marinha do Brasil (MB) a necessidade de incorporar novos e modernos sistemas e sensores (radares, sonares etc.) aos navios de sua frota (LONGO; MOREIRA, 2013). Parte do desafio é garantir o desempenho dessas novas tecnologias no sistema de bordo como um todo. Isso é ainda mais complicado pelo fato de as plataformas de destino para a implantação dessas tecnologias ainda não terem sido construídas ou totalmente projetadas no momento em que os novos sistemas estão sendo desenvolvidos.

Além disso, depara-se, muitas vezes, com o alto custo para o desenvolvimento e, principalmente, para os testes em ambientes reais de determinado equipamento. Soma-se a isso o fato de que o teste pode não sair como o esperado, podendo danificar ou mesmo fazer perder por completo todo o aparato construído. Assim,

o aumento de tempo para conclusão do projeto torna-se fator relevante.

Desse modo, é necessário que sejam utilizadas novas técnicas para o desenvolvimento de sistemas embarcados. Uma abordagem é a simulação desses sistemas. Segundo Hosseinpour e Hajihosseini (2009), a simulação permite que o sistema seja testado antes da sua implementação, o que ajuda a entender melhor como o mesmo se comporta.

Entretanto, nem sempre as simulações são capazes de reproduzir fielmente as condições de operação no mundo real (LU *et al.*, 2007), isto é, aquelas podem não ser suficientes para validar vários tipos de sistemas. Normalmente, os sistemas reais são muito caros, e, se os mesmos não forem devidamente validados em *hardware*, não há garantias de que o sistema se comportará da maneira esperada (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019). Tem-se ainda que os testes no sistema real podem apresentar falhas, aumentando os riscos de causar danos tanto ao equipamento quanto às pessoas envolvidas nessas atividades.

Uma forma de se minimizar os problemas citados é a técnica conhecida como *hardware-in-the-loop*. Esse tipo de simulação tem ganhado destaque em diversas áreas como uma alternativa de testes de um sistema sob condições mais reais sem a necessidade de produção ou confecção de um protótipo real.

No caminho entre a concepção do projeto e a unidade pronta e produzida, um dispositivo/sistema passa por uma extensa bateria de análises e testes, desde a modelagem e a simulação iniciais até testes de laboratório e de integração em locais de ensaio em terra, culminando, em última análise, em testes no mar.

Embora a modelagem e a simulação geralmente andem de mãos dadas com o

desenvolvimento e o teste de um dispositivo e ofereçam um meio para avaliar o comportamento do sistema, os testes físicos de um dispositivo, na maioria das vezes, são deixados para os estágios posteriores do projeto.

Ao fazer a interface de dispositivos físicos com um ambiente simulado, as abordagens de simulação HIL têm um grande potencial para facilitar os aspectos dos testes dos sistemas nos estágios iniciais do processo de desenvolvimento, levando em consideração uma ampla variedade de condições operacionais e cenários do sistema. Isso também inclui a possibilidade de testar dispositivos em ambientes emulados que representam sistemas ainda não construídos e permite testar condições extremas (ou seja, potencialmente perigosas) ou difíceis de criar em um ambiente de teste rigidamente controlado.

Desse modo, a possibilidade de conseguir realizar projetos de melhorias e/ou atualização de sistemas embarcados em navios com a facilidade de testá-los de modo seguro e com custos reduzidos por meio da técnica de HIL pode aumentar a criação de novas tecnologias e facilitar seus testes e sua validação.

No entanto, embora a abordagem ofereça muitos benefícios atraentes, ela não deixa de ter limitações e desafios. Nesse sentido, este artigo busca analisar quais as vantagens e limitações da utilização da técnica de HIL para o desenvolvimento de sistemas embarcados presentes na literatura.

SISTEMAS EM TEMPO REAL

Um sistema em tempo real é aquele que realiza uma ação – execução de uma tarefa computacional, atuação do freio em um carro ou a visualização de informações em um *display* – em um intervalo de tempo predefinido (SCHLAGER, 2008).

As informações de um sistema em tempo real são fornecidas ao ambiente em que está inserido por intermédio de transdutores, isto é, sensores e atuadores que transformam um estímulo físico em sinal e vice-versa. A interação entre esses sistemas com o ambiente está vinculada à discretização dos sinais do ambiente pelos sensores/atuadores, ou seja, são os componentes eletrônicos do sistema que determinam a taxa de amostragem dos sinais do ambiente.

Assim, o comportamento correto de um sistema em tempo real não depende apenas de resultados lógicos, mas também do tempo em que esses resultados são produzidos (KOPETZ, 2011). Nesse sentido, numa simulação em tempo real, como é o caso da técnica de HIL, deve-se considerar a taxa de amostragem do sistema a ser testado. Essa taxa indica o intervalo de tempo com a qual a simulação recebe resultados na entrada do sistema, bem como novas saídas estão disponíveis (FARIAS, 2016). Para o controlador embarcado em *hardware*, a taxa de amostragem é responsável por mostrar o tempo necessário para o controlador processar as entradas e disponibilizar variáveis de controle em suas saídas (LOCKHART, 2016).

As técnicas de simulação em tempo real oferecem benefícios significativos para minimizar as dificuldades associadas com as fases de integração de *hardware* e *software* de um processo de desenvolvimento de um sistema embarcado (LINS, 2007). Por exemplo,

uma simulação HIL pode ser realizada diretamente sobre o controlador sem a necessidade de a planta do projeto estar pronta, sendo a mesma simulada em ambiente computacional conforme ilustrado na Figura 1.

