

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS — UNISINOS  
ESCOLA POLITÉCNICA  
ENGENHARIA ELETRÔNICA  
NÍVEL GRADUAÇÃO

VINÍCIUS GABRIEL LINDEN

AUTOMATIZAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE ENSAIOS FUNCIONAIS EM PLATAFORMA  
HARDWARE-IN-THE-LOOP PARA MAQUINÁRIO AGRÍCOLA AUTOPROPELIDO

SÃO LEOPOLDO  
2017



Vinícius Gabriel Linden

**AUTOMATIZAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE ENSAIOS FUNCIONAIS EM PLATAFORMA  
HARDWARE-IN-THE-LOOP PARA MAQUINÁRIO AGRÍCOLA AUTOPROPELIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Eletrônica pelo  
curso de Engenharia Eletrônica da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –  
UNISINOS

Orientador:  
Prof. Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo

São Leopoldo  
2017

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Linden, Vinícius Gabriel

AUTOMATIZAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE ENSAIOS FUNCIONAIS EM PLATAFORMA HARDWARE-IN-THE-LOOP PARA MAQUINÁRIO AGRÍCOLA AUTOPROPELIDO / Vinícius Gabriel Linden — 2017.

61 f.: il.; 30 cm.

— Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Engenharia Eletrônica, São Leopoldo, 2017.

“Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo, Escola Politécnica”.

1. Ensaio funcional. 2. Verificação & Validação. 3. Hardware-In-the-Loop. 4. Maquinário agrícola. I. Título.

CDU

## **AGRADECIMENTOS**

O fechamento deste documento antecipa o desfecho de um percurso tomado há seis anos atrás. No entanto, as consequências desta escolha perdurarão, como fazem desde então. Entre as experiências maturadas ao longo do caminho acadêmico e profissional, existe majoritariamente indícios que reforçam a concordância dos objetivos profissionais com a via conquistada.

Por este motivo, estendo meu agradecimento sincero a todas as pessoas que contribuíram para meu desenvolvimento, não somente durante o tempo do projeto apresentado. Logo, incluo aqueles que se dedicaram durante no acompanhamento de meu progresso acadêmico, profissional e pessoal.

Entre estas pessoas, destaco: meu Coordenador Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo pela distinta dedicação ao curso e a meus colegas; e o professorado do curso de Engenharia Eletrônica. Interpreto conselhos cedidos como muito mais que uma cortesia. Espero que a memória me persista, para que eu possa ser voluntário contente na retribuição.

Em outra, registro meu agradecimento à empresa anfitriã pela concessão de dedicar a escrita deste documento a um de seus projetos. Cito meus colegas de trabalho e superiores pelo suporte prestado e pela compreensão. Seja este texto útil não somente para minha formação - porém para a corporação.



## RESUMO

A complexidade presente no maquinário agrícola contemporâneo é simultaneamente o mecanismo do sucesso para o empreendedor do campo e um desafio para o fabricante. Não se tratando somente da tendência, mas de uma via obrigatória, a tecnologia eletrônica embarcada deverá ser empregada para solucionar os novos desafios do campo no suprimento de matéria energética mundial. Por conseguinte, técnicas de engenharia de testes deverão se sofisticar para manter e aprimorar a qualidade e a segurança da máquina. O projeto apresentado desenvolve uma metodologia de testes em plataforma *Hardware-In-the-Loop* (HIL) automatizada e modular. A plataforma HIL proposta possui como embasamento principal o trabalho realizado previamente por (REIS, 2015), que por si prova benefícios do sistema não automatizado e não modular. Com base em técnicas de projeto para segurança previstos na norma ISO25119, um Estudo de Caso é feito para um Módulo HIL da Unidade de Controle Eletrônico (ECU) do motor. Vinte e seis Casos de Teste (CT) críticos são previstos conforme a metodologia de Segurança Funcional (SF) pela ferramenta *Hazard Assessment and Risk Analysis* (HARA). A bateria de teste é aplicada e os resultados são analisados. Uma comparação entre o HIL proposto e o método de testes tradicionais é traçada. O módulo desenvolvido realiza testes com confiabilidade e repetibilidade garantidas, 5961.8% mais rápido. Também é observada a característica do módulo reproduzir cenários de testes não testáveis em campo. Por fim, o projeto prova-se uma escolha viável.

**Palavras-chave:** Ensaio funcional. Verificação & Validação. Hardware-In-the-Loop. Maquinário agrícola.



## ABSTRACT

The complexity in modern agricultural machinery is simultaneously, for the agriculture entrepreneur, the mechanism for success and, for the manufacturer, a key challenge. It is beyond argument that the path of technolisation is mandatory. The embedded electronic shall be employed to supply solutions to the world's demand of energy and food. Therefore, test engineering techniques must become ever-increasing sophisticated to maintain and improve the machine's quality and safety. The present project searches to conceive a test methodology based on an automated and modular Hardware-In-the-Loop (HIL) system. The proposed HIL is mainly structured on the test bench by (REIS, 2015). Which, by its own, proves the benefits of the unautomated and unmodular system. Based on safety techniques for the development of new products with safety standards as in ISO25119 norm, a Case Study is made for the Engine's Electronic Control Unit (ECU) HIL Module. Twenty-six critical Test Cases (CT) are planned according to the Functional Safety (SF) methodology through the Hazard Assessment and Risk Analysis (HARA) tool. The test battery is applied and the results are analyzed. A comparison between the proposed HIL system and the traditional testing method is made. The constructed module runs tests with guaranteed reliability and reproductivity, 5961.8 % faster. The module's characteristic of reproducing test scenarios impossible to replicate on the field is observed. At last, the project proves itself as a viable choice.

**Keywords:** Functional test. Validation & verification. Hardware-In-the-Loop. Agricultural machinery.



## RÉSUMÉ

La complexité des équipements agricoles contemporains est simultanément le mécanisme du succès pour l'entrepreneur et un défi pour le fabricant. Il est déjà hors doute que ce chemin est bien plus qu'une tendance, pourtant une voie sans retour. L'électronique embarquée devra être employée pour solutionner les nouveaux défis du supplément de matière énergétique mondiale. Par conséquent, des techniques d'ingénierie d'essai devront devenir de plus en plus sophistiquées pour maintenir et améliorer la qualité et la sûreté de la machine. Le projet présenté crée une méthodologie d'essai *Hardware-In-the-Loop* (HIL) automatisée et modulaire. Le système proposé est principalement structuré sur le banc-d'essais par (REIS, 2015), qui, par soit-même, prouve les avantages du HIL non-automatisé et non-modulaire. Basé dans les techniques de sûreté pour le développement des nouveaux produits selon la norme ISO25119, un Étude de Cas est fait pour un Module HIL de l'Unité de Contrôle Électronique (ECU) du Moteur. Vingt-six Cas de Test (CT) critiques sont prévus selon la méthodologie de Sûreté Fonctionnelle (SF) par l'outil *Hazard Assessment and Risk Analysis* (HARA). La batterie de tests est appliquée et les résultats sont analysés. Une comparaison entre le HIL proposé et la méthode traditionnelle de test est tracée. Le module développé réalise des tests avec confiabilité et répétitivité garanties, 5961.8 % plus rapide. La caractéristique du module de reproduire des scénarios d'essais pas testables en champs est observée. Pour en finir, le projet prouve d'être un choix viable.

**Mots-clés:** Essais fonctionnel. Validation & vérification. Hardware-In-the-Loop. Equipement agricole.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Curva da banheira . . . . .	22
Figura 2:	Representação do conceito do HIL genérico . . . . .	23
Figura 3:	Modelo V de desenvolvimento . . . . .	24
Figura 4:	Exemplo FTA simples . . . . .	26
Figura 5:	Exemplo ETA de um sistema de pressurização simples . . . . .	27
Figura 6:	Conceito simulação HIL . . . . .	31
Figura 7:	Chassis Performance . . . . .	32
Figura 8:	Chassis SCALEXIO . . . . .	32
Figura 9:	Chassis Vector . . . . .	33
Figura 10:	Chassis NI PXIe-8880 . . . . .	33
Figura 11:	Desenvolvimento do HW Módulo Tier III . . . . .	37
Figura 12:	Representação do conceito HIL automatizado . . . . .	38
Figura 13:	Estrutura de execução . . . . .	39
Figura 14:	Simplificação das funcionalidades da ECU do motor eletrônico . . . . .	39
Figura 15:	Representação módulo HIL Estudo de Caso . . . . .	41
Figura 16:	Aparência do módulo desenvolvido . . . . .	45
Figura 17:	Desenvolvimento de módulo genérico . . . . .	55
Figura 18:	Desenvolvimento de teste genérico . . . . .	56
Figura 19:	Fluxograma de execução automatizada de CT . . . . .	57
Figura 20:	Aparência do módulo instalado . . . . .	61
Figura 21:	Aparência do módulo executando teste . . . . .	61



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1:	Casos de Teste desenvolvidos para o subsistema em análise . . . . .	42
Quadro 2:	Resultados da execução dos casos de teste . . . . .	46
Quadro 3:	HARA do subsistema do Estudo de Caso . . . . .	53
Quadro 4:	Resultados da execução dos casos de teste . . . . .	59



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
HIL	<i>Hardware-In-the-Loop</i> (Hardware no Laço)
ECU	<i>Electronic Control Unit</i> (Unidade de Controle Eletrônico)
HW	Hardware
SW	Software
SwIL	<i>Software-In-the-Loop</i> (Software no Laço)
MIL	<i>Model-In-the-Loop</i> (Modelo no Laço)
PIL	<i>Process-In-the-Loop</i> (Processo no Laço)
SIL	<i>System-In-the-Loop</i> (Sistema no Laço)
CT	Casos de Teste
HH	Homem-hora
V&V	Validação & Verificação
SF	Segurança Funcional
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Análise de Modos de Falha e Efeito)
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i> (Análise de Árvore de Falhas)
ETA	<i>Event Tree Analysis</i> (Análise de Árvore de Eventos)
HARA	<i>Hazard Assessment and Risk Analysis</i> (Análise de Avaliação de Perigo e Risco)
AgPL	<i>Agricultural Performance Level</i> (Nível de Desempenho Agrícola)
AO	<i>Analog Output</i> (Saída Analógica)
MEF	Máquina de Estados Finitos
TT	Tempo de Teste
DUT	<i>Device Under Test</i> (Aparato sob Teste)
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicação)
CAN	<i>Controller Area Network</i>
SM	Simulador de Máquina
AGCT	Aplicação Gerenciadora de Casos de Teste
OV	Operador Virtual
SUT	<i>System Under Test</i> (Sistema sob Teste)



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>1.1 Objetivo Geral</b> . . . . .	19
<b>1.2 Objetivos Específicos</b> . . . . .	20
<b>2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> . . . . .	<b>21</b>
<b>2.1 CONCEITOS BÁSICOS</b> . . . . .	21
2.1.1 SISTEMA EMBARCADO . . . . .	21
2.1.2 MAQUINÁRIO AGRÍCOLA AUTOPROPELIDO . . . . .	21
2.1.3 CURVA DA BANHEIRA . . . . .	22
2.1.4 HARDWARE-IN-THE-LOOP . . . . .	23
2.1.5 AUTOMATIZAÇÃO . . . . .	24
2.1.6 SEGURANÇA FUNCIONAL . . . . .	25
2.1.7 MOTOR ELETRÔNICO . . . . .	28
<b>2.2 ESTADO DA ARTE</b> . . . . .	28
<b>2.3 PESQUISA DE MERCADO</b> . . . . .	31
<b>3 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>35</b>
<b>3.1 REQUISITOS</b> . . . . .	35
3.1.1 REQUISITOS DO ESTUDO DE CASO . . . . .	36
<b>3.2 MÉTODO</b> . . . . .	37
3.2.1 MÉTODO DO ESTUDO DE CASO . . . . .	37
<b>3.3 SISTEMA PROPOSTO</b> . . . . .	38
3.3.1 ESTUDO DE CASO . . . . .	39
<b>3.4 MATERIAIS</b> . . . . .	42
3.4.1 MATERIAIS DO ESTUDO DE CASO . . . . .	43
<b>3.5 MÉTRICA</b> . . . . .	43
<b>4 ANÁLISE DE RESULTADOS</b> . . . . .	<b>45</b>
<b>4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA</b> . . . . .	46
<b>4.2 ANÁLISE QUALITATIVA</b> . . . . .	46
<b>5 CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>APÊNDICE A TABELA HARA PROPOSTA</b> . . . . .	<b>53</b>
<b>APÊNDICE B ILUSTRAÇÕES DO CAPÍTULO DE METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>55</b>
<b>APÊNDICE C ILUSTRAÇÕES DO CAPÍTULO DE ANÁLISE DE RESULTADOS</b> . . . . .	<b>59</b>
<b>APÊNDICE D IMAGENS DO MÓDULO DE ESTUDO DE CASO</b> . . . . .	<b>61</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O amadurecimento da tecnologia embarcada ao longo dos anos trouxe a possibilidade de aplicação de recursos em ramos produtivos outrora restritos. Ambientes hostis à eletrônica sensível traziam desconfiância quanto a segurança e qualidade da solução elétrica em aplicações como na área agrícola.

Atualmente, da mesma maneira que ocorreu na indústria automotiva anteriormente, a eletrônica foi incorporada nos projetos de maquinário agrícola. O que há pouco tempo era usado simplesmente para acionamentos elétricos, abriu alas para a conveniência do operador. Ao seu turno, esta trouxe ferramentas ao empresário agrícola que alavancaram o rendimento da superfície trabalhada. No entanto, a fim de garantir a sustentabilidade e qualidade da eletrônica embarcada no maquinário, um alto grau de sofisticação teve de ser adquirido. Assim, ensaios efetuados em campo e em laboratório são indispensáveis. Como foco deste trabalho este último é examinado, cuja justificativa e objetivos são fundamentados na literatura e em normatizações.

