

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



FERNANDO CARNEIRO DINIZ

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA
HARDWARE-IN-THE-LOOP DO DSPACE APLICADA EM
CONVERSORES BUCK-BOOST**

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2016

FERNANDO CARNEIRO DINIZ

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA
HARDWARE-IN-THE-LOOP DO DSPACE APLICADA EM
CONVERSORES BUCK-BOOST**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação

Orientador: Prof. Msc. Daniel Carletti

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2016

FERNANDO CARNEIRO DINIZ

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA
HARDWARE-IN-THE-LOOP DO DSPACE APLICADA EM
CONVERSORES BUCK-BOOST**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Vitória - ES, 19 de dezembro de 2016.

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof. Msc. Daniel Carletti
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Orientador

Prof. Dr. André Ferreira
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

Prof. Msc. Odair de Barros Junior
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador

Dedico este trabalho a todos que me inspiram diariamente e me fazem acordar querendo mudar o mundo.

AGRADECIMENTOS

Gratidão é um dos sentimentos que servem de base para minha vida e, nada mais justo que, após esses anos de graduação, agradecer primeiramente a Deus, por ter colocado tantas pessoas iluminadas no meu caminho e por ser o guia para que eu chegasse até aqui.

Agradeço profundamente a minha mãe que, mesmo sem ter cursado Engenharia, é a melhor engenheira que conheço; ao meu pai, por ser desde a minha infância, o meu exemplo de inteligência; aos meus irmãos pelas horas de descontração; a minha família por sempre acreditar no meu esforço. À Paolla, essa mulher incrível, por ser o motivo dos meus sorrisos. Aos meus amigos, pelas memórias passadas e futuras.

Do ensino fundamental à graduação, tive a oportunidade de aprender com professores brilhantes que ampliaram a minha visão e depositaram em mim uma quantidade enorme de conhecimento, a eles, meu respeito e admiração.

Durante a graduação, tive o privilégio de ser aluno do Professor Lucas Frizera Encarnação, também orientador deste trabalho. Não existem palavras para agradecer e mensurar a importância dele nesse projeto. Quando me perguntam em qual profissional eu me inspiro, sem sombra de dúvidas, eu me refiro a ele. Espero ter entregado um trabalho a altura do que foi a mim ensinado.

Agradeço aos meus colegas de curso, sem vocês seria impossível chegar até aqui. Um agradecimento especial a Daniel Carletti, orientador desse projeto e responsável por boa parte do conhecimento aplicado nesse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo, desde os profissionais da limpeza ao reitor, por me proporcionarem imenso orgulho em estudar nessa Universidade. Agradeço também ao Núcleo de Cidadania Digital, belíssimo projeto de extensão do qual sou professor e ajudo a incluir sociodigitalmente dezenas de pessoas. Agradeço ao Curso de Engenharia Elétrica pelas muitas madrugadas acordado e pela certeza de uma excelente formação.

Por fim, agradeço a todos que me fazem lutar e acreditar em um mundo melhor. Obrigado por tudo.

*“Nur der verdient sich Freiheit wie das Leben,
Der täglich sie erobern muss. ”*

*(“Só é merecedor da liberdade e da vida,
Quem tem de conquistá-las de novo todos os dias.”)*

Johann Wolfgang von Goethe

RESUMO

O desenvolvimento de protótipos de Engenharia exige que, antes de tudo, todas as variáveis contidas em seus processos sejam simuladas e testadas sob uma infinidade de condições. A partir dessa premissa, desenvolvedores buscam simulações mais próximas à realidade do ambiente no qual o protótipo será submetido após sua fabricação. A simulação em *Hardware-in-the-Loop* (HIL) é cada vez mais reconhecida como uma abordagem eficaz na concepção de controle em Eletrônica de Potência, devido ao fato de ser um ambiente de testes em tempo real de alto desempenho e alta fidelidade na obtenção de resultados. A técnica permite que componentes reais e componentes simulados sejam conjuntamente executados numa mesma simulação, proporcionando fidelidade ao ambiente real na simulação e maior segurança para os operadores. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma plataforma *Hardware-in-the-Loop* do dSPACE e aplicá-lo na simulação de um conversor *Buck-Boost*.

Palavras-chave: Hardware-in-the-Loop. Buck-Boost. Simulação. dSPACE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Painel de interface E/S do dSPACE.....	24
Figura 2 - Representação simplificada de um conversor CC-CC.....	26
Figura 3 - Estrutura do Conversor <i>Buck-Boost</i>	28
Figura 4 - Etapa 1 de funcionamento do <i>Buck-Boost</i>	28
Figura 5 - Etapa 2 de funcionamento do <i>Buck-Boost</i>	29
Figura 6 - Característica de transferência do conversor à acumulação indutiva	30
Figura 7 - Diagrama em blocos do esquemático de chaveamento.....	31
Figura 8 - Sinais de controle do esquemático de chaveamento	31
Figura 9 - Esquemático do modulador PWM.....	32
Figura 10 - Componentes da plataforma HIL.....	33
Figura 11 - Interface do Simulink.....	34
Figura 12 - Interface do ControlDesk®.....	35
Figura 13 - Circuito de um gerador senoidal a ser embarcado no dSPACE.....	36
Figura 14 – Caminho no Simulink para a compilação do circuito	36
Figura 15 - Resultado no MatLab da compilação do circuito	37
Figura 16 – Forma de onda e os parâmetros do circuito embarcado passíveis de mudança no ControlDesk®.....	38
Figura 17 - Circuito para recepção do sinal proveniente do dSPACE	39
Figura 18 - Sinal recebido pelo Simulink	39
Figura 19 - Circuito do Simulink para geração do sinal senoidal, envio e recepção.....	40
Figura 20 - Circuito embarcado no dSPACE para transmissão e recepção.....	41
Figura 21 - Sinal recebido do dSPACE no Simulink	41
Figura 22 - Pinagem da porta RS232.....	42
Figura 23 - Circuito de potência do conversor <i>Buck-Boost</i>	44
Figura 24 - Circuito de controle de chaveamento do conversor <i>Buck-Boost</i>	45
Figura 25 - Sinal de tensão de saída do conversor <i>Buck-Boost</i> na simulação via <i>software</i> ...	45
Figura 26 - Sinal de <i>duty cycle</i> do circuito de controle de chaveamento	46
Figura 27 - Circuito de potência do conversor <i>Buck-Boost</i>	47
Figura 28 - Circuito de controle de chaveamento do conversor <i>Buck-Boost</i>	48
Figura 29 - Sinal de tensão de saída do conversor <i>Buck-Boost</i> na simulação HIL	49
Figura 30 - Forma de onda da tensão de saída do circuito de potência amostrada pelo bloco Zero-Order-Hold.....	50