Entretanto, deve-se considerar que as restrições da operação em tempo real de uma simulação podem impor limitações ao nível de detalhe de um modelo. Além disso, geralmente as plataformas de simulação em tempo real empregam soluções que possuem intervalo de tempo fixo e limitado minimamente, o que pode levar a implicações na estabilidade, nas frequências de comutação e na largura de banda utilizada por esses modelos para reproduzirem adequadamente a realidade (LANGSTON *et al.*, 2013).

Outro fator que deve ser considerado é que as interfaces HIL introduzem atrasos de tempo e podem incorporar outras distorções que afetam os experimentos e, em alguns casos, levam a instabilidades. Um exemplo é o problema na discretização de sinais analógicos (gerados num ambiente real) em sinais digitais (gerados em computadores), conforme mostrado na Figura 2.

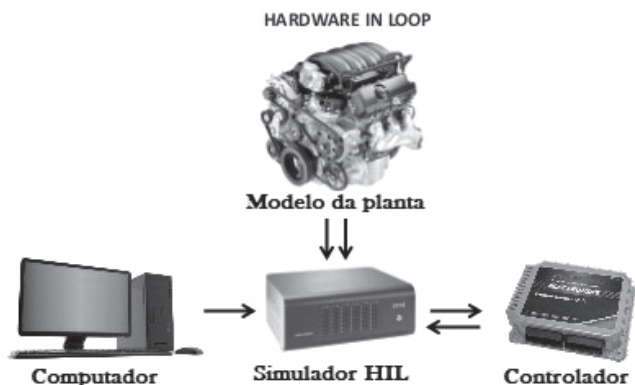


Figura 1– Exemplo genérico de uma simulação HIL
Fonte: o autor

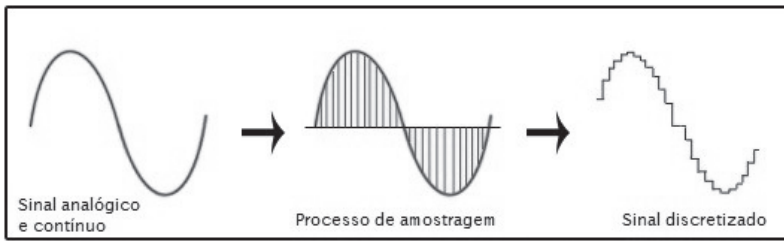


Figura 2 – Problemas na discretização de sinais analógicos

Fonte: Discrete-Time Signal Processing, 3rd Edition, Alan V. Oppenheim & Ronald W. Schafer (2011)

MODEL-BASED DESIGN

O MBD possibilita que o processo de desenvolvimento de sistemas seja constantemente monitorado, a fim de garantir que os requisitos estão sendo cumpridos. Na maioria dos casos, avaliam-se, ainda, o custo de desenvolvimento e o tempo gasto para implementação. Técnicas como MIL, SIL, PIL e HIL oferecem grandes possibilidades e funcionalidades de modo a tornar o desenvolvimento de um sistema mais confiável e menos demorado.

Uma vantagem de se usar a metodologia MBD é a possibilidade de incluir o Modelo-V para desenvolvimento de sistemas. Esse modelo propõe uma fase de verificação e validação para cada etapa da construção, conforme representado na Figura 3.

Na verificação, é confirmado se o produto atende aos requisitos especificados para ele, ou seja, se o modelo construído está correto ou é aceitável. Já na validação, é reconhecido se o

produto atende ao propósito para o qual foi criado, ou seja, se o produto gerado é adequado para a aplicação (ÍRENO, 2014).

As principais vantagens na utilização do Modelo-V são: economia de tempo ao realizar testes e simulação antes da construção e rastreamento de defeitos em fase inicial, evitando o fluxo descendente dos mesmos, o que reduz os custos do projeto. Os testes do produto estão previstos em paralelo com a fase de desenvolvimento correspondente.

Na Figura 4, é mostrado em qual etapa da metodologia em V é utilizada cada uma das técnicas mencionadas anteriormente (MIL, SIL, PIL e HIL).

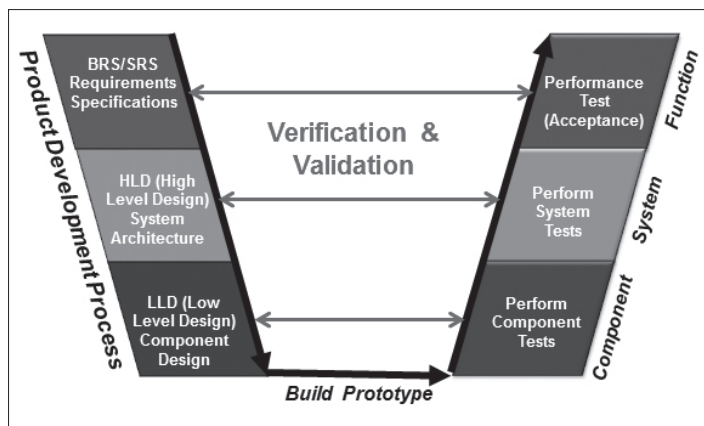


Figura 3 – Modelo-V típico para desenvolvimento de sistemas embarcados

Fonte: <http://tryqa.com/what-is-v-model-advantages-disadvantages-and-when-to-use-it/>

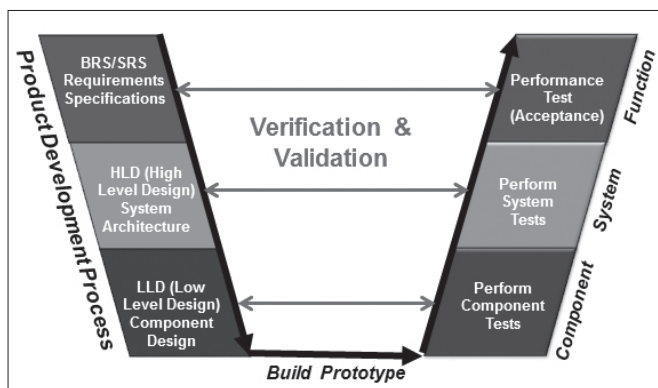


Figura 4 – Etapas do Modelo-V em que utiliza MIL, SIL, PIL e HIL
 Fonte: Adaptado pelo autor