O projeto avançado neste documento dedica-se ao estudo e desenvolvimento da tecnologia *Hardware-In-the-Loop* (HIL). É proposto uma evolução da plataforma conceituada por Reis (2015), que desenvolveu um simulador para testes com operador presente. Neste documento, analisar-se-á a viabilidade de automatizar ensaios na metodologia HIL. Outrossim, este projeto será desenvolvido para e através de uma empresa anfitriã, anônima, suportadora da iniciativa.

A metodologia sugerida será aplicada em um estudo de caso para um módulo HIL de ensaio automatizado do sistema controle eletrônico do motor. Uma análise de resultados será feita. Como consequência, será possível comparar os benefícios e a viabilidade econômica da proposta. Em razão de clareza e transparência, vê-se a necessidade de definir os objetivos do projeto. São estes divididos e gerais e específicos.

### 1.1 Objetivo Geral

Em sua essência, deve se afirmar que a iniciativa busca promover o desenvolvimento de tecnologia local para o empresa anfitriã. Esta tecnologia por si tornar-se-á útil somente em vistas do produto final (maquinário agrícola). Logo, a metodologia deve ser um instrumento para o melhoramento das condições de segurança, do bom funcionamento e bom desempenho do maquinário. Esta realização dar-se-á em uma estruturação de projeto que considere as informações obtidas do emprego da metodologia. Que futuramente será capaz de validar o sistema conforme os requisitos iniciais do projeto. Adicionalmente, a iniciativa deve gerar competência e conhecimento para a empresa. Assim, possibilitando um melhor entendimento do sistema obtido. Isto deve ser uma consequência da obtenção dos objetivos específicos.

## 1.2 Objetivos Específicos

Por vias de alcance do objetivo geral de desenvolver uma metodologia de plataforma HIL, compreende-se a necessidade de explicitar objetivos específicos. São estes necessários como marcos de projeto, tanto para medida do cumprimento do projeto quanto para fazer observação de passos intermediários obrigatórios. Pontualmente, os objetivos da iniciativa relatados neste documento são:

1. Criação de um método abrangente de desenvolvimento de plataforma HIL modular e automatizada;
2. Execução de um módulo HIL como Estudo de Caso, em acordo com o método proposto;
3. Validação da execução do Estudo de Caso;
4. Proposta de análise de resultados obtidos através de uma validação de exemplo, feita com o módulo do Estudo de Caso;
5. Documentação do método.

Prosseguindo esta Introdução, apresenta-se-á a seção de Referencial Bibliográfico. A qual será desenvolvida em preparação para o entendimento de conceitos básicos relativos ao projeto e para a definição do estudo em seu contexto. Uma subseção sobre o Estado da Arte trará justificativa para a execução do projeto no contexto tecnológico atual. A Metodologia seguinte tratará da proposta de projeto, devidamente especificado, contendo a delimitação do Estudo de Caso. Por conseguinte, a Análise de Resultados irá averiguar os desfechos do Estudo de Caso executado e suas consequências diante da metodologia empregada, em contraponto com as especificações. A Conclusão apresentada por último irá retomar o percurso traçado do trabalho, embasando os resultados práticos no contexto do projeto. O Apêndice servirá para enriquecer e ilustrar o conteúdo retratado do corpo do documento.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

O presente capítulo apresenta conceitos básicos para a compreensão do conteúdo proposto. Neste, busca-se contextualizar o projeto, através da revisão da arte e seus conceitos como entendidos atualmente.

### 2.1 CONCEITOS BÁSICOS

Esta seção desenvolverá conceitos fundamentais para a compreensão da problemática resolvida com o sistema proposto. O objeto de estudo emerge à evidência quando observados dois atores opostos: a complexidade do sistema e sua robustez. Estes são primeiramente compreendidos pela natureza de um sistema embarcado.

#### 2.1.1 SISTEMA EMBARCADO

Segundo Ganssle e Barr (2003), um sistema embarcado é uma combinação entre hardware e software dedicada à função específica - podendo fazer parte de um sistema maior. Este sistema aplicado para o controle de funcionalidades mecânicas, como válvulas hidráulicas, em conjunto com outras funcionalidades, em tempo real gera um grau de complexidade elevado. *Electronic Control Unit* (ECU) ou Unidades de Controle Eletrônico são exemplos de subsistemas embarcados com acionamentos elétricos, hidráulicos e mecânicos e estão presentes em todos maquinário agrícola autopropelido.

#### 2.1.2 MAQUINÁRIO AGRÍCOLA AUTOPROPELIDO

Entende-se como uma máquina agrícola autopropelida (ou simplesmente máquina) qualquer máquina com a finalidade de beneficiar uma cultura, possuindo uma fonte de locomoção incorporada. Em particular, são máquinas agrícolas aplicáveis neste contexto: tratores, colheitadeiras, colhedoras de cana e pulverizadores. A quantidade de acionamentos e a classe do motor determinam o número de ECUs que a máquina comporta (PAQUET et al., 1996).

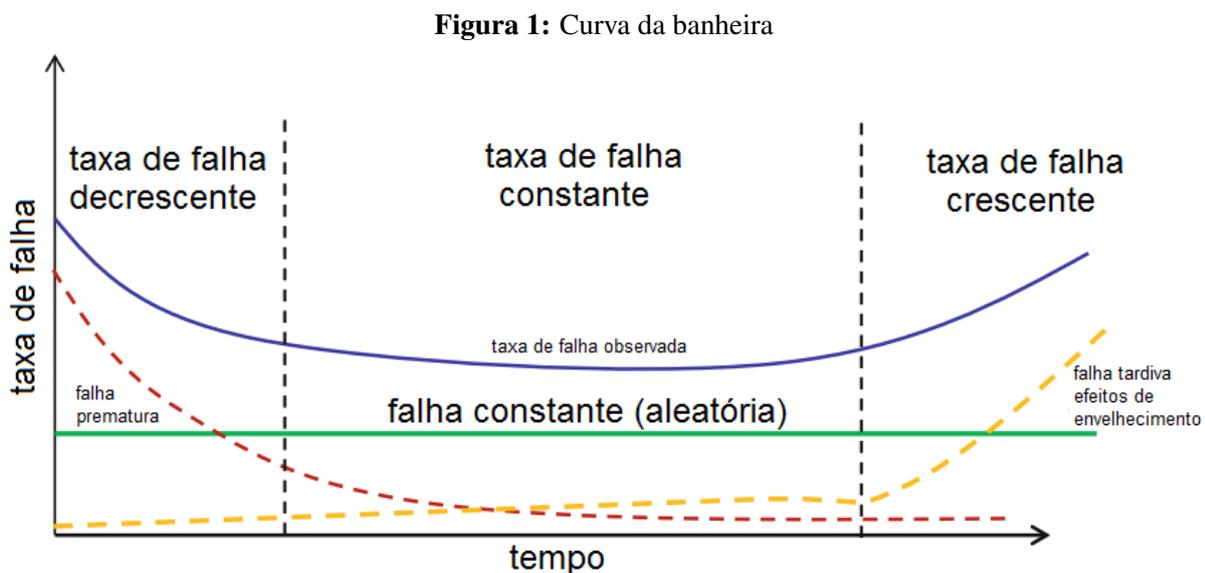
Exigência do mercado e de regulamentações criam perspectivas de aumento da inteligência em veículos automotivos, o aumento de funcionalidade e de complexidade do sistema incrementam o risco de falhas (ZHANG; LI; QIN, 2010), (NAYAK; PUTHIYAPURAYIL; MOUZAKITIS, 2010). Esta tendência se confirma em máquinas agrícolas, que enfrenta desafios similares aos veículos automotores. Porém, estes desafios são atenuados pela realidade do local de operação do maquinário - inóspito para sistemas sensíveis.

Falhas são apresentadas como custos de materiais, de energia e de oportunidades. Busca-se então, reduzir o máximo possível falhas sistêmicas de projeto apresentadas antes do lançamento do produto no mercado. Tem-se como ferramenta o perfil e identificação destas falhas, segundo

sua fonte e natureza. Estas propriedades são interpretadas pela Curva da Banheira.

### 2.1.3 CURVA DA BANHEIRA

A evolução de um produto consiste em três etapas: desenvolvimento, lançamento e *phase-out*. Cada fase é caracterizada por tipos de ocorrências de falhas que podem ser estudadas pela Curva da Banheira (Figura 1). Este gráfico traça a densidade de probabilidade de falhas do produto em relação à sua vida útil.



Fonte: Adaptado de (ROSS, 2016)

Fica importante anotar, que por produto se entende qualquer hardware (HW) ou software (SW) que é ou possui a intensão de ser comercializado.

A imagem acima, é marcada por estas três etapas em ordem. A primeira, de desenvolvimento, consiste em um alto índice de falhas, o que é característico de projeto. Enquanto que a fase de lançamento, as falhas devem ser aceitavelmente baixas para que o produto esteja em comercialização. Por último o *phase-out* de passa o tempo de uso razoável do produto. Por conta dos gastos mecânicos e envelhecimento da eletrônica, falhas reaparecem.

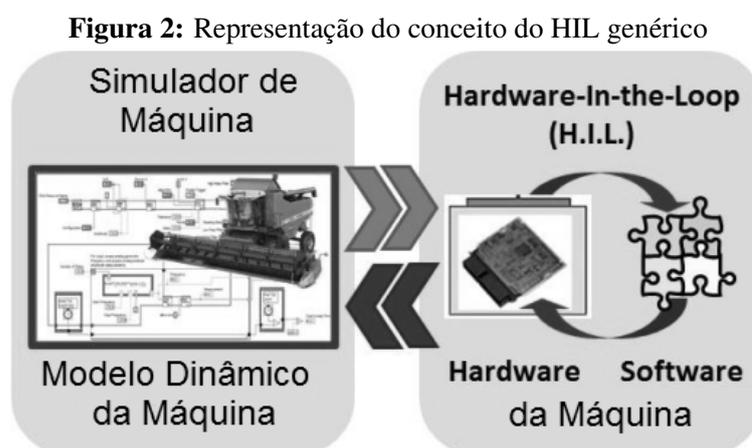
Enquanto que esta curva é muito utilizada em previsões prematuras (ROSS, 2016), esta vem sendo questionada quanto aplicabilidade e veracidade das informações que ela contém (KLUTKE; KIESSLER; WORTMAN, 2003). No entanto, nela emerge facilmente a questão da qualificação da falha quanto sua natureza. Falhas podem ser separados como erros sistemáticos ou erros aleatórios. Enquanto que falhas que ocorrem ao longo do tempo de vida do produto são aleatórias, imprevisíveis e constantes (Figura 1). Na fase de desenvolvimento, erros são em maior parte sistemáticos e contornáveis. Pois possuem como origem falhas técnicas de projeto.

Com o objetivo de remover todas as falhas sistemáticas, algumas técnicas são aplicadas. São estas *Software-In-the-Loop* (SwIL), *Model-In-the-Loop* (MIL) durante os primeiros pas-

sos do projeto, para respectivamente a validação de software e Validação e Verificação (V&V) da planta de controle. Em seguida, possui-se o *Process-In-the-Loop* (PIL) o qual V&V o SW no HW final. E o *Hardware-In-the-Loop* (HIL) com o *System-In-the-Loop* (SIL) para a V&V respectivamente de um HW e SW finais e o conjunto de HW e SW finais (sistema). Consequentemente, o HIL é introduzido como plataforma de validação de projeto - sendo assim, sinônimos.

#### 2.1.4 HARDWARE-IN-THE-LOOP

HIL é definido como qualquer ambiente de simulação o qual parte do HW testado está interfaceado com outros componentes simulados (GANSSLE; BARR, 2003). A simulação pode tanto ocorrer com laços de controle abertos, fechados ou uma combinação de ambos (Figura 2). Detalhamento será feito na seção a seguir.

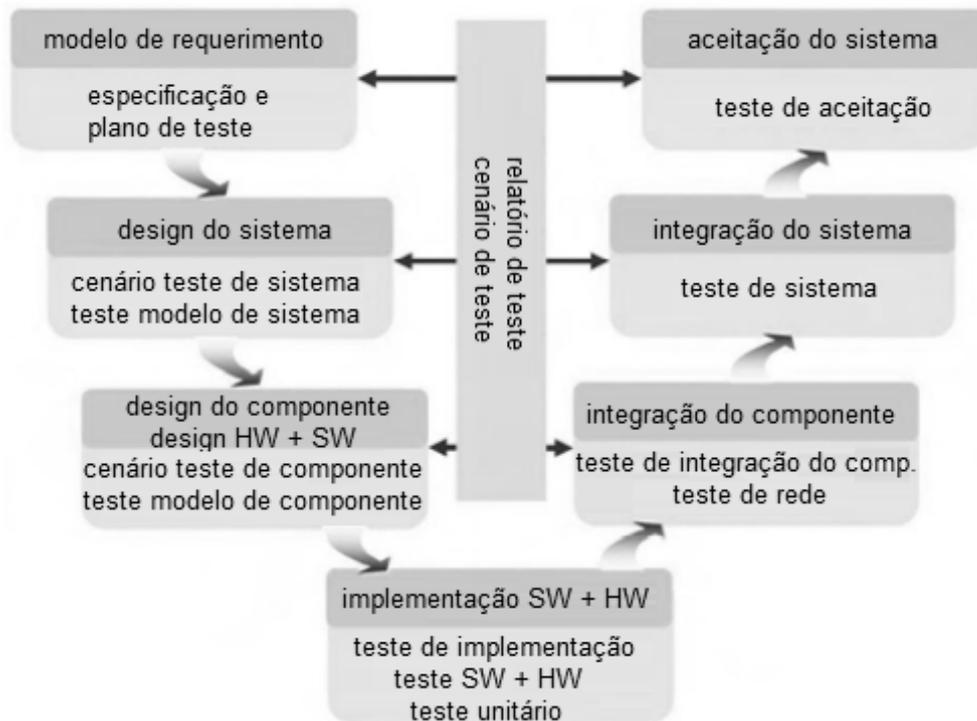


Fonte: Adaptado de (KELBER; REIS; FIGUEIREDO, 2016).