Figura 31 - Paralelo entre os sinais de tensão de saída nos tempos contínuo e discreto	50
Figura 32 – Interface no ControlDesk® da simulação do circuito embarcado no dSPACE..	51
Figura 33 - Sinal do <i>duty cycle</i> do PWM.....	52
Figura 34 - Tensão de saída do PWM	52
Figura 35 - Sinal de tensão de saída do conversor <i>Buck-Boost</i> na simulação HIL para $V_{ref} = 3V$	53
Figura 36 - Sinal do <i>duty cycle</i> do PWM para $V_{ref} = 3 V$	54
Figura 37 - Sinal de tensão de saída do conversor <i>Buck-Boost</i> na simulação HIL para $V_{ref} = 6V$	54
Figura 38 - Sinal do <i>duty cycle</i> do PWM para $V_{ref} = 6 V$	55
Figura 39 - Sinal de tensão de saída do conversor <i>Buck-Boost</i> na simulação HIL para $V_{ref} = 1V$ (<i>Buck</i>) e $V_{ref} = 6V$ (<i>Boost</i>).....	55
Figura 40 - Sinal do <i>duty cycle</i> do PWM para $V_{ref} = 1 V$ e $V_{ref} = 6 V$	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados técnicos da DS1104 R&D <i>Controller Board</i>	25
Quadro 2 – Pinagem da porta RS232	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
ECU	<i>Engine Control Unit</i>
E/S	Entrada/Saída
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
HIL	<i>Hardware-in-the-loop</i>
LEPAC	Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico
PC	<i>Personal Computer</i>
PID	Controlador Proporcional Integrador Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RCP	<i>Rapid Control Prototyping</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Apresentação	13
1.2	Objetivos.....	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
2	HARDWARE-IN-THE-LOOP.....	16
2.1	Definição e histórico.....	16
2.2	Procedimentos para síntese de uma plataforma HIL.....	18
2.3	Considerações de <i>Hardware</i>	18
2.4	Motivação para o uso do HIL.....	19
2.5	Simulação em tempo real	20
2.5.1	Taxa de Amostragem.....	21
3	DSPACE	23
3.1	Hardware	23
4	CONVERSOR <i>BUCKBOOST</i>	26
4.1	Conversores CC-CC	26
4.2	Conversor CC-CC à acumulação indutiva: <i>Buck-Boost</i>	27
4.2.1	Etapas de funcionamento.....	28
4.3	Controle do chaveamento de conversores CC-CC	30
5	DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA HIL.....	33
5.1	Ferramentas computacionais	33
5.1.1	Simulink	33
5.1.2	dSPACE ControlDesk®	34
5.2	Embarque de circuitos no dSPACE.....	35
5.3	Comunicação Simulink ↔ dSPACE	40
5.4	Comunicação RS232	42
6	APLICAÇÃO DA PLATAFORMA HIL EM UM CONVERSOR <i>BUCK-BOOST</i> ..	44
6.1	Simulação do conversor <i>Buck-Boost</i> via <i>software</i>	44
6.2	Embarque do conversor <i>Buck-Boost</i> na plataforma HIL desenvolvida.....	46
6.3	Simulações complementares	53

6.3.1 Simulação 1	53
6.3.2 Simulação 2	54
6.3.3 Simulação 3	55
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Desde os primórdios das Escolas de Engenharia, aulas práticas constituem a base curricular da formação acadêmica dos alunos. De fato, a maior parte da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios (FEISEL; ROSA, 2005). A atividade laboratorial, dentro do processo educacional, possui características e objetivos explícitos como, por exemplo, entender e utilizar modelos conceituais; coletar, analisar e interpretar dados; executar projetos sob demanda; aprender com falhas e erros; desenvolver a criatividade; comunicar, de forma oral e por escrito, os resultados e conclusões obtidos e trabalhar em equipe (PETERSON; FEISEL, 2002). Porém, é necessário ressaltar que a utilização de laboratórios em momentos de aprendizado e treinamento esbarra em questões operacionais práticas, como custos envolvidos com aquisição, manutenção, operação e atualização dos equipamentos, situações estas comuns e que necessitam a busca de soluções alternativas ou complementares às atividades laboratoriais, sem perda ou alteração de seus conteúdos e objetivos (QUEIROZ *et al.*, 2010). Além disso, a realização de determinados experimentos pode comprometer a integridade física dos alunos, caso os mesmos não estejam preparados para lidar com o ferramental utilizado.

A técnica de simulação *Hardware-in-the-Loop* (HIL) vem sendo muito utilizada para criação e teste de sistemas complexos em condições de operação mais realistas possíveis (BORGES; BARANAUSKAS, 1995). A técnica é baseada na simulação em tempo real em ambientes programados para reproduzir, da forma mais exata possível, sistemas físicos reais, possibilitando interação com o operador, através de componentes físicos, que podem interagir com o ambiente real simulado (BORGES; BARANAUSKAS, 1995).

A técnica HIL, devido ao seu baixo custo de aplicação, também é muito utilizada nas áreas de desenvolvimento e treinamento, devido ao fato de reduzir a utilização de componentes físicos de custos elevados nas etapas iniciais de projetos, nas quais há muita perda e desgaste de componentes devido aos testes realizados além do desconhecimento do comportamento do sistema. Ademais, é possível utilizar o HIL em treinamentos de operadores, certificação de projetos e também no aprendizado em aulas de laboratório. Sendo assim, o HIL amplia a

segurança das partes envolvidas e confere a possibilidade de prever situações de riscos no desenvolvimento de protótipos (GU *et al.*, 2007).

A simulação tradicional baseada em *software* possui a desvantagem de ser incapaz de replicar exatamente as condições reais operacionais de um protótipo. Uma maneira de preencher a lacuna entre simulação e as condições reais de operação é a simulação *Hardware-in-the-Loop*. A simulação em tempo real HIL permite que os testes envolvendo todos os componentes físicos de um projeto sejam substituídos por componentes simulados com um maior grau de precisão do que o fornecido por simulações em *software*. No HIL, componentes físicos e emulados são executados ao mesmo tempo em uma simulação. Isso aumenta o realismo da simulação e fornece acesso aos recursos de *hardware* atualmente indisponíveis em modelos de simulação somente de *software* e, portanto, reduz os riscos de descobrir um erro no protótipo em fases finais de teste em campo, além de reduzir os riscos de exposição de um operador ou usuário (LU; MONTI; DOUGAL, 2003).

A técnica HIL tem se tornado uma abordagem cada vez mais interessante para diversos segmentos de atuação, sendo amplamente aplicada, principalmente na indústria automotiva, pelo fato de ser um dos segmentos de mercado mais competitivos na atualidade, em que compradores de veículos esperam alto nível de qualidade, segurança e funcionalidade. Tudo isso é acompanhado, naturalmente, por uma pressão por diminuição de custos e tempo de desenvolvimento (ALBUQUERQUE, 2007).

O HIL tem uma larga faixa de aplicações como, por exemplo, a investigação de distúrbios de qualidade de energia e também o desenvolvimento de unidades de controle eletrônico automotivo moderno. A aplicação dessa técnica a sistemas de Eletrônica de Potência é, em particular, um campo de pesquisa muito ativo. De fato, aplicações em Eletrônica de Potência podem ser um desafio significativo, pois possuem uma exigência muito grande em termos de precisão de tempo (LU *et al.*, 2007).