O *Model-in-the-loop* é geralmente utilizado nas fases iniciais do desenvolvimento pela metodologia MBD. Esta técnica está presente na fase de especificações de requisitos (*BRS/SRS Requirements Specifications*). Nesse estágio, o modelo do sistema é construído e simulado em um ambiente virtual. Seu propósito é proporcionar uma visão geral da solução, da plataforma, dos sistemas, dos produtos e do serviço/processo.

O estágio seguinte da metodologia MBD é o *Software-in-the-loop*, que está presente na fase de arquitetura e *design* do sistema (HLD) e consiste em testar os sistemas e *softwares*, verificando a capacidade para trabalhar em conjunto.

O *Processor-in-the-loop* é o terceiro estágio no desenvolvimento de sistema em MBD e faz parte da

fase de projeto de baixo nível (LLD) que define as características reais do projeto para cada componente físico do sistema.

O estágio seguinte dentro da metodologia MBD, chamado *Hardware-in-the-loop*, será apresentado em um item específico a seguir, por ser o foco deste artigo.

Para que determinado projeto seja validado, deve-se utilizar das técnicas descritas acima, de modo que o desen-

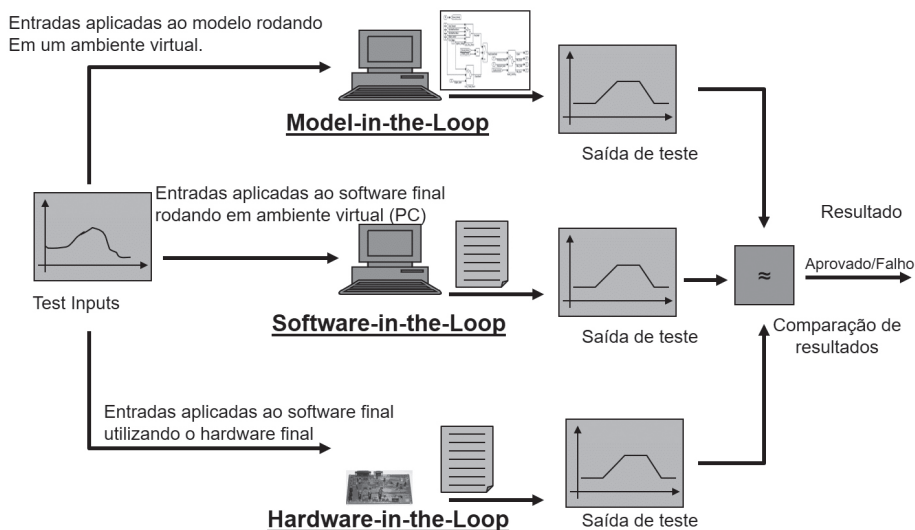


Figura 5 – Relação entre as técnicas de MIL, SIL e HIL para validação
 Fonte: <https://www.embarcados.com.br/teste-de-software-em-sistemas-embarcados-automotivos/>

volvimento do sistema simulado seja o mais próximo possível do real, conforme mostrado na Figura 5.

HARDWARE-IN-THE-LOOP

A técnica HIL é considerada como um método padrão para testes de sistemas embarcados antes de sua implantação final (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

O HIL é uma simulação em que partes de um sistema real são substituídas por uma simulação computacional. Assim, componentes reais e simulados do sistema são combinados dentro de uma configuração operacional a fim de simular e testar o comportamento dinâmico dos componentes reais (CRAVOTTA, 2005). Na Figura 6, é representado um diagrama de blocos simplificado de uma arquitetura HIL.



Figura 6 – Diagrama de blocos simplificado de uma arquitetura HIL
 Fonte: LOPES, 2017. Adaptada pelo autor

Devido a esse aspecto, é possível poupar tempo e custos no projeto, simulando componentes/modelos que poderiam ser muito caros ou que demandariam muito tempo para serem construídos (FARIAS, 2016). Também possuem a vantagem de possibilitar um estudo mais amplo do sistema, e, com isso, a detecção e antecipação de erros e falhas no projeto antes de sua finalização (PASSOS, 2008).

Uma configuração que geralmente é utilizada para exemplificar uma aplicação em HIL está representada na Figura 7.

Nela é possível perceber que o sistema é composto por diferentes partes: atuadores (elemento que produz movimento, atendendo a comandos, que podem ser manuais, elétricos ou mecânicos), processos (tarefas realizadas pelo sistema quando operando), sensores (dispositivo que responde a um estímulo físico/químico de maneira específica e que pode ser transformado em outra grandeza física) e o sistema de controle responsável por toda a estratégia para controlar o sistema. Entretanto, em uma simulação HIL é possível implementar qualquer um desses diferentes componentes citados, tanto em *hardware* quanto em *software*.