HIL é uma consagrada técnica de projeto. Desenvolvida nas indústrias aeronáuticas e de defesa, data dos anos de 1930 (RANKIN; JIANG, 2011). Com o desenvolvimento da indústria, principalmente automotiva, o HIL passou a ser um requisito no desenvolvimento do produto.

Conforme o Modelo V (Figura 3), o HIL é a penúltima etapa de validação do produto (Teste de Integração do Sistema). Pois esta etapa verifica o conjunto de HWs e SWs em última versão integrados. Consequentemente obtendo os resultados mais fiéis às condições reais. Com o benefício de amplificação dos Casos de Teste (CT), é possível emular situações irreprodutíveis em campo, verificando a segurança do sistema (KELBER; REIS; FIGUEIREDO, 2016).

Falhas e deficiências de projeto (erros sistêmicos) podem em grande parte ser removidas do produto final com esta metodologia. Isto traz benefícios financeiros e não mensuráveis para o fabricante produto. Pois, uma vez que o produto possui qualidade, ele é reconhecido no mercado como superior - incorporando valor do ponto de vista do cliente. Ademais, o custo inicial de construção de um HIL tende a cobrir o custo de uma validação em campo. Isto é particularmente verdadeiro quando o produto se trata de uma colheitadeira. De valor elevado

**Figura 3:** Modelo V de desenvolvimento

Fonte: Adaptado de (KUM et al., 2006).

e inconveniente de transporte, uma colheitadeira para ser testada em campo deve colher um plantio cedido por um empreendedor rural (REIS, 2015). A potencialidade desta plataforma pode ser expandida com a automatização deste processo.

### 2.1.5 AUTOMATIZAÇÃO

Em uma primeira geração, o HIL proposto é em grande parte manual (REIS, 2015). Esta metodologia possui uma vantagem de validação e prova de conceito - a um custo de Homem-hora (HH) elevado. Por motivos de organização e nomenclatura, o HIL “manual” fica conhecido como “HIL 1.0”, enquanto que o HIL “automatizado” é nomeado de “HIL 2.0”. O HIL 1.0: com um operador acionando entradas de controle de teste e observando os resultados é válido para a verificação funcional completa do maquinário. Entretanto, o sistema também apresenta algumas oportunidades de melhoramento. São elas:

- Erro humano é capaz de inserir falhas na execução do processo de V&V, o que pode parcialmente comprometer os resultados;
- O custo do HH envolvido e limitação temporais obrigam o teste
  - A ter tempo reduzido;
  - Proceder de forma uniforme e linear quanto os itens a serem V&V.

- CT são reduzidos;
- O ambiente simulado (condições) não é monitorado em sua totalidade.

Todas estas inadequações são solucionadas com a automatização. Além mais, a automatização da plataforma HIL possui como vantagens (KUM et al., 2006):

- Redução do HH para a execução do ensaio;
- Expansão do tempo de uso da plataforma;
- Expansão dos CT;
- Variação na ordem de execução dos CT.

Sendo o último item citado particularmente importante. Pois, em um sistema real, a ordem das operações podem causar falhas de sistema. Como o tempo de uso da plataforma é expandido; e os CT também, o rigor da plataforma a uma situação real em si é superiora (PLÖGER; SCHÜTTE; FERRARA, 2004), (NAYAK; PUTHIYAPURAYIL; MOUZAKITIS, 2010), (KUM et al., 2006). Isto representa um avanço da perspectiva que o HIL é responsável pela eliminação de falhas sistêmicas no momento de desenvolvimento do projeto. Como isto já é alcançado com o HIL 1.0. O HIL 2.0 possibilita a redução de falhas randômicas. Porque a plataforma executa os CT em sequências diferentes, as falhas que poderiam emergir por conta de uma ordem em particular são eliminadas.

Conforme já comentado, a natureza do produto desenvolvido abre espaço para eventos infortunos. Por este motivo, garantir a segurança do maquinário quanto ao seu bom funcionamento e à saúde do operador possui grande importância. Todos os elementos V&V devem observar as melhores práticas da indústria, conforme às técnicas de Segurança Funcional (SF).

### 2.1.6 SEGURANÇA FUNCIONAL

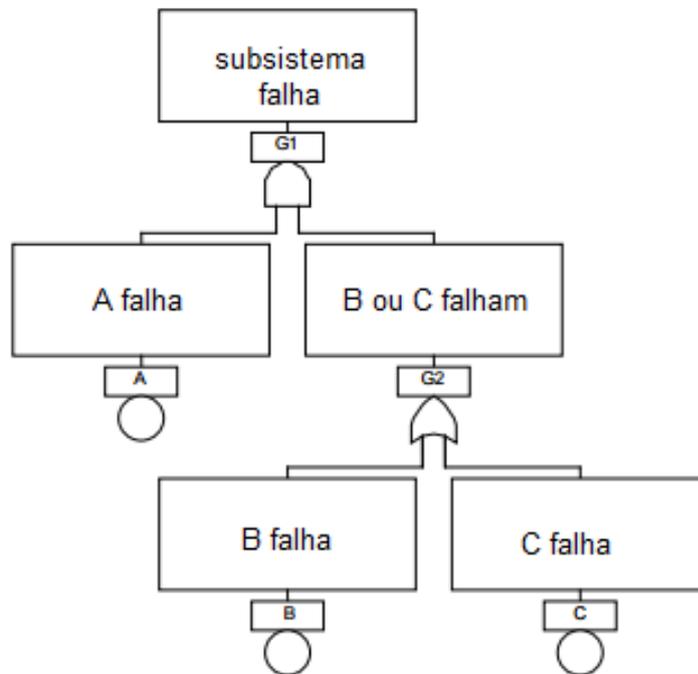
Todos os produtos que apresentam um grau de risco (*risk*) ou perigo (*hazard*) devem conter métodos de mitigação ou eliminação dos mesmos em seus projetos (*safety related*). Esta lei é aplicável para todas as áreas da engenharia. Adicionalmente, a eletrônica, vanguarda da arte, propõe normatização importantes para técnicas aplicadas nas áreas de automatização industrial, automotiva e equipamentos agrícolas e florestais. Dentro destas normas, a ISO25119: Tractors and machinery for agriculture and forestry: Safety-related parts of control systems (2010) e também ISO26262: Road vehicles Functional Safety (2009), definem SF como a "ausência de risco irrazoável devido a perigo causado pelo mau funcionamento do sistema eletroeletrônico."(ISO26262: ROAD VEHICLES FUNCTIONAL SAFETY, 2009).

O conteúdo destas normas propõe ferramentas conceituadas como *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) que contém *Fault Tree Analysis* (FTA), *Event Tree Analysis* (ETA), que para

*Hazard Assesment and Risk Analysis* (HARA). Estes conceitos são porém, mais antigos que as próprias normas e procuram evidenciar boas práticas de gerenciamento de projeto a fim de garantir um produto tecnicamente seguro (SMITH; SIMPSON, 2004). Um número grande de ferramentas são de conhecimento do estudo de análise de riscos. Porém, em uso geral, as ferramentas citadas acima são as mais conhecidas e terão foco nos próximos parágrafos.

Em uma primeira etapa, o conceito do sistema, dividido em subsistemas. A cada subsistema, uma análise detalhada da severidade de um modo de falha e sua respectiva probabilidade é contabilizada. O risco resultante é então classificado dentre um *Agricultural Performance Level* (AgPL), que servirá como requisito de aprovação do subsistema. Em seguida, a FTA é capaz de analisar indutivamente as causas dos riscos, indicando o que os ocasionam.

**Figura 4:** Exemplo FTA simples



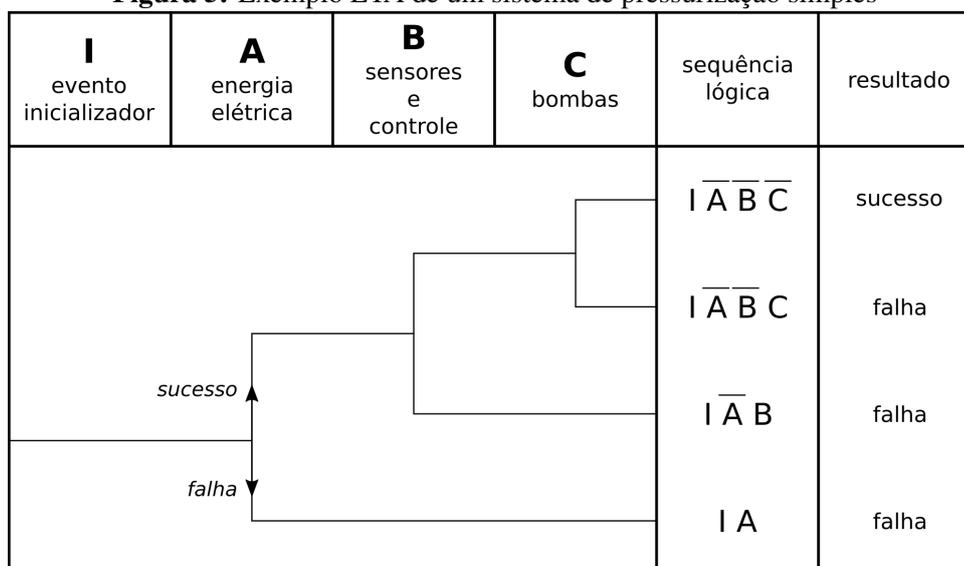
Fonte: Adaptado de (NASA, 2002).

Para o exemplo da Figura 4, a probabilidade de falha  $PF$  é dada por:

$$PF(G2) = PF(B) + PF(C)$$

$$PF(G1) = PF(A) \cdot PF(G2)$$

Inversamente ao FTA, o ETA possui uma abordagem dedutiva. Esta ferramenta, analisa o cronologicamente, em que uma falha de componente impacta no subsistema. Um exemplo de aplicação é exposto em Figura 5.

**Figura 5:** Exemplo ETA de um sistema de pressurização simples

Fonte: Adaptado de (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVTSOV, 2016).

Desta maneira, é possível deduzir de forma similar a probabilidade de falha resultante, com base da confiabilidade  $R$  do evento, tal que  $R(\text{evento}) = 1 - PF(\text{evento})$ .

$$PF(\text{resultado}) = PF(A) + PF(A) \cdot R(B) + PF(A) \cdot PF(B) \cdot R(C) + PF(A) \cdot PF(B) \cdot PF(C)$$

Esta análise avançada do subsistema fornece ao projetista do HW e/ou SW, detalhes sobre a fragilidades de segurança inerente do projeto. Aliado deste conhecimento, técnicas podem ser aplicadas para a mitigação ou eliminação dos riscos.

Com o HW e SW planejados, dá-se início à análise da probabilidade de falhas do subsistema conforme a descrição do FTA/ETA. Para o cálculo de falhas, cada componente deve possuir uma base de dados real. Como exemplo, ocorrências de falha em campo de produtos, ocorrências de peças de garantia. Caso uma base de dados como tal não estiver disponível por implementação recente da SF no modelo de desenvolvimento da empresa, a experiência de engenharia é fator determinante de um valor numérico (ISO26262: ROAD VEHICLES FUNCTIONAL SAFETY, 2009). Caso a meta AgPL não for atingida, um número de interações são tomadas até o alcance do objetivo de segurança especificado.

Uma vez que interações suficientes são realizadas, segundo o Modelo V, o projeto deve ser testado em plataformas de teste adequadas como a MIL, SwIL e HIL. Somente com a aprovação do Engenheiro de Testes e a documentação FMEA completa, deve o primeiro protótipo ser montado para a validação em campo. O projeto V&V como protótipo, é apto para a produção com a máxima segurança, como é requisito para o subsistema do motor eletrônico.

### 2.1.7 MOTOR ELETRÔNICO

Por definição, veículos autopropelidos são dotados de uma fonte de locomoção. Tipicamente, em uma máquina agrícola autopropelida, motores de combustão interna a diesel são empregados. Como qualquer outro tipo de motor, estes possuem variáveis a serem controladas em operação. Em carros, por exemplo, a velocidade é a variável regulada. Simplificadamente, o controle de velocidade é feito gerenciando a entrada da mistura combustível/oxigênio. Historicamente, este tipo de controle foi feito por um regulador (*governor*) mecânico (BLOCK, 1954).

Atualmente, restrições legais são impostas para estipular o nível máximo de poluição gerada por um motor de combustão de uma classe (potência) específica na Europa e nos Estados Unidos. No Brasil, recentemente o Conselho Nacional do Meio Ambiente do Ministério do Meio Ambiente impõe restrição de poluição do sonora e do ar para máquinas agrícolas e rodoviárias pela resolução CONAMA (2011), MAR-I (Máquinas Agrícolas e Rodoviárias - Fase 1). É conhecido como Tier III o motor que se adequa à norma americana de emissões de poluentes, equivalente àquela em vigor no Brasil. Segundo ANFAVEA (2016), algumas tecnologias vão de encontro à redução de emissões de partículas e de óxidos nitrogenados, que, ao mesmo tempo, melhoram o desempenho do motor. Entre elas, toma-se interesse no Controle Eletrônico de Injeção.

O motor controlado eletronicamente, comumente chamado de Motor Eletrônico, possui outras vantagens, como (MENDONCA et al., 2017):

- Maior diagnóstico de variáveis do motor, como velocidade de giro, pressão do pistão, temperatura do motor, fluxo de óleo, entre outros;
- Diagnóstico digital em tempo real do veículo;
- Configurabilidade de parâmetros ou perfis (SW).

Para o tanto, uma ECU especializada é empregada exclusivamente para o controle do motor.

Tendo observado todos os conceitos básicos relevantes ao projeto, analisa-se o estado tecnológico atual. Um resumo de trabalhos relevantes será apresentado na seção seguinte.