A crescente complexidade dos *softwares*, modelos de protótipos eletrônicos e a forma de controlar esses protótipos fomenta a pesquisa por novas ferramentas de controle em busca de alta eficiência e implementações mais simples. Utilizando simulações no microcontrolador dSPACE, é possível testar de forma confiável os protótipos desenvolvidos para simulações.

Ele substitui o ambiente real por um cenário simulado, evitando em grande parte o alto custo e os testes de falhas que causam danos ao protótipo e expõem a diversos riscos os operadores. O microcontrolador possui integração com o MatLab/Simulink, possibilitando que circuitos projetados neste sejam embarcados naquele e executados em tempo real no dSPACE Control Desk®, *software* de interface dSPACE® e Simulink (AHMED, 2003).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma plataforma de comunicação e controle, doravante denominada *Hardware-in-the-Loop*, entre o microcontrolador dSPACE e um computador com Simulink.

1.2.2 Objetivos específicos

- Embarcar um circuito conversor *Buck-Boost* na plataforma HIL;
- Elaborar um material que permita futuramente novos pesquisadores do LEPAC (Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico) produzir plataformas HIL utilizando dSPACE com maior facilidade.

2 HARDWARE-IN-THE-LOOP

2.1 Definição e histórico

O desenvolvimento de produtos e processos modernos exige muito além das etapas de simulação computacional, pois mesma não é capaz de reproduzir fielmente determinadas condições e complexidades de operação. É necessário executar o sistema em condições mais próximas possível ao ambiente real de operação (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999).

A estratégia de simulação *Hardware-in-the-Loop* se dispõe a possibilitar uma integração entre componentes implementados em *hardware* e processos simulados em *software*. Em um projeto, essa versatilidade proporciona que seja possível poupar tempo e custos, simulando componentes e modelos que despenderiam muito tempo e dinheiro para serem projetados e construídos ao mesmo tempo em que uma resposta em *hardware* real é obtida. Isso possibilita uma verificação e, por conseguinte, uma validação mais efetiva do sistema do que simplesmente uma simulação computacional do sistema como um todo (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999).

É importante ressaltar que, a simulação em *software* é uma etapa de extrema importância para o desenvolvimento de um projeto, porém ela não consegue ser suficiente para o mesmo, pois não possibilita a apresentação das condições reais e complexidades de operação de um sistema de forma adequada.

As simulações HIL tiveram origem na indústria aeronáutica, mais especificamente nas simulações de voo em tempo real, nas quais eram testados os instrumentos de aviação com um *cockpit* fixo (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999), que após um tempo acabou sendo substituído por um *cockpit* que se movia de acordo com o movimento da aeronave. Nesse tipo de simulação, somente eram reais o *cockpit* e o piloto, os movimentos do avião eram gerados por atuadores elétricos e hidráulicos, que foram, de forma gradual, substituídos por componentes similares mais sofisticados até o momento que pudessem ser implementados computacionalmente (ANDERSON, 1962). A simulação HIL foi utilizada nos testes dos componentes do avião, com isso, tornou-se possível simular diferentes tipos de estímulos, até

mesmo as excitações sofridas pela roda de uma aeronave devido ao contato com a superfície da pista de pouso (DROSDOL; KADING; PANIK, 1985).

É importante ressaltar que, apesar do início da utilização das simulações HIL ter sido na indústria aeroespacial, essa técnica não ficou restrita a apenas esse ambiente. De fato, as simulações *Hardware-in-the-Loop* são amplamente utilizadas na indústria automotiva, por exemplo, uma vez que esse tipo de simulação é reconhecido como uma maneira de testar estratégias de controle automotivo, bem como diagnosticar funcionalidades (PALLADINO; FIENGO; LANZO, 2012). Nessa indústria, espera-se que os produtos sejam desenvolvidos em um curto espaço de tempo, priorizando a segurança e a economia de recursos, visto que a competitividade é enorme.

A simulação HIL tornou-se também muito utilizada em outras áreas, como a Eletrônica de Potência (LU *et al.*, 2007), visto que os testes em bancadas físicas podem se tornar dispendiosos, além de comprometer a segurança dos envolvidos.

Inúmeras são as vantagens em se utilizar o HIL, e por este motivo ele é tão utilizado em diversas áreas, destacam-se entre elas (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999):

- Possibilidade de teste tanto do *hardware* quanto do *software*, sem a necessidade de operar um processo real, que comprometeria todo o sistema envolvido;
- Os testes realizados no HIL podem simular condições e restrições extremas, que em muitos casos não seriam realizáveis em *softwares* de simulação;
- Possibilidade de teste de falhas de sensores e outros componentes e os seus efeitos no sistema.

É importante também enumerar as desvantagens da técnica (BADARUDDIN; HERNANDEZ; BROWN, 2007):

- Elevado custo das plataformas existentes atualmente;
- Necessidade de pessoas que sejam qualificadas para atuar na configuração e na simulação;
- Complexidade dos modelos matemáticos que podem envolver determinados processos.

Comparativamente, as vantagens do HIL superam as desvantagens em muitos casos.

2.2 Procedimentos para síntese de uma plataforma HIL

Os principais passos para a síntese de uma plataforma *Hardware-in-the-Loop* são descritos abaixo (HALVORSEN, 2012).

- 1) **Desenvolvimento de um modelo matemático:** a criação de um modelo matemático do ambiente real onde o dispositivo de *hardware* é destinado a ser usado é de suma importância. Modelos são utilizados para prever possíveis entradas e saídas de um sistema.
- 2) **Simulações por *software*:** são a base comparativa para as respostas obtidas através do HIL. As simulações por *software* oferecem um ambiente no qual as condições de simulação aproximam-se das condições perfeitas de operação de um sistema, isto é, não há interferências e ou distúrbios causados por fatores externos, salvo quando o próprio projetista insere propositalmente.
- 3) **Simulação do HIL (*Software* + *Hardware*):** teste do dispositivo em um ambiente simulado. Neste tipo de simulação o grau de confiabilidade aumenta, tornando possível testar em condições que se assemelham à realidade.
- 4) **Implementação do *Hardware* no processo real:** finalmente, se todas as configurações do *hardware* foram bem aceitas na simulação no HIL, é possível implementar o *hardware* em questão no ambiente real onde ele será usado.

2.3 Considerações de *Hardware*

Segundo Silva (2008), o *hardware* de uma plataforma de simulação HIL é comumente composto por:

- **Planta:** sistema a ser estudado;
- **Computador para desenvolvimento de *software*:** corresponde ao computador onde está o modelo matemático do sistema físico a ser testado. Inclui *softwares* com simuladores, editores de texto, compiladores, depuradores de código e o que mais for

necessário para a devida simulação do sistema e desenvolvimento dos algoritmos de controle a serem testados;

- **Computador de execução de *software*:** componente onde será executado o *software* gerado pelo computador. Pode variar desde um complexo sistema com múltiplos processadores dedicados até um microprocessador;
- **Circuitos condicionadores de sinal:** atuam sobre os sinais do sistema, especialmente entre a planta e o computador de execução de *software*, fazendo com que o sinal seja adequado a cada módulo da plataforma, garantindo a operação correta do sistema. Geralmente são compostos por componentes discretos (resistores, capacitores, amplificadores operacionais), filtros, atenuadores, conversores analógico-digitais / digital-analógicos, etc.