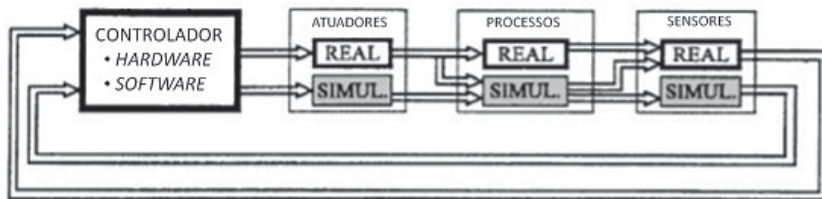


Figura 7 – Configuração de aplicação de HIL
 Fonte: FARIAS, 2016. Adaptada pelo autor

Apesar das vantagens dessa técnica, alguns aspectos devem ser considerados durante o projeto de sistemas embarcados. Primeiramente, a qualificação de pessoal para configurar e definir os modelos a serem simulados, além do custo de algumas plataformas comerciais (BADARUDDIN; HERNANDEZ; BROWN, 2007).

Depois, surgem algumas dificuldades técnicas. O desempenho dinâmico da interface de *hardware*, somado à capacidade do processamento (ou seja, a capacidade de quantificar e representar um ambiente real, que possui características contínuas, em uma simulação cujos dados são discretos) da interface de *software*, constitui um limite de fato para a aplicação de uma simulação em tempo real de HIL, uma vez que este possui limitações, em escala, para a representação de sinais contínuos em discretos. Os erros (distorções e atrasos de tempo) introduzidos pela interface podem, ainda, causar problemas severos de instabilidades ou então resultados inaceitáveis de testes (DE JONG; VAESSEN; GRAAFF, 2013).

Mesmo assim, as vantagens do método, em muitos casos, superam suas desvantagens, tornando a simulação HIL cada vez mais popular e mais utilizada na indústria (FARIAS, 2016).

Atualmente existem diversas empresas no mercado que oferecem soluções em HIL, tais como: dSPACE, National Instruments (NI), MathWorks, Altera e OpaRT.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento de um projeto de sistema embarcado, é necessário que o mesmo passe por diversos estágios e testes até sua produção final. Este artigo analisa apenas a abordagem da técnica de HIL presente em uma dessas etapas do desenvolvimento, focando nas vantagens

e limitações desse método. Outro ponto limitante foi não contar com um sistema prático para levantamento de dados próprios para este trabalho.

A coleta dos dados úteis para confecção do artigo foi organizada em duas fases distintas. Na primeira, foi feita uma busca intensa por referencial teórico acerca do assunto, a partir de artigos, teses e livros sobre o tema. Na segunda fase, após a fundamentação teórica, foram selecionados apenas trabalhos que tivessem realizado uma abordagem prática utilizando a técnica de HIL, de modo que fosse possível extrair as informações necessárias.

Para isso, foram analisados 23 trabalhos, em diferentes áreas de atuação, que utilizaram a técnica de HIL para o desenvolvimento de projetos. Esses trabalhos foram separados e numerados na referência como T01 a T23, para fins de compreensão da metodologia adotada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos trabalhos foi realizada a fim de identificar as vantagens e limitações da aplicação da técnica de HIL presente em cada um. A seguir, é feita uma pequena descrição de cada um dos estudos selecionados.

Em T01, o autor criou uma plataforma de HIL para testes de simulação em diferentes tipos de modelos de sistemas. A dificuldade encontrada nessa publicação foi a falta de processador computacional em tempo real, de modo a garantir maior confiabilidade nos testes. Apesar disso, o trabalho mostra algumas vantagens dessa técnica, tal como a redução de custos e de tempo de desenvolvimento.

A pesquisa T02 apresenta quais os benefícios da utilização de HIL. Para o autor, o baixo custo de desenvolvimento usando essa técnica reflete uma tendência

nas indústrias. Além disso, o trabalho apresenta a possibilidade de analisar experimentalmente resultados de problemas de soluções complexas.

Para T03, o uso de HIL possibilitou uma economia da ordem de R\$ 70 mil para desenvolvimento e testes de uma mão robótica, além de uma redução de tempo de projeto.

O trabalho T04 focou na solução para os atrasos de uma simulação em HIL sem que fosse necessário modificar as características dinâmicas dos sistemas.

Segundo a publicação T05, que propôs também a construção de mão robótica, as vantagens na utilização da técnica de HIL estão na verificação e integração entre os modelos simulados em tempo real e os protótipos reais e na redução dos riscos durante o desenvolvimento relacionado com o uso de diversos tipos de tecnologia, além da redução de custos do projeto.

Para T06, a escolha da técnica de HIL foi feita pois esse método apresenta medidas de custo efetivo para desenvolvimento de componentes preliminares de sistemas, além da possibilidade de detecção de falhas em processos iniciais. Para o autor, a aplicação de HIL em veículos submarinos semiautônomos reduz gastos e tempo para desenvolvimento.

Em T07 foi desenvolvido um controle de transmissão automática usando HIL. De acordo com esse trabalho, a técnica possibilitou os testes de verificação e validação sem a necessidade de construção de um veículo inteiro apenas para esses testes.

O desenvolvimento de suspensões veiculares realizado por T08 utilizando a técnica de HIL apresentou uma pequena variação nos tempos de resposta que, para o caso estudado, não ofereceu prejuízo na análise dos resultados da pesquisa.

O trabalho T09 também utilizou a técnica de HIL para o desenvolvimento de

suspensões veiculares. Apesar de também ter tido problemas com o atraso de sinais devido ao processamento computacional baixo, conclui-se que HIL é um método simples, rápido de implementar e de custos reduzidos.

De acordo com T10, a principal vantagem para o uso de HIL foi a possibilidade de realizar testes em diversas condições sem a necessidade da construção de um protótipo real, reduzindo tempo e custos de desenvolvimento.

Outro trabalho que utilizou HIL a fim de verificar e testar um sistema de arquitetura integrada foi o T11. O autor cita a possibilidade de testar vários componentes do sistema antes de integrá-los ao sistema como um todo. Porém ressalta as dificuldades de simulação inerentes a sistemas de tempo real, tais como atraso de sinal e a sincronia com o simulador HIL.