## 2.2 ESTADO DA ARTE

Conforme discutido anteriormente, SF e simulações *X-In-the-Loop* estão intrinsecamente ligados. Em particular, a plataforma HIL obtém espaço incontornável na indústria *safety related*. Pois o HIL faz parte obrigatória do desenvolvimento de um projeto, conforme as ISO25119 (SF agrícola) e ISO26262 (SF automotiva); e o Modelo V. Os seguintes trabalhos selecionados apresentam o que há de ponta na indústria atual sobre os temas de automatização de ensaios, HIL e SF. Dá-se ênfase nos resultados obtidos graças à aplicação destas técnicas.

Para fins de evitar desentendimento, faz-se necessário neste parágrafo definir alguns termos técnicos que serão referenciados no resto do texto:

- Produto: Produto final do projeto sendo desenvolvido. Exemplo: Trator;
- Plataforma: Sistema ou conceito cuja finalidade é servir de ferramenta para estudo de outro sistema. Exemplo: HIL;
- Sistema: Conjunto de subsistemas que, em coesão, formam um mecanismo autogerenciado, capaz de realizar funções definidas. Exemplo: Carro;
- Subsistema: Qualquer parte de um sistema ou subsistema que possua uma finalidade específica, sinal de entrada e sinal ou função de saída e seja composto por mais que um componente. Exemplo: freio eletrônico (*break-by-wire*);
- Componente: Parte de um sistema ou subsistema que possua sinal de entrada e sinal de saída - sinônimo de *Device*. Exemplo: ECU;
- Módulo: Qualquer subsistema fisicamente removível do sistema, o qual venha a compô-lo em quantidade dependente da configuração do sistema. Exemplo: Cartão de saída analógica (AO) de um chassis de instrumentação.

Sistemas automotivos controlados eletronicamente, conhecidos como *X-by-Wire* estão se tornando cada vez mais comuns, substituindo funções críticas (*safety critical*) do veículo a cada passo. A complexidade do sistema faz com que a norma ISO26262 seja de vital importância para o projeto do sistema a prova de falhas. Leu et al. (2015) apresentam um sistema *Brake-by-Wire* inteligente para carros. Os autores propõem que o sistema de freio inteligente possa ser comandado por uma ECU, com base em dados provenientes de sensores de distância frontal, velocímetro e pedal do operador. A informação obtida pelo radar é considerada para o acionamento do freio em modo de emergência com o propósito de evitar uma colisão frontal. O sistema é analisado conforme as técnicas HARA, ETA, FTE e FMEA conforme a norma vigente a fim de identificar fraquezas do sistema. Usando dados gerados pelos autores, eles demonstram como a metodologia de SF categoriza o sistema em um nível de segurança mandatório. Uma sugestão de modificação no sistema é dada como exemplo, para que o sistema atinja a meta especificada.

Verificação funcional é um ponto importante na verificação global do projeto. Raut, Tade e Jadhav (2016) consideram os resultados de um HIL implementado sobre a ECU de motor, para a verificação do algoritmo *Engine Warmup*. Este algoritmo é responsável por limitar a velocidade e o torque do motor ao partí-lo, até que as pressões de óleo e líquido arrefecedor pré-definidas são atingidas. Caso este procedimento falhar, gasto e envelhecimento prematuro do motor podem ocorrer. Os resultados positivos apresentados pelos autores reafirmam que plataforma HIL é adequada para um testes estáticos, reproduzíveis e fiéis.

A indústria de maquinário agrícola, também investe em plataformas HIL para a V&V do produto. Kelber, Reis e Figueiredo (2016) propõem uma plataforma HIL de uma colheitadeira híbrida. Contrariamente a testes de carro, uma colheitadeira é maior e possui funções específicas de sua operação, além das funções do motor. Isso resulta em um sistema mais complexo, com mais sensores. Os autores estressam que o sistema é capaz de eliminar todos os erros sistemáticos de SW, capacitando a máquina para o teste no campo. Com uma janela curta de teste de campo, é importante que a máquina não seja impedida de colher por um erro previsível em laboratório. Não obstante, a ausência de erros no produto é bem vista pelo cliente. O texto também afirma que o sistema desenvolvido possui vantagens como repetibilidade, cobertura de testes garantida, viabilidade econômica, tempo de teste reduzido e mitigação dos riscos.

A implementação de CT de uma linguagem natural para uma linguagem de programação é um passo fundamental para a automatização de testes. Este tema é estudado por Han, Son e Cho (2013) para uma rede de veículo inteligente, que contém ECUs e sensores interligados. Os autores buscam implementar os testes em uma metodologia baseada em modelo. E encontram em seu estudo de caso motivos para o uso de Máquina de Estados Finitos (MEF) para concretizar seus testes. A melhor metodologia de cobertura de teste é ponderada, com o dilema entre cobertura/confiabilidade e Tempo de Teste (TT) no foco. Pois, a taxa de falhas obtidas por segundo é muito maior no início do teste que ao final, o valor intelectual obtido ao deixar o teste rodando por um tempo oneroso não compensa o custo em TT. O texto confirma que a automatização aumenta a cobertura de testes e minimiza CT, ainda aumentando a rastreabilidade de teste.

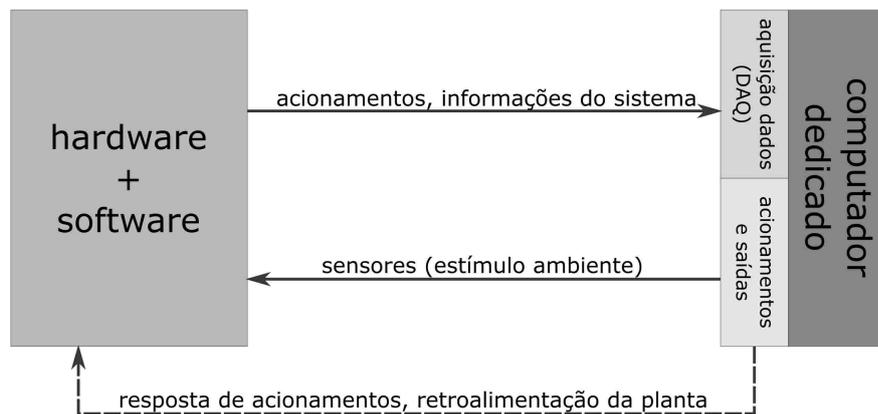
A tendência da indústria é procurar simulações mais fiéis, automatizadas e com relatório de resultados automático. Pesquisadores da Universidade de Pannonia (Hungria) e do laboratório da Continental Automotiva Hungria Enisz et al. (2014) desenvolveram em cooperação uma plataforma HIL adaptável, reconfigurável, para a simulação de veículo de estrada. A parte automotiva testada nesta plataforma (ECU, Unidade de Controle Hidráulico, ECU ABS) interage com uma simulação virtual de veículo dinâmico (veDyna), que determina sinais de sensores simulados a serem realimentados ao *Device Under Test* (DUT). A simulação do veículo dinâmico veDyna possui um perfil de estrada que o carro deverá seguir. Este perfil contém relevo do terreno, obstáculos e outros carros simulados interagindo no mesmo ambiente. O sistema também possui uma unidade de inserção de falhas eletrônicas para o teste de confiabilidade. O teste pode ser reconfigurável para se adaptar aos CT do DUT. O gerenciador do teste também é capaz de gerar relatório de resultados automático. CT para a V&V de uma ECU de freio comercial foram executados e os resultados de acordo com o esperado. A plataforma demonstrou-se ser flexível e de fácil aprendizado.

## 2.3 PESQUISA DE MERCADO

Por conta do HIL ser uma plataforma consagrada no mercado, algumas soluções são comercializadas. Estas soluções são produtos que visam, de modo geral, oferecer ferramentas padrões usadas neste tipo de simulação. As quais intrinsecamente desconsideram a especificidade de cada máquina simulada. Esta seção apresenta e discute algumas destas utilidades. Por fim, uma análise comparativa de cada solução em relação ao projeto proposto será feita.

Conforme visto previamente, o HIL é composto por duas partes: o HW com SW de máquina e o HW com SW para simulação. Sendo este último uma subsistema que possui como finalidade a simulação do ambiente e de reação do ambiente em relação à máquina. O qual é implementado com a substituição de sensores pelo interfaceamento com este subsistema (Figura 6).

**Figura 6:** Conceito simulação HIL  
*Conceito HIL*



Fonte: Autor.

As soluções comerciais analisadas são classificadas em duas: *SW Application Programming Interface* (API) para o desenvolvimento da automatização; e HW para excussão da simulação. Em todos os casos, a fabricante do HW visa o uso do seu produto com uma integração facilitada para um SW específico. Por mais que a integração de HW e SW de diferentes fabricantes seja realizável, esta pode ser dificultada. Alguns exemplos de soluções são apresentadas a seguir.

A marca Speedgoat possui soluções de HW específica para simulações HIL, entre outras aplicações. Seu chassis “*Performance*” (Figura 7), é uma ferramenta versátil de tempo real, que permite a excussão da simulação em seu processador interno em alta velocidade. Esta simulação é programada e administrada pelo programa Matlab Simulink, que permite a interação virtual com o usuário. Além de fornecer este chassis, a Speedgoat propõe *racks* versáteis para a montagem da plataforma HIL.

Não diferente da sua concorrente, dSPACE fornece chassis de diferentes tamanhos e com especialidades diferentes para simulações HIL completas. Adicionalmente, a empresa fornece SW gestor de testes, SW gerador de modelos matemáticos, SW de automatização de teste, entre

**Figura 7:** Chassis Performance

Fonte: (Speedgoat, 2017).

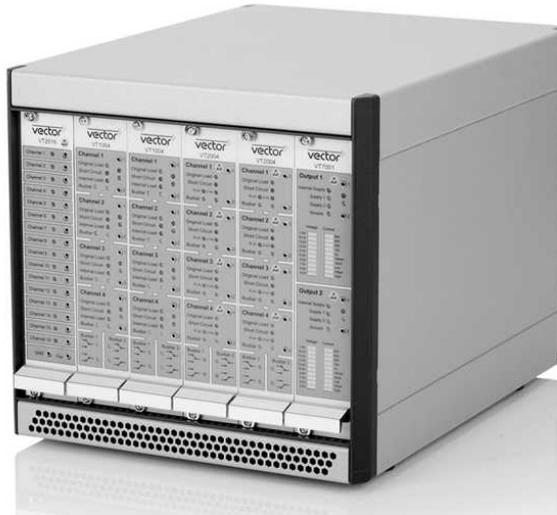
outros. A implementação em HW é simplificada com um *rack* pré-montado para às necessidades do cliente, como mostra a Figura 8.

**Figura 8:** Chassis SCALEXIO

Fonte: (dSPACE, 2017).

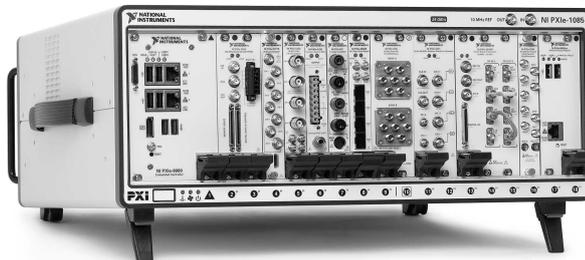
Vector Informatik é consagrada por ferramentas de análise de rede *Controller Area Network* (CAN) em tempo real: CANoe e CANalyser. A marca também possui um *chassis* modular para a excussão da plataforma HIL (Figura 9). O conceito proposto mistura funcionalidades previamente mencionadas com o sistema operacional em tempo real. Este SW possui a particularidade de ser voltado a veículos autônomos, apresentando assim, uma série de facilidades para a aplicação neste contexto.

Um destaque entre as outras marcas, é a National Instruments, com renome no mercado. A empresa conta com o SW LabVIEW, que possui notoriedade de ser uma ferramenta largamente utilizada. Em outro, National Instruments conta com uma variedade de chassis, de classes diferentes, comumente para aplicações não específicas (exemplo Figura 10). Estes produtos não são projetados para plataformas HIL, porém bem utilizado com este propósito. Uma série de cartões para seus chassis e chassis de expansão estão disponíveis para as mais variadas medições de grandezas físicas. Entretanto, a marca não disponibiliza *racks* pré-montados. Outrossim, estes chassis são configurados para funcionar com os próprios SW da empresa, LabVIEW,

**Figura 9:** Chassis Vector

Fonte: (Vector Informatik, 2017).

VeriStand e TestStand. Sendo o VeriStand um gestor de teste, com uma tela interativa para o usuário. E o TestStand; um automatizador de teste.

**Figura 10:** Chassis NI PXIe-8880

Fonte: (National Instruments, 2017).

A presente, por conta de sua repercussão e qualidade, estas são as soluções mais divulgadas no mercado. No entanto, todos os casos de uso requerem que a metodologia de teste seja implementada. Sendo que esta varia com o produto a ser testado. Resumidamente, estas soluções buscam facilitar o desenvolvimento do sistema HIL, com base em suas funcionalidades comuns. Neste aspecto, este presente documento não se atentará a implementação do HW de instrumentação para HIL. Porém, à **metodologia** de teste e à **arquitetura** do HW HIL em si. A metodologia de teste implementada será para máquinas agrícolas autônomas, com base na automatização de CT - o quê não há registro de ter sido feito.



### 3 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta itens que compõem a metodologia do sistema proposto. Conceitos, métodos, arquitetura, topologia e fluxogramas serão descritos para a especificação do sistema. Documentos relativos ao planejamento serão expostos neste mesmo capítulo assim como no apêndice.

Fundamental para este projeto reafirmar, que este não se consagra à execução de um único HIL, porém à metodologia de desenvolvimento HIL. Não obstante, vê-se a necessidade de validação do conceito proposto. Conseqüentemente, a metodologia é aplicada para um caso específico e a validação do conceito é feita a partir de métricas. Logo, analisar-se-á um detalhamento do sistema proposto genérico. Que sempre será seguido do detalhamento do estudo de caso proposto, que se enquadre na generalização.