2.4 Motivação para o uso do HIL

A questão do porquê se utilizar *Hardware-in-the-Loop* é de suma importância para compreender as tecnologias de tempo real. Antes mesmo disso, é importante questionar o motivo de não conectar primeiramente o sistema que deve ser testado diretamente sob o ambiente real. Responde-se este questionamento com apenas duas palavras: segurança e custo.

Frequentemente, a dinâmica da planta é simulada em tempo real seja porque o protótipo físico não está disponível ou porque experimentos com partes físicas reais em determinadas fases do projeto implicariam em um custo desnecessário devido ao tempo despendido e ao investimento monetário do mesmo. Além de ser, em muitos casos, uma forma de evitar riscos desnecessários em projetos que possam comprometer, de alguma forma, a vida humana (ALBUQUERQUE, 2007).

O propósito de se utilizar uma simulação HIL é prover uma plataforma para desenvolvimento e testes em sistemas embarcados em tempo real, muitas vezes em paralelo com o desenvolvimento do *hardware*. Logo, o desenvolvimento de *software* não irá precisar mais esperar por uma planta física para escrever e testar os códigos (HALVORSEN, 2012).

A simulação em HIL oferece uma plataforma eficaz, adicionando a complexidade da planta sob controle para desenvolvimento à plataforma de desenvolvimento e teste. A complexidade da planta sob controle é incluída no desenvolvimento adicionando uma representação matemática, isto é, um modelo, de todos os sistemas dinâmicos relacionados. Essas representações matemáticas são referidas à simulação da planta (HALVORSEN, 2012).

Segundo a Anacom (2016), simulação HIL é o método mais utilizado para testar funções, integração de sistemas e comunicações entre centrais eletrônicas (ECUs – *Engine Control Unit*). As ECUs são indispensáveis para veículos, aviões e robôs. O ambiente técnico delas e partes de sistemas interconectados são simulados em *Hardware-in-the-Loop*. Os testes HIL são extremamente sistemáticos e completamente seguros, mesmo se limites críticos forem excedidos. O principal objetivo é detectar erros na central. Uma vez detectados, a situação que produziu o erro pode ser reproduzida inúmeras vezes, conforme os engenheiros planejarem os testes.

Como a simulação HIL pode ser feita em uma fase muito mais preliminar que o teste real em veículo, isso ajuda a melhorar a qualidade em uma fase anterior de desenvolvimento. A principal fabricante japonesa de veículos afirma que a simulação HIL encontra 90% dos erros de uma ECU, e praticamente todos os erros podem ser encontrados antes da fase de calibração. Isso diminui o *time-to-market* e evita campanhas de *recall* que prejudicam severamente a imagem das companhias. O investimento feito em um HIL e no desenvolvimento de testes tem retornado as companhias após alguns meses (ANACOM, 2016).

2.5 Simulação em tempo real

Segundo Maciel *et al.* (2006), sistemas que funcionam em tempo real são aqueles em que são obedecidas imposições de funcionamento de acordo com restrições no tempo, ou seja, o bom funcionamento do sistema não depende apenas se o seu resultado está correto ou não, mas também do tempo em que o processamento é realizado. Uma operação realizada após os limites de tempo falhou ou está incorreta por definição.

De acordo com Maciel *et al.* (2006), as imposições tão restritas são requisitos de sistema para os quais se não houver uma reação em tempo hábil, haverá uma perda de algum tipo. Essa perda pode ser a de estabilidade, como no caso do movimento de aviões. Pode ser também resultado de riscos potenciais caso uma resposta não for dada em tempo hábil, como no caso de *airbags* e sistemas de segurança de centrais de energia, tanto hidrelétricas como usinas nucleares.

2.5.1 Taxa de Amostragem

Segundo Iazzetta (2008), taxa de amostragem é a quantidade de amostras de um sinal analógico coletadas em uma determinada unidade de tempo, para conversão em um sinal digital. Sendo uma frequência, é comumente medida em Hertz (Hz).

De acordo com Isermann, Schaffnit e Sinsel (1999), os principais fatores que limitam a taxa de amostragem de uma simulação HIL são citados abaixo:

- Emprego de processamento em paralelo;
- Método de integração utilizado;
- Em quais parâmetros as equações diferenciais que constituem o modelo são implementadas.

Por ser flexível, a técnica de simulação HIL permite sua utilização tanto em processos lentos como em processos que exigem mais velocidade, sendo que é possível se obter as mesmas vantagens em ambos. Em casos de sistemas com processos mais lentos, é necessário simular o sistema com uma taxa de amostragem maior do que em tempo real, devido ao fato de ser de suma importância conhecer e verificar o comportamento do sistema em um período considerável de tempo, como semanas ou meses, despendendo apenas algumas horas ou dias de simulação (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999).

Conforme Isermann, Schaffnit e Sinsel (1999), não somente o processo em si a ser simulado pode limitar a velocidade de simulação, outros fatores podem ser responsáveis pelo ganho ou perda de velocidade e são eles:

- Utilização de *Timers* e unidades de captura e comparação;

- Conversores analógico-digitais (ADC) e conversores digital-analógicos (DAC);
- Atuadores reais;
- Constantes de tempo de componentes analógicos, como resistores e capacitores.

Ressalta-se que, durante a elaboração de uma plataforma HIL, todos os fatores acima devem ser analisados e sua influência no projeto estudada. A utilização de uma plataforma em tempo real oferece uma aproximação dos resultados ao ambiente real.

3 DSPACE

A crescente complexidade dos *softwares*, modelos de protótipos eletrônicos e a forma de controlar esses protótipos obriga os engenheiros a procurar novas ferramentas de controle em busca de alta eficiência e implementações mais simples. Utilizando simulações no microcontrolador dSPACE, é possível testar de forma confiável os protótipos (AHMED, 2003).

O dSPACE® substitui o ambiente real por um cenário simulado, evitando em grande parte o alto custo e os testes de falhas que causam danos ao protótipo. O microcontrolador possui integração com o MatLab/Simulink, possibilitando que circuitos projetados neste sejam embarcados naquele e executados em tempo real no dSPACE Control Desk® , *software* de interface dSPACE e Simulink (AHMED, 2003).

A versão utilizada neste projeto é a DS1104 R&D, ela será apresentada no próximo subcapítulo.

3.1 Hardware

Segundo o manual do dSPACE (2004), a DS1104 R&D *Controller Board* é uma placa padrão que pode ser conectada a um slot PCI (conector de componentes periféricos, do inglês *Peripheral Component Interconnect*) de um computador. A DS1104 foi projetada especificamente para o desenvolvimento de controladores digitais multivariáveis de alta velocidade e simulações em tempo real em vários campos. É um sistema de controle completo em tempo real baseado em um processador de ponto flutuante PowerPC 603 com 250 MHz. Para fins avançados de E/S, a placa inclui um subsistema slave-DSP baseado no microcontrolador DSP TMS320F240.