O projeto de um sistema em HIL com cem entradas e saídas proposto por T12 obteve uma redução de custos de 75% na construção de um segundo modelo devido à utilização da técnica HIL.

A pesquisa T13 realizou uma aplicação usando a metodologia MBD para sistemas de controle. Em seu trabalho, o autor evidenciou a importância e a facilidade do uso de HIL para testes de verificação e validação. Como limitação, foi citada a relação de processador computacional utilizado, que tinha uma limitação quanto ao valor mínimo de passos que o sistema poderia usar, de modo que introduziram atrasos no sinal de resposta.

Segundo T14, o uso de HIL para o desenvolvimento de Redes CAN apresentou com vantagens a possibilidade de incorporações de novos subsistemas mais complexos ao projeto, além de apresentar risco nulo para os equipamentos envolvidos na simulação. O autor cita, ainda, que o método de HIL acelerou as etapas do projeto.

Ainda na área da computação, T15 utilizou a técnica HIL para realizar uma simulação com configuração mestre-escravo. No trabalho, a principal vantagem foi a redução considerável dos custos. Como desvantagem, o autor cita a atenção que o projetista deve ter em relação ao tempo de atraso das simulações em tempo real.

O trabalho T16 utilizou a técnica HIL para o desenvolvimento de um *software* embarcado. Em sua conclusão, o autor cita as seguintes vantagens: realização de testes antes dos testes em campos, tempo total de desenvolvimento reduzido e diminuição de riscos.

Em T17, é analisada a substituição de servos posicionadores hidráulicos por modelos simulados em tempo real. De acordo com esse trabalho, o uso de HIL é apontado como um método promissor para redução de custos de desenvolvimento em plantas industriais.

Para T18, a técnica de HIL serviu para acelerar os processos de testes no desenvolvimento de um elevador, em que vários componentes são simulados em tempo real a fim de verificar e validar o funcionamento dos mesmos.

A pesquisa T19 propõe a utilização de HIL para controle de tráfego. Cita como vantagem a possibilidade de executar vários testes simulados em laboratório antes de pôr em prática, evitando o desconforto de motoristas e pedestres com relação a congestionamentos e atrasos.

De acordo com T20, o uso da técnica HIL para o desenvolvimento de uma estrutura simulada para *design* de controle se provou uma aplicação de baixo custo e com uma grande versatilidade para realizar testes em diferentes sistemas sem a necessidade de construção de alguns componentes físicos.

O trabalho T21 faz um estudo sobre a aplicação de HIL para sistemas navais. O autor cita a possibilidade de testes de vá-

rios novos subsistemas sem a necessidade de realizar diversos testes no mar, além da redução de riscos e falhas nos estágios finais de desenvolvimento do projeto.

Ainda no meio naval, T22 também realiza um estudo sobre a implementação de uma simulação de propulsor elétrico para navios. Assim como em T21, o trabalho mostra que é possível fazer diversos testes e atuar em diferentes situações sem a necessidade de construir protótipos reais.

Finalmente, em T23 o autor realiza uma simulação de uma planta de propulsão Codlag. No trabalho, o uso de HIL se torna viável por possibilitar que sejam feitos testes em vários componentes e em diversas condições, sem causar risco de danos materiais e pessoais.

Análise dos resultados

Com base nos trabalhos analisados, as principais vantagens discutidas foram: custo de projeto reduzido, diminuição de tempo de desenvolvimento e testes, diminuição de riscos à segurança, desenvolvimento simultâneo de componentes do sistema, detecção de falhas e defeitos antes da conclusão do projeto, possibilidade de testes em diferentes condições e não-necessidade de construção de protótipos físicos.

A única dificuldade relatada pelos autores, inerentes à simulação HIL, foi a questão do processamento computacional requerido para simulações realizadas em tempo real, isto é, o atraso de respostas do sistema quando simulado. Apesar disso, todos os trabalhos contornaram esse problema realizando técnicas de programação adequadas, além da troca dos componentes computacionais, a fim de garantir um melhor poder de processamento.

As Tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, em quais trabalhos foi possível identificar cada uma das vantagens e limitações.

VANTAGENS ENCONTRADAS	TRABALHOS ANALISADOS
V1 Custo de projeto reduzido	T01, T02, T03, T05, T06, T07, T09, T12, T15, T17 e T20
V2 Diminuição de tempo de desenvolvimento e testes	T03, T05, T06, T07, T09, T10, T14, T16 e T18
V3 Diminuição de riscos à segurança	T03, T05, T14, T16, T19, T21 e T23
V4 Desenvolvimento simultâneo de componentes do sistema	T03, T10, T11, T14 e T16
V5 Detecção de falhas e defeitos antes da conclusão do projeto	T06, T13, T16 e T21
V6 Possibilidade de testes em diferentes condições	T01, T03, T05, T09, T10, T11, T14, T16, T21, T22 e T23
V7 Não necessidade de construção de protótipos físicos na fase inicial do projeto	Todos os trabalhos analisados

Tabela 1 – Vantagens encontradas em cada trabalho analisado

LIMITAÇÕES ENCONTRADAS	TRABALHOS ANALISADOS
Atrasos de tempo no processamento em tempo real	T01, T03, T04, T08, T09, T11, T13, T15 e T16

Tabela 2 – Limitações encontradas nos trabalhos analisados

Com base nos dados das tabelas acima, foi construído o Gráfico 1. Nele são representados quantos trabalhos citaram cada uma das vantagens das tabelas acima.