#### 3.1 REQUISITOS

A partir das definições dadas no capítulo de Revisão Bibliográfica, são especificados como pilares do sistema HIL proposto:

- **Automatização:** O sistema deve ser automatizado, conforme visto na seção de automatização;
- **Modularização:** O sistema deve ser inteiramente composto por módulos, exceto pelo Simulador de Máquina (SM) - a ser visto a próxima seção;
- **Configurável:** O sistema deve ser capaz de assumir diferentes configurações para diferentes perfis de teste;
- **Testabilidade:** O sistema deve ser capaz de realizar testes funcionais e avaliar todas as características de segurança descritas na norma ISO25119.

O projeto consiste então na realização tanto do HW quanto à aplicação de simulação: Aplicação Gerenciadora de Casos de Teste (AGCT). A AGCT consistirá em uma programação executável capaz de

- Ser autossuficiente no gerenciamento da simulação;
- Ser automatizada;
- Interpretar sinais oriundos do módulo;
- Gerar estímulos para o simulador;
- Controlar o CT a ser aplicado;

- Interpretar o resultado do CT;
- Apresentar resultados da simulação ao usuário;
- Ser dispensável para simulação (modo de controle manual).

É importante que o AGCT também funcione de maneira modular e configurável, em acordo com as especificação acima. Pois, diferentes cenários poderão ser criados para diferentes simulações. Logo, mostra-se o interesse ao desenvolvimento de uma biblioteca de CT. Adicionalmente, para fins de validação do projeto, um cenário completo de CT deve ser desenvolvido para cada módulo. Eventualmente, em uma simulação de múltiplos módulos integrados, o novo cenário completo de CT deve conter todos os CT de cada módulo juntos. Em certos casos, é de interesse que o usuário tenha o controle do teste, podendo assim fazer acionamentos e desabilitações manualmente. No entanto, este trabalho foca-se na automatização e seus benefícios tendo então ênfase.

Por o HIL proposto ser especificado como configurável, este interdita que o presente trabalho estude a construção de um único HIL ou módulos de HIL. Logo, é realçado que a construção do HW de simulação (HIL em si), nem a aplicação que substituirá o operador são o objeto de estudo deste empreendimento. Contudo, faz-se necessária a descrição do Estudo de Caso, pois este afetará profundamente a lógica de funcionamento de simulação.

### 3.1.1 REQUISITOS DO ESTUDO DE CASO

O Estudo de Caso proposto consiste na aplicação da metodologia em um Módulo HIL da ECU do motor eletrônico: Módulo Tier III. São requisitos específicos do Estudo de Caso:

- Conter a ECU do motor Tier III;
- Conter todo o HW necessário para simulação de CT de operação do motor Tier III;
- Possibilitar interfaceamento com outros módulos;
- Ser diagnosticável;
- Ser controlável em tempo real por um simulador de CT;
- Ser capaz de simular todos as condições de operação real do motor.

Com base nos requisitos do projeto (Estudo de Caso), coerentes com os da metodologia proposta, atenta-se ao método que permitirá o alcance do objetivo.

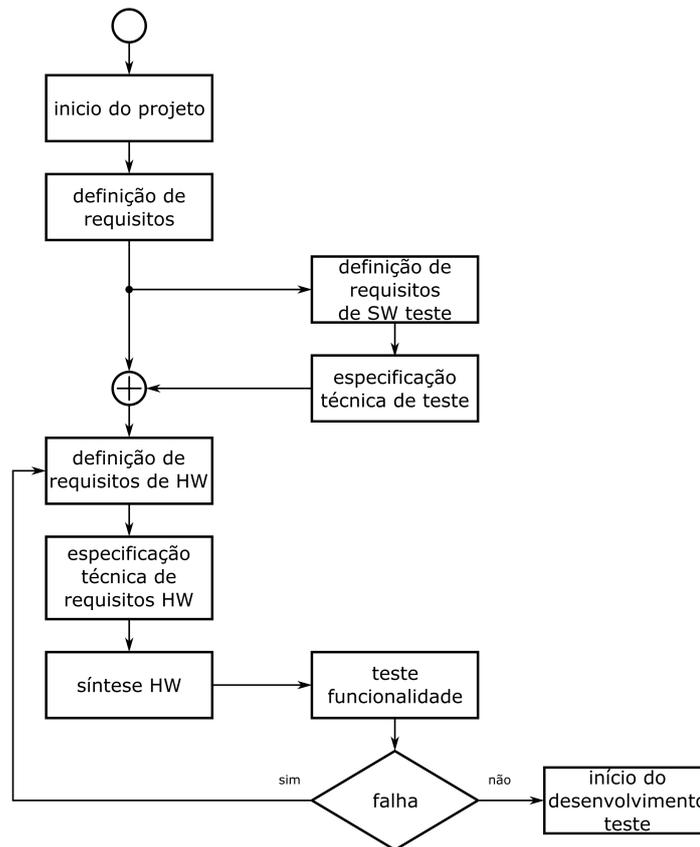
### 3.2 MÉTODO

Afim de respeitar as especificações propostas, um modelo de desenvolvimento de projeto e de teste é proposto. Os modelos das figuras 17 e 18 na seção Apêndice se baseiam no Modelo V apresentado na Revisão Bibliográfica.

#### 3.2.1 MÉTODO DO ESTUDO DE CASO

O desenvolvimento do HW do Módulo Tier III deverá ser coerente com a descrição da Figura 17. Abaixo é representado o fluxo de desenvolvimento do Módulo (Figura 11).

**Figura 11:** Desenvolvimento do HW Módulo Tier III  
*Modelo de Desenvolvimento de HW Estudo de Caso*



Fonte: Autor.

Quanto à definição de requisitos de HW, observa-se os sinais de saída e entrada da ECU. Estes sinais arbitram ao projeto quais as funcionalidades do DUT. Conseqüentemente, é deduzido o conteúdo do desenvolvimento de teste. Assim, toda a parte do sistema real que possa ser incorporado no módulo é feito. Os sinais simulados devem ser disponibilizados por um chicote elétrico na saída do módulo. Com base no HW, os CT e a AGCT do sistema proposto será desenvolvida.

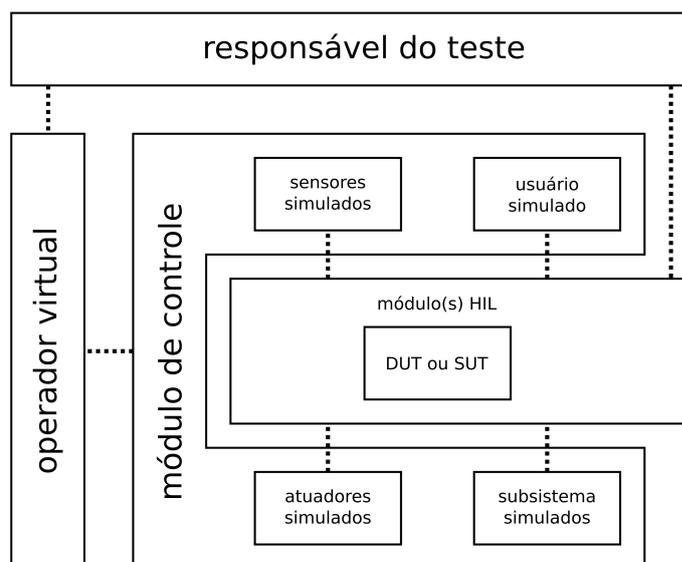
### 3.3 SISTEMA PROPOSTO

Embasado no estado da arte atual exposto na seção respectiva, no conceito de automatização e na especificação do sistema HIL proposto nos parágrafos acima, observa-se um aspecto do HW que guia a estrutura do sistema. É este fundamental para o objetivo almejado: a substituição do operador. A qual será sintetizada por um Operador Virtual (OV), implementado em SW, atendendo às necessidades de conexões elétricas para a tal.

Em um HIL 1.0 (manual), o responsável do teste é a pessoa encarregada por introduzir falhas no sistemas, operar a máquina virtual, gerenciar o teste e interpretar os resultados. Não diferente deste operador, o OV adquire as mesmas funções. Consiste este da coletânea dos componentes que substituem o operador real. Na representação da Figura 12, pode-se observar o OV como a parte do SW contido dentro do Simulador de Máquina (SM) que é responsável pela sequência dos CT.

**Figura 12:** Representação do conceito HIL automatizado

*Conceito Modelo de Testes HIL 2.0*

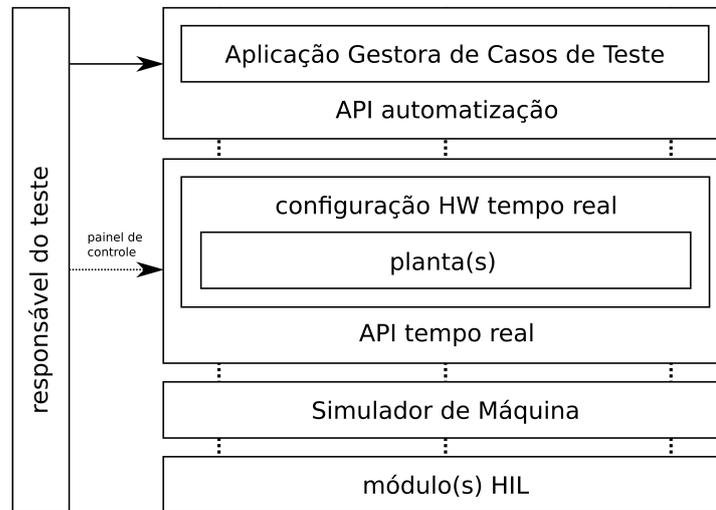


Fonte: Autor.

Outro laço que é completado pela OV, é a de leitura da reação do DUT ou *System Under Test* (SUT). Pois, para uma sequência automática de CT, o sistema deve saber apontar a falha e suspender o teste. Com o teste suspenso, a pessoa responsável será induzida a investigar o que ocasionou a falha, com base nos dados do OV no momento da falha. A gestão do teste será feita pelo mesmo software do OV e executado conforme a Figura 19 apresentada em Apêndice.

Esta AGCT é desenvolvida e executada dentro da *Application Programming Interface* (API) de automatização. Que por sua vez se comunica com a configuração do HW de tempo real (SM) até gerar para ou ler excitações do HIL. A estrutura de excussão é apresentada na Figura 13.

**Figura 13:** Estrutura de execução  
*Hierarquia de Execução*



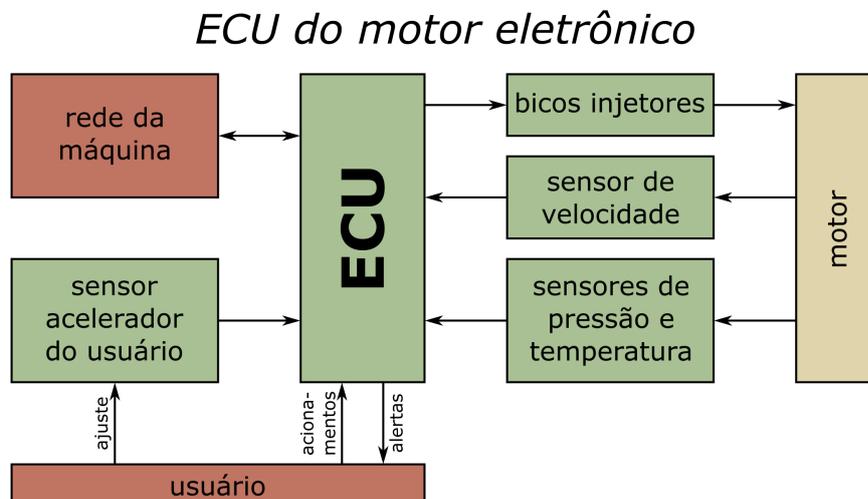
Fonte: Autor.

Os modelos de planta são desenvolvidos à parte em um SW especializado. Estes não são o foco deste trabalho, porém exercem um papel relevante no funcionamento da simulação.

### 3.3.1 ESTUDO DE CASO

O Estudo de Caso do Módulo Tier III consistirá principalmente na ECU do motor. Tal componente possui resumidamente entradas analógicas e digitais de sensores, entradas analógicas de usuário, acionamentos analógicos dos bicos injetores (carga). Simplificadamente, o subsistema pode ser representado conforme a Figura 14.

**Figura 14:** Simplificação das funcionalidades da ECU do motor eletrônico



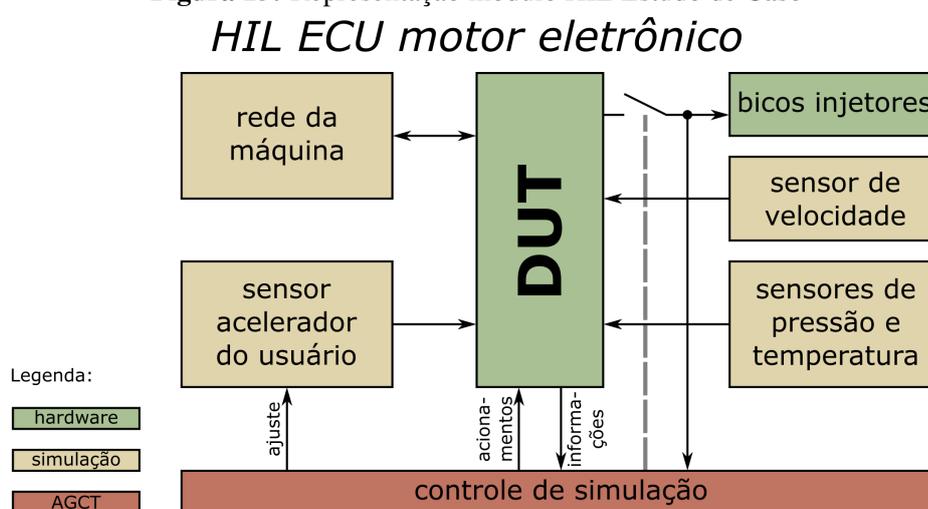
Fonte: Autor.