Para fins de prototipagem de controle rápido (*Rapid Control Prototyping – RCP*), conectores de interface específicos e painéis de conexão fornecem acesso fácil a todos os sinais de entrada e saída da placa. Assim, a DS1104 é o *hardware* ideal para aplicações RCP sensíveis a custo (DSPACE, 2004). A Figura 1 apresenta o painel de interface E/S.

Figura 1 - Painel de interface E/S do dSPACE



Fonte: Produção do próprio autor.

Usando um cabo adaptador, é possível vincular os sinais externos desejados a partir de um conector de E/S de 100 pinos da placa a conectores DB. Assim é possível realizar uma conexão de alta densidade entre a placa e os dispositivos de uma determinada aplicação através conectores DB, como por exemplo, conectores serial ou paralelo (DSPACE, 2004).

Os painéis de conector de interface específicos fornecem acesso fácil a todos os sinais de entrada e saída da DS1104 R&D *Controller Board* (DSPACE, 2004):

- O painel de conectores fornece conexões fáceis de usar entre a placa de controle DS1104 e os dispositivos a serem conectados a ele. Os dispositivos podem ser conectados individualmente, desconectados ou trocados sem solda via conectores BNC e conectores DB. Isso simplifica a construção do sistema, testes e solução de problemas.
- O painel de conectores fornece uma matriz de LEDs indicando os estados dos sinais digitais.

O Quadro 1 apresenta resumidamente os dados técnicos da placa DS1104 R&D *Controller Board*.

Quadro 1 – Dados técnicos da DS1104 R&D *Controller Board*

Parâmetro	Especificação
Processador	Processador MPC8240 com PPC 603e core e periféricos on-chip
	Processador 64-bit de ponto flutuante
	CPU <i>clock</i> : 250 MHz
	2 x 16 KB cache, on-chip
	On-chip PCI bridge (33 MHz)
Memória	Memória global: 32 MB SDRAM
	Memória flash: 8 MB
Interface serial	RS232 (até 115,2 kBd)
	RS422 / RS485 (até 1MBd)

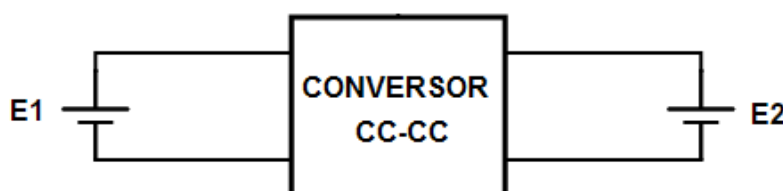
Fonte: Produção do próprio autor.

4 CONVERSOR *BUCKBOOST*

4.1 Conversores CC-CC

Segundo Barbi e Martins (2006), um conversor CC-CC, também conhecido como *chopper*, é um circuito eletrônico que converte uma tensão ou corrente contínua de uma determinada amplitude, em outra tensão ou corrente contínua com outra amplitude. A Figura 2 apresenta o sistema do conversor simplificado.

Figura 2 - Representação simplificada de um conversor CC-CC



Fonte: Produção do próprio autor.

A fonte E_1 está fornecendo energia elétrica ao conversor CC-CC, enquanto este está fornecendo energia elétrica à fonte E_2 . O conversor CC-CC pode então ser conceituado como um sistema, formado por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos que tem por função controlar o fluxo de energia elétrica da fonte de entrada E_1 para a fonte de saída E_2 (BARBI; MARTINS, 2006).

E_1 funciona como fonte de energia e E_2 como carga. Em algumas aplicações práticas a carga do conversor é constituída por um resistor. Em outras situações pode ser um motor de corrente contínua, um banco de baterias, um dispositivo de soldagem elétrica a arco, ou outro conversor estático (BARBI; MARTINS, 2006).

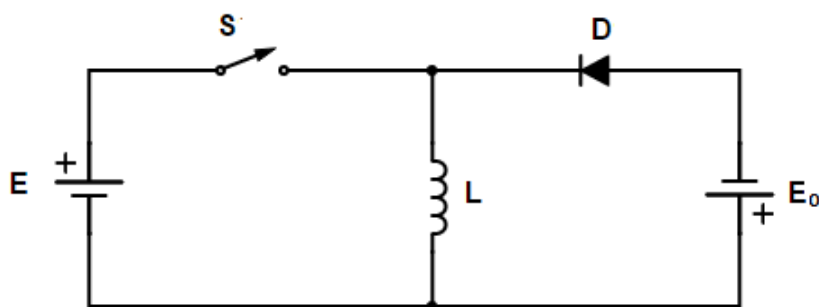
Segundo Barbi e Martins (2006), os conversores CC-CC podem ser classificados como:

- Básicos: conversores que não possuem isolamento elétrico. E dentro desta classificação pode-se distinguir:
 - Diretos: a transferência de potência da entrada do conversor para a saída se processa diretamente, sem a passagem por elementos intermediários acumuladores de energia. São eles o abaixador (Conversor *Buck*) e o elevador (Conversor *Boost*);
 - À acumulação de energia: a transferência de potência é feita indiretamente através da utilização de componentes acumuladores de energia. Encontrados em aplicações onde se deseja controlar o fluxo de energia entre carga e fonte de mesma natureza. São conversores abaixadores-elevadores.
 - Acumulação indutiva – Conversor *Buck-Boost*;
 - Acumulação capacitiva – Conversor *Ćuk*;
 - Acumulação indutiva-capacitiva – Conversores Sepic e Zeta.
- Isolados – há o isolamento por transformador. São eles os conversores *flyback*, *forward*, *push-pull*, meia-ponte e ponte-completa.

4.2 Conversor CC-CC à acumulação indutiva: *Buck-Boost*

O conversor *Buck-Boost* é utilizado para controlar o fluxo de energia entre duas fontes de tensão, ou seja, entre uma fonte de tensão e uma carga com características de fonte de tensão (BARBI; MARTINS, 2006).

A transferência de energia, de forma direta, entre duas fontes de mesma natureza é uma impossibilidade na Engenharia Elétrica. Desse modo, quando se pretende transferir a energia entre duas fontes de tensão, é imprescindível o uso de um componente armazenador de energia que se comporte como fonte de corrente. O componente natural que apresenta essa característica é o indutor. Assim, a transferência de energia entre duas fontes de tensão não pode ser feita diretamente, ela exige a inserção de um indutor em um ponto estratégico do circuito, de forma que numa primeira etapa a energia proveniente da fonte é armazenada no indutor, e na etapa seguinte ela é transferida à carga (BARBI; MARTINS, 2006). O circuito simplificado do conversor é apresentado na Figura 3.