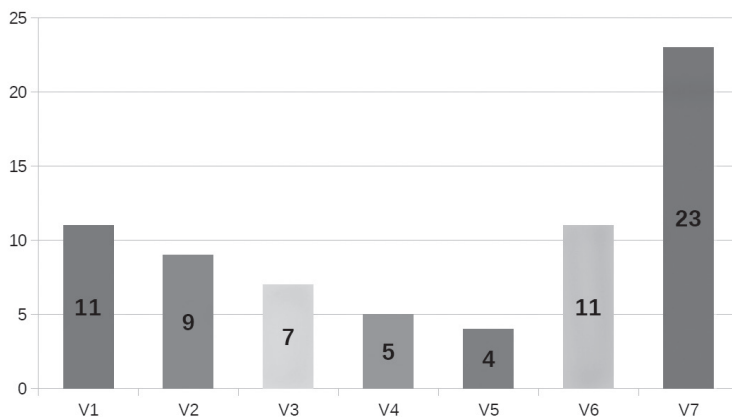


Gráfico 1 – Gráfico da quantidade de trabalhos analisados por vantagens encontradas

Fonte: o autor

Pode-se perceber que todos os trabalhos selecionados usam como justificativa de utilização da técnica de HIL o fato de não precisarem construir um protótipo real para testes (V7). Em geral, o alto custo para executar testes em sistemas complexos, como as aeronaves, pode justificar um investimento substancial em HIL, e, ainda, testes de campo também podem ser reduzidos ao se utilizar HIL como um complemento.

Como consequência de (V7), a redução de custos (V1) é a segunda vantagem mais comentada nos trabalhos analisados, com mais de 47% de citações, assim como a possibilidade de testes em diversas condições (V6). Esta última torna-se importante para o processo de validação do modelo simulado, de modo que o comportamento do sistema é aceito para várias configurações de operação e, assim, passa-se ao estágio de construção efetiva do projeto. Além disso, as plantas dos sistemas geralmente possuem várias ver-

sões, e cada uma delas pode ser cara. Se cada ciclo de teste tiver que ser realizado em todas as variações, as versões da planta poderão ter que ser construídas a fim de testá-las, elevando exponencialmente os custos do projeto. Usando o HIL, é possível aproveitar o teste de um subconjunto junto às outras variações disponíveis, em condições variadas e com custos reduzidos.

A redução de tempo de projeto (V2) vem logo em seguida como a vantagem mais citada – aproximadamente 40% dos trabalhos selecionados. Apesar de não ser mencionado explicitamente em todos os

trabalhos, esse benefício do uso da técnica HIL é uma consequência de todas as outras vantagens (com exceção da V1, que é causa de V2). De fato, a possibilidade de não necessitar construir um protótipo (V7) e de evitar riscos à segurança do pessoal e do equipamento (V3), bem como de realizar o desenvolvimento simultâneo dos componentes (V4) e, ainda, testá-los sob diferentes condições de operação (V6), a fim de detectar falhas antes da conclusão do projeto (V5), traz como consequência uma redução significativa no tempo de projeto.

Em plantas complexas, o mau funcionamento no sistema de controle pode levar a falhas catastróficas, destruindo o equipamento ou apresentando riscos à segurança. A aplicação de testes de HIL pode ser usada para validar controladores antes da execução no equipamento físico. A técnica pode ser usada no início do projeto para validar um novo controlador; pode, ainda, ser usada durante o desenvolvimento

A técnica HIL para desenvolvimento de sistemas é utilizada em setores das mais diversas áreas, desde a indústria aeroespacial até a medicina, passando pelos setores de defesa e manufatura

para reduzir as chances de que mudanças no *software* de controle introduzam a novas falhas. Ambos os usos reduzem a probabilidade do encontro de falhas inesperadas no *hardware*. Muito dos estudos analisados envolveram o desenvolvimento de sistemas que apresentavam pouco ou nenhum risco à segurança pessoal ou ao equipamento (V3). Entretanto, aproximadamente, 30% dos trabalhos citaram essa vantagem em seus estudos.

Um ponto pouco mencionado é o desenvolvimento simultâneo de componentes (V4), correspondendo à 21% das

citações. Uma justificativa implícita para uma quantidade menor de menções a essa vantagem vem do fato de que a maioria das pesquisas analisadas não desenvolveu todo o projeto, sendo seus estudos limitados apenas às simulações usando HIL.

Ainda assim, essa vantagem é importante, pois, em vários projetos de desenvolvimento de sistemas de controle, o controlador pode estar disponível muito antes da planta, dos conversores e dos sensores. Usando a técnica HIL, os testes no controlador podem começar antes de outros componentes estarem prontos. Isto pode reduzir o tempo geral de desenvolvimento, enquanto aumenta a confiança no controlador.

Por último, tem-se a possibilidade de detecção de falhas e defeitos antes da conclusão do projeto (V5), com apenas 17% das citações, devido também à mesma justificativa de V4, isto é, à limitação do estudo em apenas realizar uma simulação. Embora essa vantagem tenha sido citada poucas vezes, a técnica HIL permite testes de falhas mais robustos. Geralmente, um teste minucioso de falhas é impraticável quando aplicado em um sistema físico como um todo. Com HIL, falhas podem ser induzidas por meio de *software* e podem ser sincronizadas com uma ampla gama de condições diferentes.

Outro ponto a se destacar sobre o uso de HIL para desenvolvimento de sistemas é que essa técnica é utilizada em setores das mais diversas áreas, desde a indústria

aeroespacial até a medicina, passando pelos setores de defesa e manufatura.

CONCLUSÃO

Durante a pesquisa, foi possível perceber uma grande quantidade de trabalhos relacionados com a aplicação de HIL no desenvolvimento de algum tipo de sistema, abrangendo diversas áreas do conhecimento. A partir da análise desses estudos, foram retiradas todas as citações a vantagens e limitações do método que os autores fizeram.