Cada componente apresentado na ilustração é obrigatório para o funcionamento do motor. Resumidamente-se são descritos:

- **Sensor de velocidade:** Transdutor que identifica velocidade de rotação do motor e gera sinal elétrico na saída. Este sinal é de forma definida e periódico. Sua fase instantânea é um múltiplo inteiro do ângulo do virabrequim. Logo, sua frequência está atrelada à frequência de rotação do motor.
- **Sensor acelerador do usuário:** Transdutor que lê o ajuste da velocidade do motor feita manualmente pelo usuário. Tipicamente, este sensor é um potenciômetro que envia um valor em tensão proporcional ao ajuste. No entanto, este mesmo sinal pode ser lido por uma terceira ECU e enviada em forma de mensagem CAN para o DUT.
- **Bico injetor:** Componente que permite ou bloqueia a passagem de combustível para o cilindro do motor. É constituído por um corpo rígido (que suporta a pressão do combustível) e uma bobina que controla por força magnética uma peça móvel interna. Este dispositivo é acionado por corrente elétrica. A quantidade de combustível injetado é proporcional com o tempo de acionamento do componente.
- **Motor:** Neste contexto deve ser entendido como “motor” o componente mecânico central do subsistema. Pois, a análise de funcionalidade do subsistema depende de sua saída: a velocidade de rotação. Dentro desta peça é encaixada um conjunto de bicos injetores, que inserem combustível dentro dos cilindros. Em um motor ligado, o cilindro respectivo é comprimido e, como consequência, o diesel explode gerando trabalho. Em um exame, duas observações podem ser feitas: o motor precisa estar em rotação para o combustível ter efeito sobre a rotação do mesmo, pois o combustível precisa ser comprimido para ignição; a quantidade de diesel presente do cilindro é correlata a quantidade de trabalho realizado na ignição.
- **Sensores de pressão e temperatura:** São sensores acoplado em diversas partes do motor principalmente por questões de segurança. Como exemplo, tem-se o sensor de pressão do fluido refrigerante ou o sensor de temperatura do mesmo. Pois, caso o fluido não estiver em condições normais de pressão e temperatura, peças mecânicas do motor serão destruídas.
- **Rede da máquina:** Comunicação com o restante da máquina é importante não somente para um diagnóstico em tempo real do sistema, como necessária por questões de segurança. Caso a ECU não envie nenhuma mensagem durante um tempo definido, servirá como evidência da falha da mesma. Ainda mais, existem sensores chamados inteligentes que fazem o processamento do dado internamente e comunicam a informação de interesse via rede.

O módulo desenvolvido, seguindo suas especificações deve ter conectado os bicos injetores, pois são suas cargas reais. O módulo também deve ser capaz de desconectar as cargas da ECU. Sinais de sensores de velocidade do motor, pressão e temperatura, entre outros também devem ser simulados. A reprodução da forma de onda destes sensores em geral se dá a partir de uma análise do funcionamento do mesmo com o osciloscópio e pela documentação do fabricante. A rede da máquina será monitorada para que a AGCT possa interpretar mensagens oriundas do DUT. Uma representação das funcionalidades do módulo HIL do Estudo de Caso é apresentada na Figura 15.

**Figura 15:** Representação módulo HIL Estudo de Caso



Fonte: Autor.

A complexidade do DUT correlaciona a uma grande complexidade de simulação, tanto em HW, SW e API. Esta também significa muitos requisitos de SF a serem atendidos - por consequência testados. Assim, este trabalho irá analisar somente parte dos riscos em potenciais para o sistema - o que servirá como prova do conceito. A aplicabilidade do módulo deverá tornar-se evidente através deste detalhamento.

Cada dispositivo considerado neste subsistema possui um potencial para falha, o que cria riscos inadmissíveis. Não somente o componente pode falhar, porém esta falha pode causar uma falha local (subsistema) ou global (sistema). Como exemplo, caso um bico injetor falhar, seu cilindro respectivo não irá mais gerar potência - significando potência reduzida ou pior. Para persistir com funcionamento seguro da máquina, medidas devem ser tomadas pela ECU. Tem-se como objetivo então, analisar possíveis modos de falhas de cada componente constituinte do subsistema. Uma amostra desta análise é apresentada no extrato da HARA (Quadro 3) na seção de Apêndice.

Conforme a metodologia de SF, mecanismos de mitigação de riscos devem ser impostos. Estes mecanismos se encontram nas colunas de justificativa. Percebe-se que para o sistema manter situação de controle as justificativas de severidade, exposição e controlabilidade devem

ser mantidas. A partir dos itens descritos, casos de testes devem ser desenvolvidos. Para este exemplo, são estes apresentados na Quadro 1 a seguir.

**Quadro 1:** Casos de Teste desenvolvidos para o subsistema em análise

FUNÇÃO	ID	CASO DE TESTE
Sensor de temperatura do líquido refrigerante	1	Tensão abaixo do normal
	2	Tensão acima do normal
	3	Temperatura acima do normal
	4	Temperatura alta
Sensor de temperatura do combustível	5	Tensão abaixo do normal
	6	Tensão acima do normal
	7	Temperatura alta
Sensor de pressão do óleo	8	Tensão abaixo do normal
	9	Tensão acima do normal
	10	Pressão acima do normal
	11	Pressão abaixo do normal
	12	Pressão baixa
Sensor de pressão do turbocompressor	13	Tensão abaixo do normal
	14	Tensão acima do normal
	15	Pressão baixa
Sensor de pressão da linha injetora	16	Tensão abaixo do normal
	17	Tensão acima do normal
Sensor detector de água no combustível	18	Água no combustível
Sensor do acelerador	19	Tensão abaixo do normal
	20	Tensão acima do normal
Bico injetor	21	Bico injetor 1 desconectado
	22	Bico injetor 2 desconectado
	23	Bico injetor 3 desconectado
	24	Bico injetor 4 desconectado
	25	Bico injetor 5 desconectado
	26	Bico injetor 6 desconectado

Fonte: Autor.

Neste momento cabe ter conhecimento do material a ser utilizado, o que não será afetado com possíveis mudanças futuras.

### 3.4 MATERIAIS

Por definição, o sistema HIL necessita do HW e SW do produto e uma instrumentação para a simulação de estímulos do usuário, ambiente e partes mecânicas do produto. A parte que se encarregará deste retorno de informação para a plataforma é chamada de Simulador de Máquina (SM). Este SM deverá rodar o programa AGCT, o qual é sintetizado a partir de um SW especializado. Adicionalmente, para criar os CT, se faz necessário de outro SW para a criação de plantas simuladas.

Outro aspecto a ser considerado é o HIL em si, que será modular conforme o especificado. Além de conter parte HW do produto, deve haver um meio físico para organizá-lo e suportado mecanicamente. Chicotes elétricos deverão fazer a comunicação entre SM e módulo HIL. Alguns outros materiais variam com a aplicação e devem ser previstos no projeto do módulo em si.

### 3.4.1 MATERIAIS DO ESTUDO DE CASO

Os materiais essenciais para a construção do Módulo Tier III podem ser sintetizados na lista abaixo.

- Chicotes elétricos para ligação entre módulos;
- MS;
- ECU motor eletrônico;
- Bicos injetores (carga);
- Relés para o chaveamento das cargas;
- Estrutura física para a montagem e instalação do módulo;
- Fonte de alimentação compatível;
- API de automatização;
- SW para criação de plantas matemáticas simuladas;
- API de tempo real.

A fim de avaliar o sucesso do projeto, conforme as ilustrações acima, é necessária a estimulação de métricas.

## 3.5 MÉTRICA

Esta subseção se dedica à acertação de métricas para ponderação do sucesso do projeto. Quanto ao projeto do sucesso, não significa se o projeto sucedeu em sua construção ou especificação. Porém, ao sucesso da contribuição do projeto para o cliente (empresa, corporação, equipe, *etc*).

As métricas propostas devem servir de forma a contribuir para o projeto da máquina agrícola desenvolvida. Consequentemente, aspectos ligados à segurança e à SF serão instrumentais. O Modelo V de desenvolvimento de projeto explicita a necessidade de documentação de projeto antes de testes (HIL). Estes, especificamente, o HARA, será a ferramenta de validação. De acordo com o requisito testabilidade especificada acima, aspectos relacionados a norma ISO25119 são testáveis. Logo o HARA é aplicável. Esta é preenchida conforme a Quadro 3 presente no capítulo de Apêndice.

Outra métrica usada é o potencial retorno financeiro. Contudo, qualquer estimativa em moeda é não-divulgável. Claramente, este retorno financeiro é indiretamente aconteado tanto nos testes relacionados ou não ao desenvolvimento do projeto da máquina agrícola. Evidencia-se

então, uma variável de sucesso do projeto qualitativa: a contribuição do projeto para a produção do produto da corporação. Resumidamente, são métricas do projeto:

- Quantitativa
  - Aumento da quantidade de itens de SF validáveis;
  - Redução de HH;
  - Redução do tempo de duração do teste.
- Qualitativa
  - Resultado da validação de itens do HARA;
  - Contribuição para o desenvolvimento do projeto: informações técnicas sobre o sistema, limitações e falhas de projeto;
  - Diminuição de defeitos em campo;
  - Diminuição de ocorrências de garantia;
  - Satisfação do cliente final;
  - Confiabilidade: capacidade do sistema de sofrer falhas sem comprometer suas funções críticas.

Para uma avaliação do sucesso em números do sistema proposto, é possível sugerir propostas de quantificações de algumas das métricas. Para o capítulo de Análise de Resultados, serão utilizadas as expressões simbólicas a seguir.

$$M_1 = \frac{\text{Total de CT reproduzíveis em HIL}}{\text{Total de CT reproduzíveis em campo}} \quad (3.1)$$

$$M_2 = \frac{\text{Média da velocidade de execução de CT com HIL}}{\text{Estimativa da média da velocidade de execução de CT em campo}} \quad (3.2)$$

$$M_3 = \frac{\text{Tempo de preparação para execução de bateria de testes com HIL}}{\text{Estimativa de tempo de preparação para execução de bateria de testes em campo}} \quad (3.3)$$

$$M_4 = \frac{\text{Quantidade de pessoas envolvidas na execução de bateria de testes com HIL}}{\text{Estimativa da quantidade de pessoas envolvidas na execução de bateria de testes em campo}} \quad (3.4)$$

Sendo:

- Todos os valores obtidos são adimensionais;
- Somente são consideradas como pessoas envolvidas os engenheiros de teste;
- Os valores calculados são relacionados com a redução de custos para a execução dos CT.

Também será feita uma análise dos CT executados e seus respectivos resultados.

## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo apresenta resultados práticos decorrentes do emprego da metodologia proposta. Estes resultados são uma amostra da potencialidade do sistema desenvolvido, examinados através da aplicação do módulo do Estudo de Caso. Serão analisados os resultados quantitativos, qualitativos e físico (HW) do projeto. A aparência do HW construído é visto nas figuras 16 e 20 (Apêndice).

**Figura 16:** Aparência do módulo desenvolvido



Fonte: Autor.

Sendo o sistema suficientemente complexo, foi possível executar os CT planejados da Quadro 1, os quais obtiveram resultados conforme Quadro 4 (Apêndice). Tem-se em mente que os CT tabelados servem como prova de conceito, corroborando com a metodologia.

Os 26 CT listados tem uma importância crítica para a segurança da máquina, pois são relativos ao controle de velocidade do motor. A resposta esperada relata o que deve ocorrer uma vez que o subsistema esteja em conjunto com o resto do maquinário. Visto que o DUT é capaz de se comunicar com o operador da máquina somente através de outros dispositivos (via terminal gráfico ou emitindo alerta sonoro), o sistema deve supervisionar a comunicação do mesmo com a rede. É previsto no projeto da ECU mensagens padrões para os mal funcionamentos tabelados. Portanto o envio destas mensagens por parte do DUT efetivamente atestam a detecção da falha provocada pelo CT. Com a mensagem na rede, foge do escopo do módulo do Estudo de Caso se o dispositivo destinatário da mensagem irá de fato indicar a falha detectada ao usuário. Para o tal, cabe a fabricação de outro módulo HIL.

A resposta obtida, em concordância com a resposta esperada, definitivamente atesta a fun-

cionalidade do módulo desenvolvido. Todas as ações tomadas pelo DUT são apropriadas e vão a favor para garantir a segurança no cenário de risco. Para os CT executados acima, nenhum é recomendado o teste em campo. A execução da bateria de teste de maneira tradicional pode danificar o motor e por em risco o operador. Outrossim, o posicionamento dos sensores dentro do bloco do motor dificulta o acesso do operador para a realização dos teste. Um exame mais aprofundado é realizado na seção seguinte.

#### 4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

Para a obtenção de resultados quantitativos, a bateria de testes foi executada 6 vezes, o que levou 785 s individualmente por execução. A partir de estimativas apresentadas na Quadro 2, pode-se calcular as métricas  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$ .

**Quadro 2:** Resultados da execução dos casos de teste

	HIL	campo	razão	variável
CT reprodutíveis	190	35	542,9%	$M_1$
média velocidade de execução [CT/h]	119,236	2	5961,8%	$M_2$
tempo de preparação [h]	0,5	72	0,7%	$M_3$
engenheiros envolvidos	1	2	50,0%	$M_4$

Fonte: Autor.

O resultado numérico aponta que, enquanto o módulo do Estudo de Caso tem a capacidade de testar aproximadamente 543 % mais CT que em relação à testes tradicionais em campo, também os executa 5961.8 % mais rápido. Ainda, o tempo de preparação do teste é reduzido para aproximadamente 0.7 % e a quantidade de engenheiro de teste envolvidos em 50 %. Somando a bons resultados numéricos, a totalidade dos benefícios obtidos são evidenciados pela análise qualitativa.