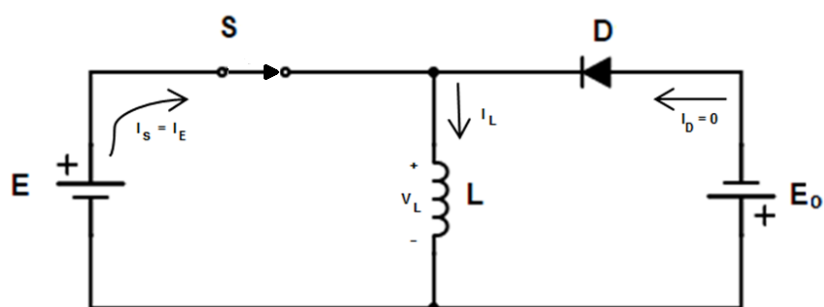
Figura 3 - Estrutura do Conversor *Buck-Boost*

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.1 Etapas de funcionamento

De acordo com Barbi e Martins (2006), o conversor *Buck-Boost* funciona conforme as etapas apresentadas a seguir:

- 1) Na primeira etapa, a chave S encontra-se fechada e a energia proveniente da fonte E é acumulada no indutor L. O diodo D é mantido bloqueado. Esta etapa termina quando a chave S é aberta no tempo t_c . A Figura 4 apresenta o que ocorre nessa etapa.

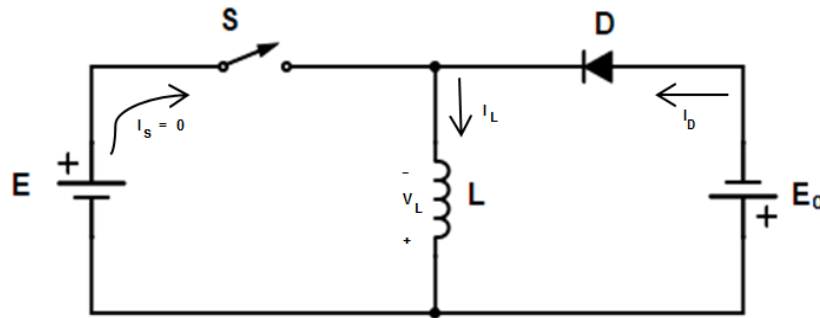
Figura 4 - Etapa 1 de funcionamento do *Buck-Boost*

Fonte: Produção do próprio autor.

Sendo i_s a corrente que chega à chave S, i_E a corrente que sai da fonte de tensão E, v_L a tensão do indutor L, i_L a corrente do indutor L, i_D a corrente do diodo D.

- 2) Com a abertura da chave S, a polaridade no indutor L é invertida, polarizando diretamente o diodo D, que entra em condução. A partir desse momento ($t=t_c$), a energia acumulada no indutor L durante a 1ª etapa é transferida à fonte E_o . Observa-se que a polaridade da fonte E_o é invertida. A Figura 5 apresenta o que ocorre nesta etapa.

Figura 5 - Etapa 2 de funcionamento do *Buck-Boost*



Fonte: Produção do próprio autor.

Em regime permanente o fluxo magnético no indutor, durante um período de funcionamento, se mantém constante. Desse modo, a integral da tensão V_L no intervalo em que a chave permanece fechada é igual a integral dessa mesma tensão durante o intervalo em que S permanece aberta; portanto (BARBI; MARTINS, 2006):

$$\int_0^{t_c} v_L dt = \int_{t_c}^T v_L dt \quad (1)$$

Assim:

$$E \cdot t_c = E_o \cdot t_a \quad (2)$$

Onde:

$$t_a = T - t_c \quad (3)$$

Então:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{t_c}{t_a} = \frac{t_c}{T - t_c} \quad (4)$$

Sabendo que a razão cíclica D é igual a:

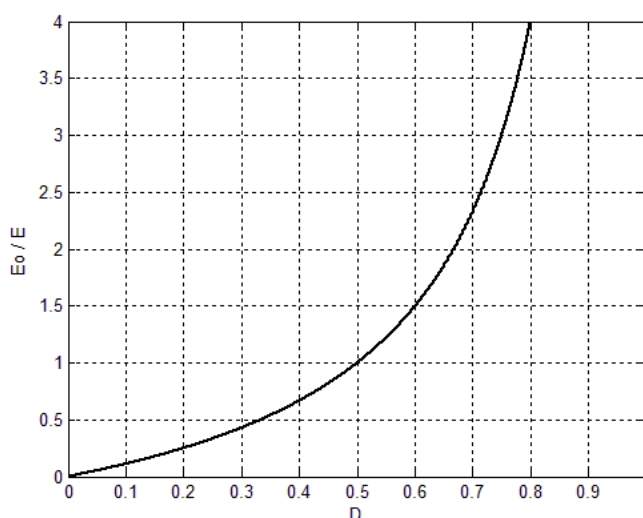
$$D = \frac{t_c}{t_a} \quad (5)$$

E levando a equação 5 na equação 4, obtém-se:

$$\frac{E_o}{E} = \frac{D}{1-D} \quad (6)$$

A equação 6 representa a relação de tensão de saída/tensão de entrada do conversor *Buck-Boost*, e ela será apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Característica de transferência do conversor à acumulação indutiva



Fonte: Produção do próprio autor.

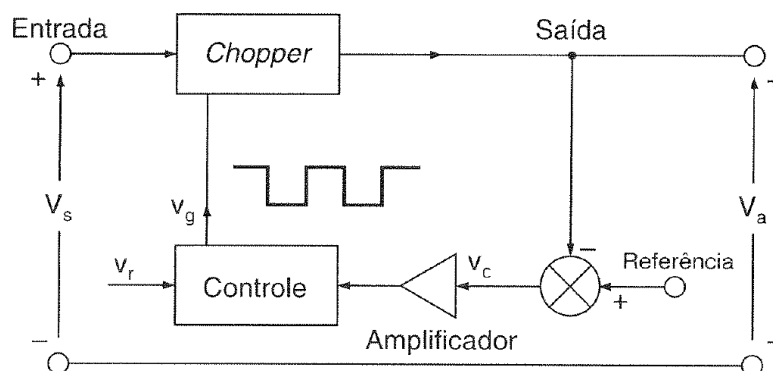
A partir da Figura 6, constata-se que o conversor em questão pode ser abaixador, quando $D < 0,5$, ou elevador, quando $D > 0,5$. Esse conversor é principalmente empregado em fontes chaveadas, nas quais a polaridade invertida na saída com relação ao terminal comum da tensão de entrada pode ser desejada (BARBI; MARTINS, 2006).

4.3 Controle do chaveamento de conversores CC-CC

A técnica de chaveamento usada em conversores CC-CC é denominada PWM (Modulação por Largura de Pulso, do inglês *Pulse Width Modulation*) (AHMED, 2000). Segundo Rashid (1999), a tensão de controle v_c pode ser obtida comparando-se a tensão de saída do conversor com seu valor desejado (Referência); v_c pode ser comparado com uma tensão dente-de-serra

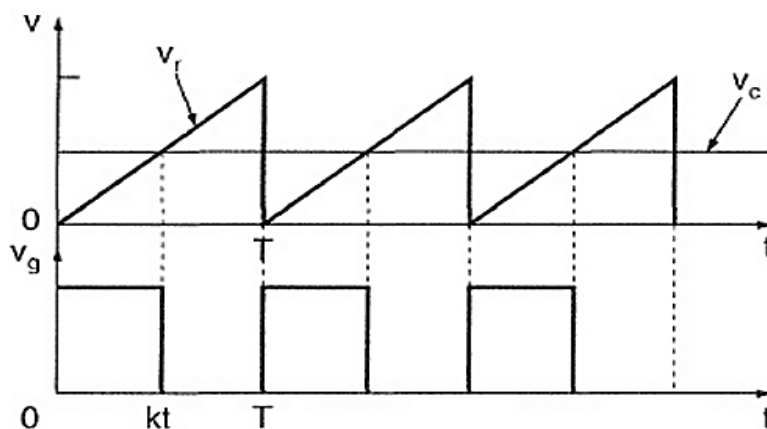
v_r , para gerar o sinal de controle PWM para o conversor. Isso é mostrado na Figura 7 e na Figura 8.