Com base nos trabalhos estudados, foi possível observar que essa técnica vem sendo usada em diversos setores, tanto industriais quanto acadêmicos. Em muitos desses casos, as plantas estudadas ou desenvolvidas são especialmente complexas. Com isso, técnicas como HIL podem auxiliar os testes de sistemas físicos, fornecendo várias vantagens. Dentre elas destacam-se a redução de custo (V1) e a redução de tempo de projeto (V2), que, apesar de não serem citadas majoritariamente, são causa e consequência de todas as outras vantagens. Além disso, são os fatores que mais influenciam projetos de caráter governamental/militar na Marinha do Brasil.

Sendo assim, o investimento em equipamentos que possibilitem a utilização da técnica de HIL deve ser visto como essencial e necessário para o desenvolvimento de sistemas de controle, principalmente, no âmbito militar.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
<SISTEMAS>; Sistemas;

REFERÊNCIAS

- BADARUDDIN, K. S.; HERNANDEZ, J. C.; BROWN, J. M. *The importance of Hardware-in-the-Loop testing to the cassini mission to saturn*. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, p. 1-9, 18 jun. 2007.
- CRAVOTTA, R. *Mixing the real with the virtual*. EDN, [S. l.], p. 57-62, 26 de maio 2005.
- DE JONG, E.; VAESSEN, P.; GRAAFF, R. “The role of hardware in the loop in validation and testing”. *International Journal of Distributed Energy Resources and Smart Grids*, [s. l.], v. 9, p. 1-6, março 2013.
- EDENFELD, D.; KAHNG, A. B.; RODGERS, M.; ZORIAN, Y. *2003 technology roadmap for semiconductors*. IEEE Computer Society, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 47-56, 9 de agosto 2004.
- FARIAS, A. B. C. de. *Desenvolvimento de uma plataforma de simulação Hardware in the Loop de baixo custo*. Orientador: Renato Vilela Lopes. 2016. 112 p. Monografia (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Universidade de Brasília, [S. l.], 2016.
- HOSSEINPOUR, F.; HAJIHOSSEINI, H. *Importance of simulation in manufacturing*. World Academy of Science, Engineering and Technology, [s. l.], v. 51, p. 285-288, 2009.
- ÍRENO, T. S. de M. *Aplicação da metodologia Model-Based Design no projeto e teste de sistemas de controle*. Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis. 2014. 44 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2014.
- KOPETZ, H. *Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*. 2. ed. [S. l.]: Springer US, 2011. 378 p. v. XVIII. ISBN 978-1-4419-8236-0.
- LANGSTON, J.; SLODERBECK, M.; STEURER, M.; DALESSANDRO, D.; FIKSE, T. *Role of hardware-in-the-loop simulation testing in transitioning new technology to the ship*. 2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Arlington, VA, USA, p. 514-519, 6 jun. 2013.
- LINS, A. R. “A técnica de *Hardware-in-the-Loop* no auxílio de projetos mecatrônicos”. *Revista Mecatrônica Atual*, [s. l.], ano 6, ed. 35, 2007.
- LOCKHART, R. W. *What You Really Need to Know About Sample Rate*. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.dataq.com/data-acquisition/general-education-tutorials/whatyou-really-need-to-know-about-sample-rate.html>. Acesso em: 10 jan. 2020.
- LONGO, W. P. e; MOREIRA, W. S. “Tecnologia e Inovação no Setor de Defesa: uma perspectiva sistêmica”. *Revista Escola de Guerra Naval*, Rio de Janeiro, RJ, v. 19, n. 2, p. 277-304, jul./dez. 2013.
- LOPES, A. M. R. *Aplicação da simulação Hardware in the Loop para testes e desenvolvimento de suspensões veiculares*. Orientador: Pablo Siqueira Meirelles. 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2017.
- LU, B.; WU, X.; FIGUEROA, H.; MONTI, A. *A Low-Cost Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing Approach of Power Electronics Controls*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, [s. l.], v. 54, ed. 2, p. 919-931, 19 de março 2007.
- NABI, S.; BALIKE, M.; ALLEN, J.; RZEMIEN, K. “An overview of hardware-in-the-loop testing systems as Visteon”. *SAE Technical Paper Series: SAE International*, Commonwealth DriveWarrendale, PA, n. 1.240, ed. 1, 4 de março 2004.
- NATIONAL INSTRUMENT CORPORATION. *Teste Hardware-in-the-Loop (HIL)*. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/automotive/hardware-in-the-loop.html>. Acesso em: 6 jan. 2020.
- NATIONAL INSTRUMENT CORPORATION. *What is Hardware-in-the-Loop?*. [S. l.]: NI, 5 de março 2019. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/17/whatis-hardware-in-the-loop.html>. Acesso em: 10 jan. 2020.