#### 4.2 ANÁLISE QUALITATIVA

Com a resposta obtida, pode-se concluir sobre métricas qualitativas. Alguns aspectos perceptíveis do uso do HIL automatizado são:

- Conhecimento da confiabilidade da ECU do motor eletrônico é fortalecido;
- Rigoriedade da bateria de teste tem como consequência uma maior satisfação do cliente final;
- Documentação produzida relata a execução e resultados dos testes;

- Repetibilidade assegura que o teste será executado sempre da mesma maneira, eliminando erro humano;
- Incorporação do conhecimento técnico sobre o subsistema da máquina dá resguardo para futuras decisões de projeto;
- Possibilidade de teste do item de linha ou de garantia decisivamente verifica o funcionamento ou não do mesmo;
- Facilidade de execução de teste permite uma resposta mais rápida da parte da engenharia a eventuais problemas relacionados ao item;
- Conclusão via métricas quantitativas que a nova metodologia de teste proporciona um retorno financeiro muito mais significativo que padrões de teste anteriores.

O módulo HIL desenvolvido como Estudo de Caso tem seu funcionamento conforme previsto. Com o tempo de desenvolvimento de um ano para o alcance dos primeiros resultados, pode-se considerar o projeto bem-sucedido. Todas as especificações foram respeitadas em seu desenvolvimento. Por consequência, este possibilita testes relativo às questões de SF em acordo com a norma ISO25119. Fazendo uso de materiais em grande parte já disponíveis na empresa anfitriã, foi possível provar o conceito do HIL automatizado para validação funcional.



## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho contextualizou e propôs uma metodologia de desenvolvimento *Hardware-In-the-Loop* (HIL) para maquinário agrícola autopropelido. O qual, graças a sua abrangência, pode ser aplicado a vários produtos do ramo da agricultura. Os principais aspectos propostos do novo sistema HIL: a automatização e a modularização foram apresentados como grandes vantagens sobre o sistema de teste existentes.

Conforme avançado no escopo deste documento, o sistema de teste proposto é tecnicamente e historicamente embasado. O conjunto de variáveis que jogam no desenvolvimento de uma máquina agrícola tornam indispensável o uso de uma plataforma HIL para o alcance de produtos com qualidade. A metodologia é sistemática, factível e reproduzível, indo de encontro com os objetivos do projeto.

Por parte da empresa anfitriã do projeto, houve interesse no desenvolvimento da plataforma. Em razão de desenvolvimentos anteriores, viu-se grande potencialidade do projeto proposto. Os aspectos inovadores da nova metodologia garantem a sustentabilidade do projeto financeiramente.

Como prova final do conceito, um Estudo de Caso para o Módulo de Controle Eletrônico (ECU) do motor foi realizado segundo a metodologia. Em uma análise quantitativa e qualitativa, percebeu-se vantagens de uso extremamente positivas, não somente pelo aspecto de retorno financeiro, mas tecnicamente. Observa-se uma infinidade de cenários de falhas possíveis para testes. Porém, para o propósito deste trabalho, foi analisado resultados parciais, como prova de conceito. Os cenários de falha de exemplo foram bolados conforme o método de Segurança Funcional (SF) listado em norma internacional ISO25119. Uma vez com o sistema funcional, a bateria de testes é facilmente configurada e a cobertura de testes desejada é atingida.

São observadas oportunidades de melhoria para trabalhos sucessores. A implementação de relatório automático isentaria a análise parcial de resultados por parte do operador, diminuindo o tempo de compilação e documentação dos dados. A integração de plataformas HIL existentes (anteriores à metodologia proposta) e novos módulos beneficiaria a infra-estrutura da empresa já existente.



## REFERÊNCIAS

ANFAVEA. **GUIA MAR-1**. 2016.

BLOCK, A. **Load sensing engine governor**. US Patent 2,685,871.

CONAMA. **Resolução CONAMA 433**. 2011.

dSPACE. **Imagem**. Disponível em: <https://dspace.com> Acessado em 15/06/2017.

ENISZ, K.; FODOR, D.; SZALAY, I.; KOVACS, L. Reconfigurable real-time hardware-in-the-loop environment for automotive electronic control unit testing and verification. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, [S.l.], v. 17, n. 4, p. 31–36, 8 2014.

GANSSELE, J. G.; BARR, M. **Embedded Systems Dictionary**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2003. 291 p. (R and D Developer Series).

HAN, K.; SON, I.; CHO, J. A study on test automation of IVN of intelligent vehicle using model-based testing. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON UBIQUITOUS AND FUTURE NETWORKS (ICUFN), 2013., 2013. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2013. p. 123–128.

ISO25119: tractors and machinery for agriculture and forestry: safety-related parts of control systems. [S.l.: s.n.], 2010. n. ISO 25119.

ISO26262: road vehicles functional safety. [S.l.: s.n.], 2009. n. ISO 26262.

KELBER, C. R.; REIS, B. R. R.; FIGUEIREDO, R. M. Improving functional safety in autonomous guided agricultural self propelled machines using Hardware-In-the-Loop (HIL) systems for software validation. In: IEEE 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (ITSC), 2016., 2016. **Anais...** IEEE, 2016. p. 1438–1444.

KLUTKE, G.; KIESSLER, P.; WORTMAN, M. A critical look at the bathtub curve. **IEEE Transactions on Reliability**, [S.l.], v. 52, n. 1, p. 125–129, 3 2003.

KUM, D.-h.; SON, J.; LEE, S.-b.; WILSON, I. Automated Testing for Automotive Embedded Systems. In: SICE-ICASE INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE, 2006., 2006. **Anais...** IEEE, 2006. p. 4414–4418.

LEU, K.-L.; HUANG, H.; CHEN, Y.-Y.; HUANG, L.-R.; JI, K.-M. An intelligent brake-by-wire system design and analysis in accordance with ISO-26262 functional safety standard. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONNECTED VEHICLES AND EXPO (ICCVE), 2015., 2015. **Anais...** IEEE, 2015. p. 150–156.

MENDONCA, L. S.; LUCEIRO, D. D.; MARTINS, M. E. S.; BISOGNO, F. E. Development of an engine control unit: implementation of the architecture of tasks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2017., 2017. **Anais...** IEEE, 2017. p. 1142–1146.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRIVTSOV, V. **Reliability Engineering and Risk Analysis: a practical guide**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2016.

NASA. **Fault Tree Handbook with Aerospace Applications**. 2002.

National Instruments. **Imagem**. Disponível em: <https://ni.com> Acessado em 15/06/2017.

NAYAK, A.; PUTHIYAPURAYIL, S.; MOUZAKITIS, A. Automated fault diagnostics testing for automotive electronic control units deploying hardware-in-the-loop. In: UKACC INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL 2010, 2010. **Anais...** Institution of Engineering and Technology, 2010. p. 763–768.

PAQUET, B.; OSSELAERE, G.; VERMEULEN, A.; GUNST, W. **Method and apparatus for the control of self-propelled agricultural harvesting machines**. US Patent 5,488,817.

PLÖGER, M.; SCHÜTTE, H.; FERRARA, F. Automatisierter HIL-Test im Entwicklungsprozess vernetzter, automotiver Elektroniksysteme. In: AUTOREG 2004, STEUERUNG UND REGELUNG VON FAHRZEUGEN UND MOTOREN, 2004, Düsseldorf. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004.

RANKIN, D. J.; JIANG, J. A Hardware-in-the-Loop Simulation Platform for the Verification and Validation of Safety Control Systems. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, [S.l.], v. 58, n. 2, p. 468–478, 4 2011.

RAUT, P. C.; TADE, S. L.; JADHAV, R. S. Test automation for Engine Warmup feature testing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING COMMUNICATION CONTROL AND AUTOMATION (ICCUBEA), 2016., 2016. **Anais...** IEEE, 2016. p. 1–4.

REIS, B. R. R. **METODOLOGIA PARA CONCEPÇÃO DE PLATAFORMA HIL APLICADO A MÁQUINAS AGRÍCOLAS**. 2015.

ROSS, H. **Functional Safety for Road Vehicles: new challenges and solutions for e-mobility and automated driving**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016.

SMITH, D.; SIMPSON, K. **Functional Safety**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2004.

Speedgoat. **Imagem**. Disponível em: <https://speedgoat.ch> Acessado em 15/06/2017.

Vector Informatik. **Imagem**. Disponível em: <https://vector.com> Acessado em 15/06/2017.

ZHANG, H.; LI, W.; QIN, J. Model-based functional safety analysis method for automotive embedded system application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT CONTROL AND INFORMATION PROCESSING, 2010., 2010. **Anais...** IEEE, 2010. p. 761–765.

## APÊNDICE A TABELA HARA PROPOSTA

### Quadro 3: HARA do subsistema do Estudo de Caso

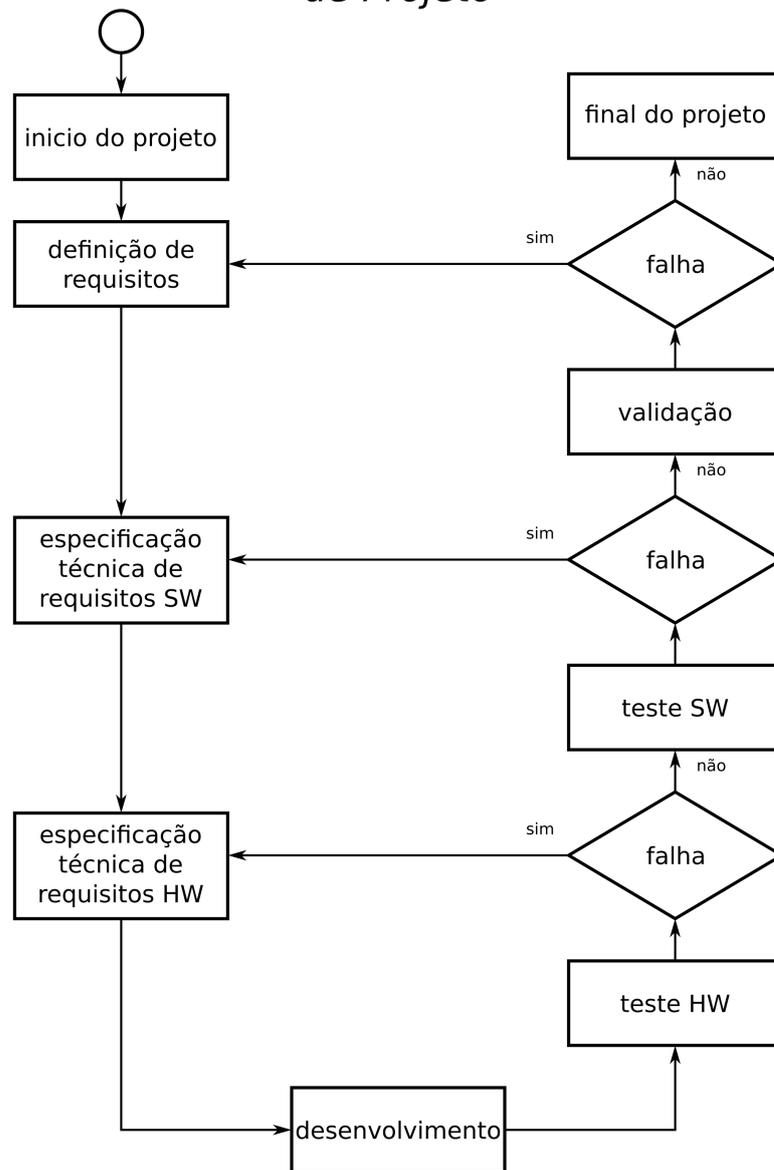
FUNÇÃO	ID	MODOS DE FALHA EM POTENCIAL	CENÁRIO DE RISCO EM POTENCIAL	SEVERIDADE			EXPOSIÇÃO			CONTROLABILIDADE			AgPL
				HIPÓTESE	S	JUSTIFICATIVA	HIPÓTESE	E	JUSTIFICATIVA	HIPÓTESE	C	JUSTIFICATIVA	
Sensor de temperatura do líquido refrigerante	1	Tensão abaixo do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Motor pode sobre-aquecer sem conhecimento do sistema	1	Interrupção abrupta da operação pode causar danos mínimos ao operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
	2	Tensão acima do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Motor pode sobre-aquecer sem conhecimento do sistema	1	Interrupção abrupta da operação pode causar danos mínimos ao operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
	3	Temperatura acima do normal	Temperatura do motor está alta	Motor opera dentro dos limites de segurança	0	Motor não será danificado	Situação pode ocorrer um cenário de operação atípico	0	Diagnóstico automático alerta usuário	Máquina alerta operador	0	Operador possui conhecimento do risco	QM
	4	Temperatura alta	Motor está sobre-aquecido	Motor pode derreter espontaneamente	1	Interrupção abrupta da operação pode causar danos mínimos ao operador	Situação pode ocorrer um cenário de operação atípico	0	Diagnóstico automático desliga a máquina	Máquina desliga	0	Danos são evitados pelo desligamento da máquina	QM
Sensor de temperatura do combustível	5	Tensão abaixo do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Combustível pode sobre-aquecer sem conhecimento do sistema	2	Explosão do combustível põe em risco o operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
	6	Tensão acima do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Combustível pode sobre-aquecer sem conhecimento do sistema	2	Explosão do combustível põe em risco o operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
	7	Temperatura alta	Combustível está sobre-aquecido	Combustível pode explodir espontaneamente	3	Operador está em risco de morte	Situação pode ocorrer um cenário de operação atípico	0	Diagnóstico automático desliga a máquina	Máquina desliga	0	Danos são evitados pelo desligamento da máquina	QM
Sensor de pressão do óleo	8	Tensão abaixo do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Sistema hidráulico pode estar com defeito sem conhecimento do sistema	0	Interrupção abrupta da operação não causa danos ao operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
	9	Tensão acima do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Sistema hidráulico pode estar com defeito sem conhecimento do sistema	0	Interrupção abrupta da operação não causa danos ao operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
	10	Pressão acima do normal	Pressão do óleo está alta	Motor opera dentro dos limites de segurança	0	Motor não será danificado	Situação pode ocorrer um cenário de operação atípico	0	Diagnóstico automático alerta usuário	Máquina alerta operador	0	Operador possui conhecimento do risco	QM
	11	Pressão abaixo do normal	Pressão do óleo está baixa	Motor opera dentro dos limites de segurança	0	Motor não será danificado	Situação pode ocorrer um cenário de operação atípico	0	Diagnóstico automático alerta usuário	Máquina alerta operador	0	Operador possui conhecimento do risco	QM
Sensor de pressão do turbocompressor	12	Pressão baixa	Pressão do óleo insuficiente	Motor não consegue manter a pressão	0	Interrupção abrupta da operação não causa danos ao operador	Situação pode ocorrer um cenário de operação atípico	0	Diagnóstico automático desliga a máquina	Máquina desliga	0	Danos são evitados pelo desligamento da máquina	QM
	13	Tensão abaixo do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Sistema hidráulico pode estar com defeito sem conhecimento do sistema	0	Interrupção abrupta da operação não causa danos ao operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
	14	Tensão acima do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Sistema hidráulico pode estar com defeito sem conhecimento do sistema	0	Interrupção abrupta da operação não causa danos ao operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
Sensor de pressão da linha injetora	15	Pressão baixa	Pressão do óleo insuficiente	Motor não consegue manter a pressão	0	Interrupção abrupta da operação não causa danos ao operador	Situação pode ocorrer um cenário de operação atípico	0	Diagnóstico automático desliga a máquina	Máquina desliga	0	Danos são evitados pelo desligamento da máquina	QM
	16	Tensão abaixo do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Sistema hidráulico pode estar com defeito sem conhecimento do sistema	0	Interrupção abrupta da operação não causa danos ao operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
	17	Tensão acima do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Sistema hidráulico pode estar com defeito sem conhecimento do sistema	0	Interrupção abrupta da operação não causa danos ao operador	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	1	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta falha do sensor	0	Operador é capaz de desligar a máquina seguramente	QM
Sensor detector de água no combustível	18	Água no combustível	Combustível possui conteúdo aquoso	Combustão atípica	0	Motor não será danificado	Situação pode ocorrer por ao reabastecer	0	Diagnóstico automático do sensor resguarda do acidente	Máquina alerta operador	0	Operador possui conhecimento do risco	QM
Sensor do acelerador	19	Tensão abaixo do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Sistema desconhece velocidade requisitada pelo operador	0	Motor permanece sob controle	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	0	Diagnóstico automático do sensor alerta o operador	Máquina alerta operador	0	Motor continua a operar seguramente	QM
	20	Tensão acima do normal	Motor ligado enquanto sensor não prevê informação válida	Sistema desconhece velocidade requisitada pelo operador	0	Motor permanece sob controle	Falha no sensor pode ocorrer a qualquer instante	0	Diagnóstico automático do sensor alerta o operador	Máquina alerta operador	0	Motor continua a operar seguramente	QM
Bico injetor	21	Bico injetor 1 desconectado	Motor ligado enquanto bico injetor é desconectado	Cilindro não terá combustível para queima	0	Motor não será danificado	Falha no dispositivo ou em sua conexão pode ocorrer	1	Diagnóstico automático do sensor alerta o operador	Máquina alerta operador	0	Motor opera em potência reduzida e operador reage	QM
	22	Bico injetor 2 desconectado	Motor ligado enquanto bico injetor é desconectado	Cilindro não terá combustível para queima	0	Motor não será danificado	Falha no dispositivo ou em sua conexão pode ocorrer	1	Diagnóstico automático do sensor alerta o operador	Máquina alerta operador	0	Motor opera em potência reduzida e operador reage	QM
	23	Bico injetor 3 desconectado	Motor ligado enquanto bico injetor é desconectado	Cilindro não terá combustível para queima	0	Motor não será danificado	Falha no dispositivo ou em sua conexão pode ocorrer	1	Diagnóstico automático do sensor alerta o operador	Máquina alerta operador	0	Motor opera em potência reduzida e operador reage	QM
	24	Bico injetor 4 desconectado	Motor ligado enquanto bico injetor é desconectado	Cilindro não terá combustível para queima	0	Motor não será danificado	Falha no dispositivo ou em sua conexão pode ocorrer	1	Diagnóstico automático do sensor alerta o operador	Máquina alerta operador	0	Motor opera em potência reduzida e operador reage	QM
	25	Bico injetor 5 desconectado	Motor ligado enquanto bico injetor é desconectado	Cilindro não terá combustível para queima	0	Motor não será danificado	Falha no dispositivo ou em sua conexão pode ocorrer	1	Diagnóstico automático do sensor alerta o operador	Máquina alerta operador	0	Motor opera em potência reduzida e operador reage	QM
	26	Bico injetor 6 desconectado	Motor ligado enquanto bico injetor é desconectado	Cilindro não terá combustível para queima	0	Motor não será danificado	Falha no dispositivo ou em sua conexão pode ocorrer	1	Diagnóstico automático do sensor alerta o operador	Máquina alerta operador	0	Motor opera em potência reduzida e operador reage	QM