Figura 7 - Diagrama em blocos do esquemático de chaveamento



Fonte: RASHID, 1999.

Figura 8 - Sinais de controle do esquemático de chaveamento



Fonte: RASHID, 1999.

Na modulação PWM a uma frequência de comutação constante, o sinal de controle do chaveamento, que controla o estado (ligado ou desligado) da chave, é gerado comparando uma tensão de controle com uma forma de onda repetitiva. O sinal de tensão do controle é geralmente obtido amplificando o erro, isto é, a diferença entre a tensão de saída real e o seu valor desejado. A frequência da forma de onda repetitiva com um pico constante, uma dente-de-serra, estabelece a frequência de comutação. Essa frequência é mantida constante em um controle PWM e é escolhida uma faixa de algumas centenas de kHz. Quando o sinal do erro

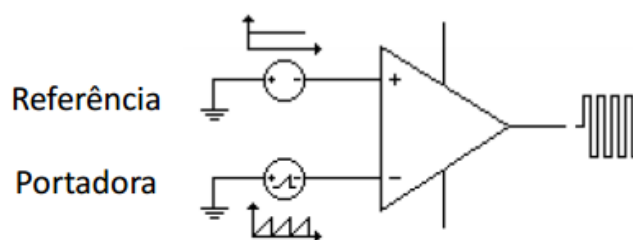
amplificado, que varia muito lentamente com o tempo em relação à frequência de comutação é maior que a forma de onda de dente-de-serra, o sinal de controle da chave torna-se alto, acionando-a. Caso contrário, a chave é desligada (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Em resumo:

- O modulador PWM é obtido a partir da comparação de um sinal de referência (normalmente sinal contínuo) e a portadora;
- A portadora (normalmente sinal dente-de-serra) define a frequência do sinal modulado;
- A largura do pulso, e conseqüentemente o ciclo de trabalho D , é ajustada pelo sinal de referência.

A Figura 9 apresenta o esquemático da comparação mencionada acima.

Figura 9 - Esquemático do modulador PWM

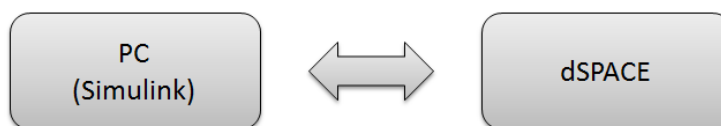


Fonte: MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003.

5 DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA HIL

A plataforma *Hardware-in-the-Loop* proposta neste projeto se baseia na comunicação entre um computador com Simulink, ferramenta do MatLab®, e o microcontrolador dSPACE, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Componentes da plataforma HIL



Fonte: Produção do próprio autor.

Este capítulo tem como objetivo abordar a implementação dessa comunicação e quais ferramentas foram utilizadas.

5.1 Ferramentas computacionais

Neste projeto foram utilizados dois *softwares* para o desenvolvimento da plataforma HIL: o Simulink e o dSPACE ControlDesk®.

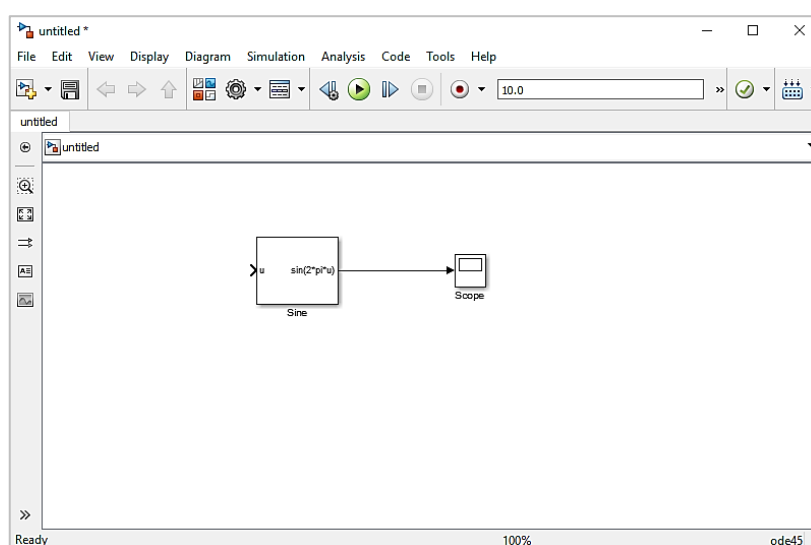
5.1.1 Simulink

Simulink é uma ferramenta desenvolvida pela companhia *MathWorks*, utilizada para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Sua interface primária é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis de blocos. O *software* oferece alta integração com o resto do ambiente MatLab. Simulink é amplamente utilizado em teoria de controle e processamento digital de sinais para projeto e simulação multidomínios (TEWARI, 2002).

Essa ferramenta permite que o usuário trabalhe com blocos que permitem compactar rotinas complicadas na forma de blocos. De forma adicional, o programa pode ser executado do MatLab, em apenas um conjunto de linhas. Outra vantagem do Simulink é permitir a geração do código na linguagem C automaticamente para implementação de sistemas em tempo real (PIRES, 2015).

A Figura 11 apresenta a interface do programa.

Figura 11 - Interface do Simulink



Fonte: Produção do próprio autor.

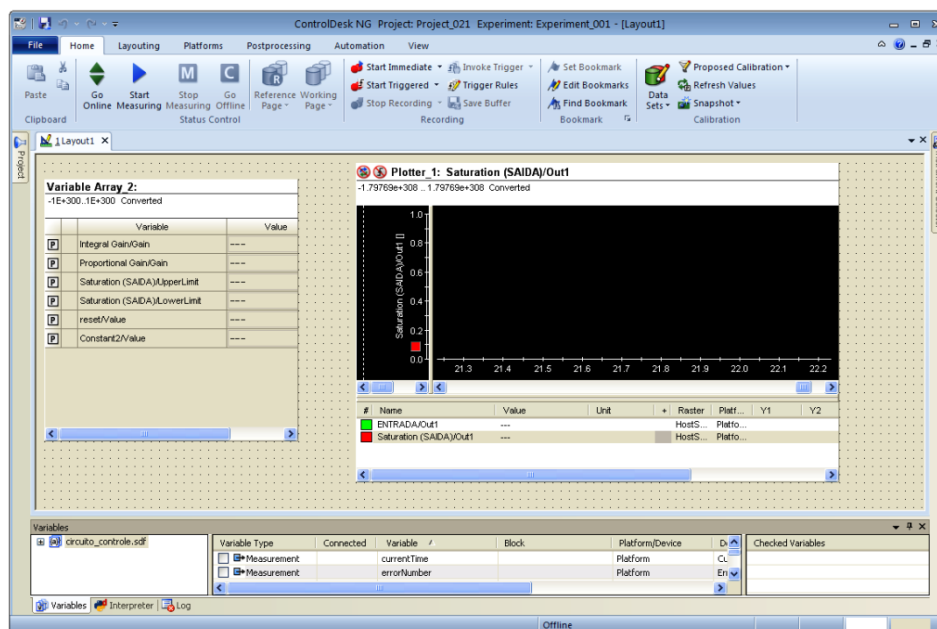
5.1.2 dSPACE ControlDesk®

O ControlDesk® é um *software* universal de experimentação e instrumentação modular para desenvolvimento de ECU's. Oferece um acesso sincronizado a plataformas HIL, ECU's, microcontrolador dSPACE e sistemas de barramento (DSPACE, 2016).