- PASSOS, W. D. Utilização de ferramentas de prototipagem rápida direcionada à concepção de sistemas embarcados baseados em computação configurável. Orientador: Prof. Dr. João Maurício Rosário. 2008. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2008.
- SCHLAGER, M. *Hardware-in-the-loop Simulation: A Scalable, Component-based, Timetriggered Hardware-in-the-loop Simulation Framework*. [S. l.]: VDM Verlag Dr. Müller, 2008. 133 p.
- ZANDER, J.; SCHIEFERDECKER, I.; MOSTERMAN, P. J. *Model-Based Testing for Embedded Systems*. [S. l.]: CRC Press, 2011. 21 p.
- [T01] FARIAS, A. B. C. de. *Desenvolvimento de uma plataforma de simulação Hardware in the Loop de baixo custo*. Orientador: Renato Vilela Lopes. 2016. 112 p. Monografia (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Universidade de Brasília, [S. l.], 2016.
- [T02] GREGA, W. *Hardware-in-the-loop simulation and its application in control education*. 29th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, [s. l.], p. 7-12, 1999.
- [T03] DE ALBUQUERQUE, A. R. L. *Aplicações de Hardware-in-the-Loop no desenvolvimento de uma mão robótica*. Orientador: Prof. Assoc. Glauco Augusto de Paula Caurin. 2007. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2007.
- [T04] CARRILLO, C. A. G. *Estratégias para correção dos efeitos do atraso de sistemas Hardware in the Loop (HIL)*. Orientador: Prof. Dr. Janito Vaqueiro Ferreira. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2012.
- [T05] LINS, A. R. “A técnica de hardware-in-the-loop no auxílio de projetos mecatrônicos”. *Revista Mecatrônica Atual*, [s. l.], ano 6, ed. 35, 2007.
- [T06] DA SILVA, H. M. *Simulação com Hardware in the Loop Aplicada a Veículos Submarinos Semi-Autônomos*. Orientador: Prof. Dr. Celso Massatoshi Furukawa. 2008. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2008.
- [T07] HAGIWARA, K.; TERAYAMA, S.; TAKEDA, Y.; YODA, K.; SUZUKI, S. “Development of automatic transmission control system using hardware-in-the-loop simulation system. *JSAE Review*, [s. l.], v. 23, ed. 1, p. 55-59, 2002.
- [T08] BATTERBEE, D. C.; SIMS, N. D. “Hardware-in-the-loop simulation of magnetorheological dampers for vehicle suspension systems”. *Journal of Systems and Control Engineering*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, v. 2, n. 221, p. 265-278, 2007.
- [T09] MISSELHORN, W. E. *Verification of hardware-in-the-loop as a valid testing method for suspension development*. Orientador: Prof. N.J. Theron. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – University of Pretoria, Pretória, África do Sul, 2004.
- [T10] LOPES, A. M. R. *Aplicação da simulação Hardware in the Loop para testes e desenvolvimento de suspensões veiculares*. Orientador: Pablo Siqueira Meirelles. 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2017.
- [T11] SCHLAGER, M.; OBERMAISSER, R.; ELMENREICH, W. “A Framework for Hardware-in-the-Loop Testing of an Integrated Architecture”. *Lecture Notes in Computer Science - LNCS*, Ilha Santorini, Grécia, v. 4.761, p. 159-170, maio 2007.
- [T12] *Hardware-In-The-Loop Simulation*. [S. l.], 2001. Disponível em: <https://www.embedded.com/hardware-in-the-loop-simulation-2/>. Acesso em: 13 jan. 2020.
- [T13] ÍRENO, T. S. de M. *Aplicação da metodologia model-based design no projeto e teste de sistemas de controle*. Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis. 2014. 44 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2014.

- [T14] CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, VIII., 2008, Poços de Caldas, MG. *Proposta de Utilização de Hardware-in-the-loop no desenvolvimento de sistemas de controle via redes CAN [...]*. [S. l.]: Induscon, 2008. 7 p. Eduardo Paciência Godoy; Arthur José Vieira Porto; Ricardo Yassushi Inamasu.
- [T15] SILVA, J. R. O.; KIENITZ, K. H. “Simulação *Hardware-in-the-Loop* (HIL) usando *hardware* computacional na configuração mestre-escravo. *Artigos Iniciação Científica Pibic/CNPq*, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, SP, 2016.
- [T16] FRANÇA, B. W. *Hardware-in-the-loop para desenvolvimento de software embarcado em DSPs utilizando ambiente PSCAD/EMTDC*. Orientador: Maurício Aredes. 2009. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2009.
- [T17] LINJAMA, M.; VIRVALO, T.; GUSTAFSSON, J.; LINTULA, J.; AALTONEN, V.; KIVIKOSKI, M. “Hardware-in-the-loop environment for servo system controller design, tuning and testing”. *Microprocessors and Microsystems*, [s. l.], v. 24, ed. 1, p. 13-21, 29 de março 2000.
- [T18] BÜCHLER, P.; ETTLIN, A.; NELSON, B. J. “Ibex – A Framework for Hardware in the Loop Simulation”. *ABCMSymposium Series in Mechatronic*, [s. l.], v. 2, p. 589-596, 2006.
- [T19] LI, Z.; KYTE, M.; JOHNSON, B. K. “Hardware-in-the-loop real-time simulation interface software design”. *Proceedings. The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, [s. l.], p. 1.012-1.017, 7 de março 2005.
- [T20] MOHAMED, A. O.; YOUSEF, A. H.; HAMMAD, S. *A Framework for Real Time Hardware in the loop Simulation for Control Design*. GCC IEEE Conference, Bahrain, 6 de outubro 2014.
- [T21] VRIJDAG, A. “Potential of Hardware-in-the-Loop simulation in the Towing Tank”. *Oceans 2016 MTS/IEEE Monterey*, Monterey, CA, p. 1-6, 2016.
- [T22] MAROUANI, K.; GUENDOZ, H.; TABBACHE, B.; KHOUCHA, F.; KHELOUI, A. *Experimental Investigation of an Emulator "Hardware In the Loop" for Electric Naval Propulsion System*. 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), Platánias-Chania, Crete, Greece, p. 125-130, 28 de fevereiro 2013.
- [T23] ALTOSOLE, M.; FIGARI, M.; VIVIANI, M.; MICHETTI, S.; TRAPANI, A. M. *Simulation of the dynamic behaviour of a Codlag propulsion plant*. Warship 2010: Advanced Technologies in Naval Design and Construction, London, UK, junho 2010.