Fonte: Autor.



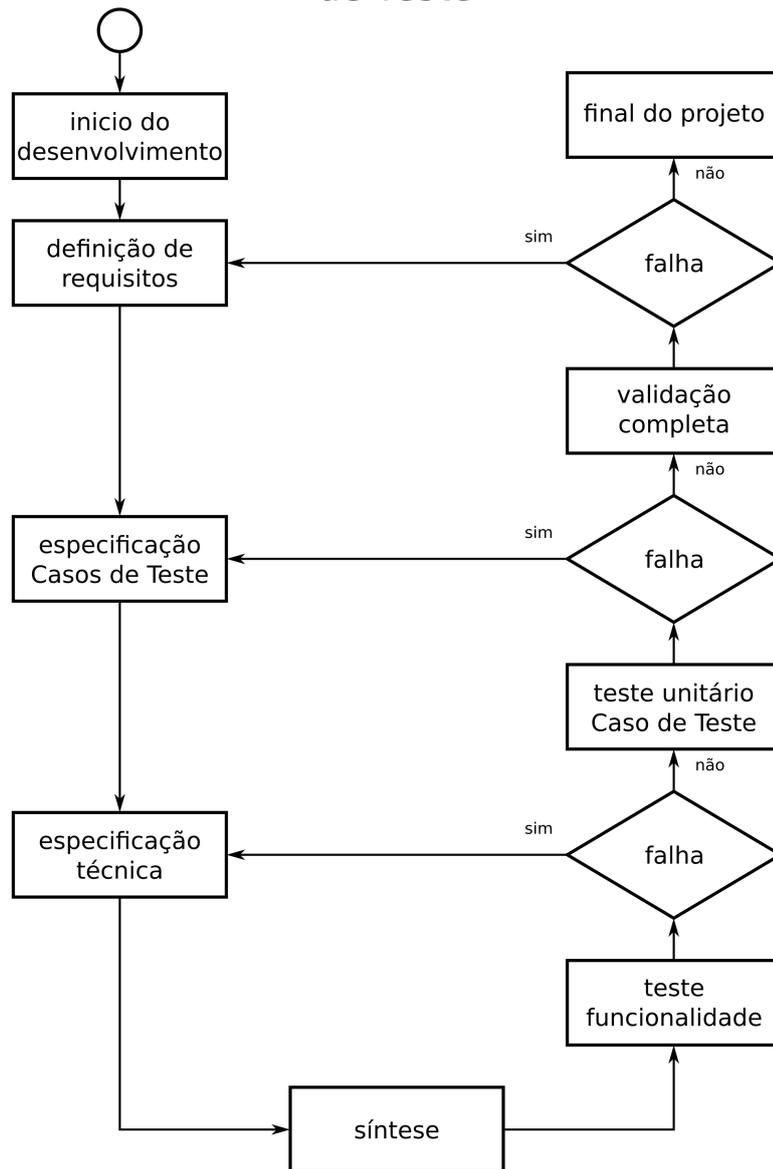
## APÊNDICE B ILUSTRAÇÕES DO CAPÍTULO DE METODOLOGIA

Figura 17: Desenvolvimento de módulo genérico

*Modelo de Desenvolvimento de Projeto*

Fonte: Autor.

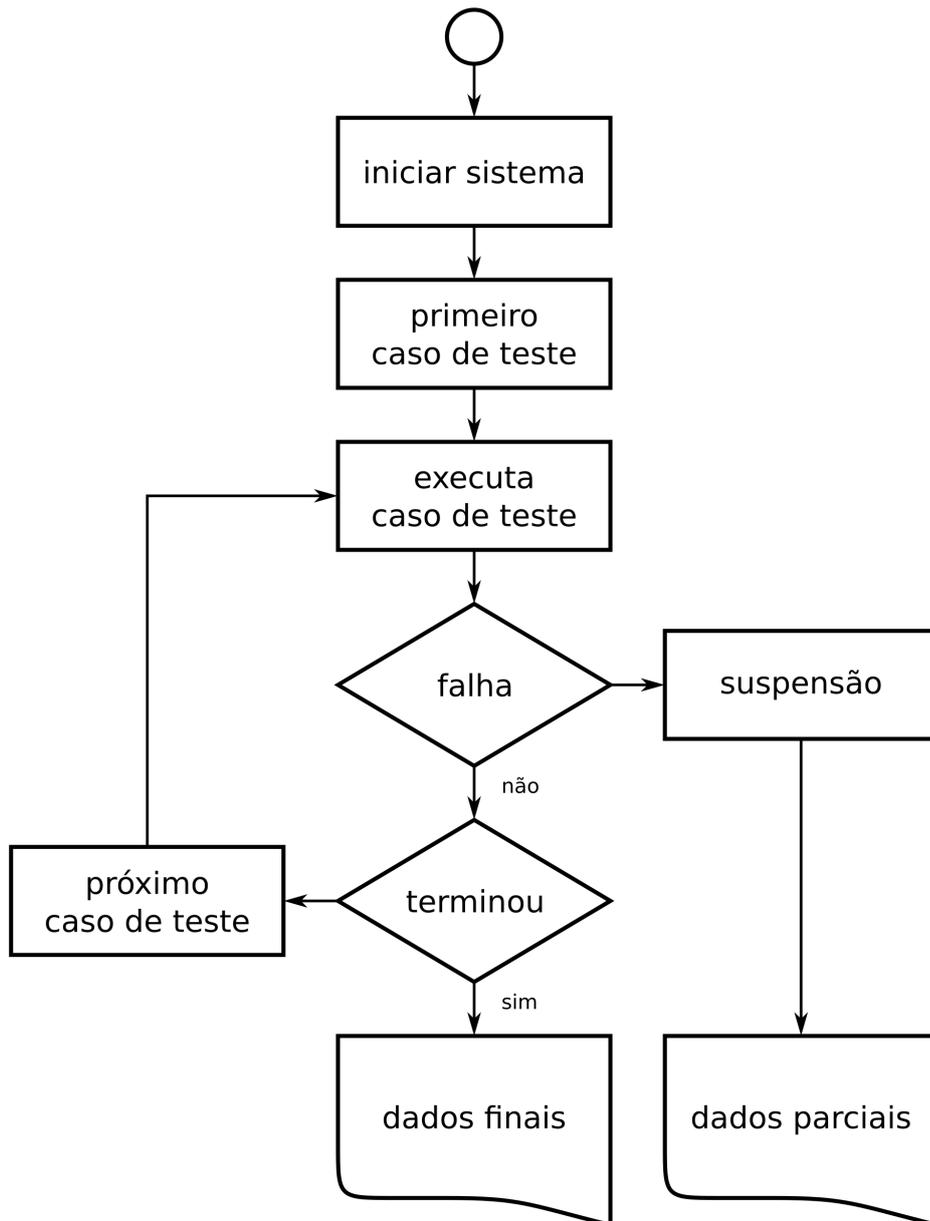
**Figura 18:** Desenvolvimento de teste genérico  
*Modelo de Desenvolvimento de Teste*



Fonte: Autor.

**Figura 19:** Fluxograma de execução automatizada de CT

## *Execução Teste Funcional Automatizado*



Fonte: Autor.



## APÊNDICE C ILUSTRAÇÕES DO CAPÍTULO DE ANÁLISE DE RESULTADOS

**Quadro 4:** Resultados da execução dos casos de teste

FUNÇÃO	ID	CASO DE TESTE
Sensor de temperatura do líquido refrigerante	1	Tensão abaixo do normal
	2	Tensão acima do normal
	3	Temperatura acima do normal
	4	Temperatura alta
Sensor de temperatura do combustível	5	Tensão abaixo do normal
	6	Tensão acima do normal
	7	Temperatura alta
Sensor de pressão do óleo	8	Tensão abaixo do normal
	9	Tensão acima do normal
	10	Pressão acima do normal
	11	Pressão abaixo do normal
	12	Pressão baixa
Sensor de pressão do turbocompressor	13	Tensão abaixo do normal
	14	Tensão acima do normal
	15	Pressão baixa
Sensor de pressão da linha injetora	16	Tensão abaixo do normal
	17	Tensão acima do normal
Sensor detector de água no combustível	18	Água no combustível
Sensor do acelerador	19	Tensão abaixo do normal
	20	Tensão acima do normal
Bico injetor	21	Bico injetor 1 desconectado
	22	Bico injetor 2 desconectado
	23	Bico injetor 3 desconectado
	24	Bico injetor 4 desconectado
	25	Bico injetor 5 desconectado
	26	Bico injetor 6 desconectado

Fonte: Autor.



## APÊNDICE D IMAGENS DO MÓDULO DE ESTUDO DE CASO

**Figura 20:** Aparência do módulo instalado



Fonte: Autor.

**Figura 21:** Aparência do módulo executando teste



Fonte: Autor.