Esse *software* permite gerenciar e monitorar todos os sinais de entrada e saída do dSPACE, além de permitir alterar parâmetros de componentes embarcados no microcontrolador. Por exemplo, supondo que tenha sido embarcado no dSPACE um circuito gerador senoidal, é possível alterar e conferir em tempo real a mudança de amplitude ou frequência da onda, otimizando o desenvolvimento das aplicações.

A Figura 12 apresenta a interface do programa.

Figura 12 - Interface do ControlDesk®



Fonte: Produção do próprio autor.

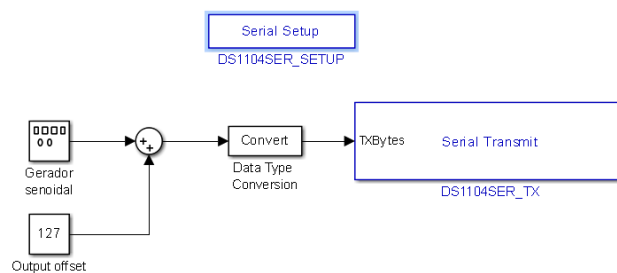
5.2 Embarque de circuitos no dSPACE

A primeira etapa para definir a comunicação entre um computador e o dSPACE é avaliar como são embarcados os circuitos no microcontrolador, por tal motivo, será descrito passo-a-passo como isso foi realizado.

Passo1: Criação do circuito a ser embarcado no Simulink.

Como já mencionado no subcapítulo respectivo ao Simulink, esse *software* oferece a possibilidade de criação de circuitos em lógica de blocos. Foi definido que o circuito a ser embarcado será um gerador senoidal, conforme a Figura 13.

Figura 13 - Circuito de um gerador senoidal a ser embarcado no dSPACE



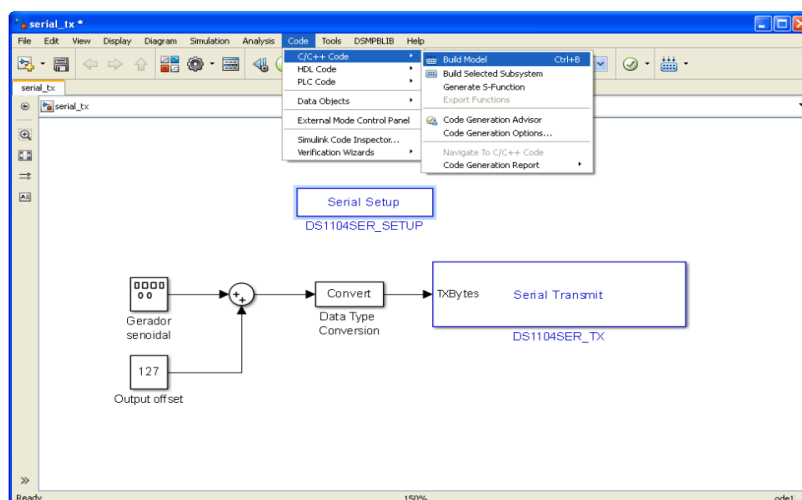
Fonte: Produção do próprio autor.

Conforme pode ser observado na Figura 13, o sinal senoidal é enviado a um bloco chamado *Serial Transmit* (DS1104SER_TX), esse bloco possibilita que o circuito a ser embarcado no dSPACE envie o sinal para uma saída, que nesse projeto será uma porta serial RS232 do microcontrolador. O bloco *Convert*, converte o sinal senoidal, que é um tipo float, em um tipo binário, permitindo a transmissão serial.

Passo 2: Compilação do circuito

O Simulink oferece uma ferramenta que possibilita a compilação do código em C e a geração de um arquivo no formato SDF, caso não existam erros no circuito. Esse arquivo gerado será usado no passo 3. O caminho da ferramenta de compilação é apresentado na Figura 14.

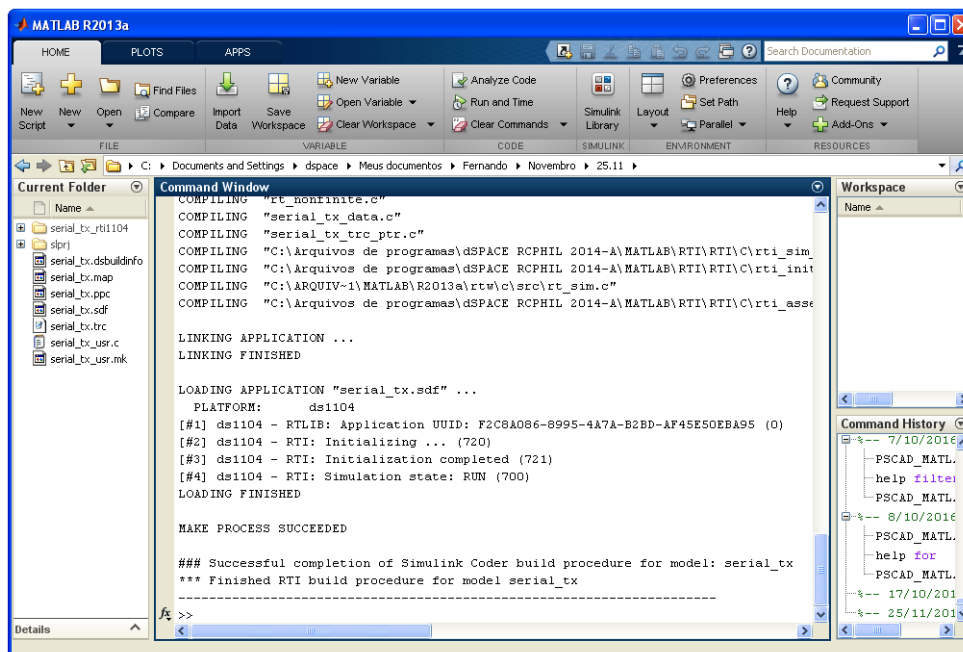
Figura 14 – Caminho no Simulink para a compilação do circuito



Fonte: Produção do próprio autor.

O resultado da compilação no MatLab é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Resultado no MatLab da compilação do circuito



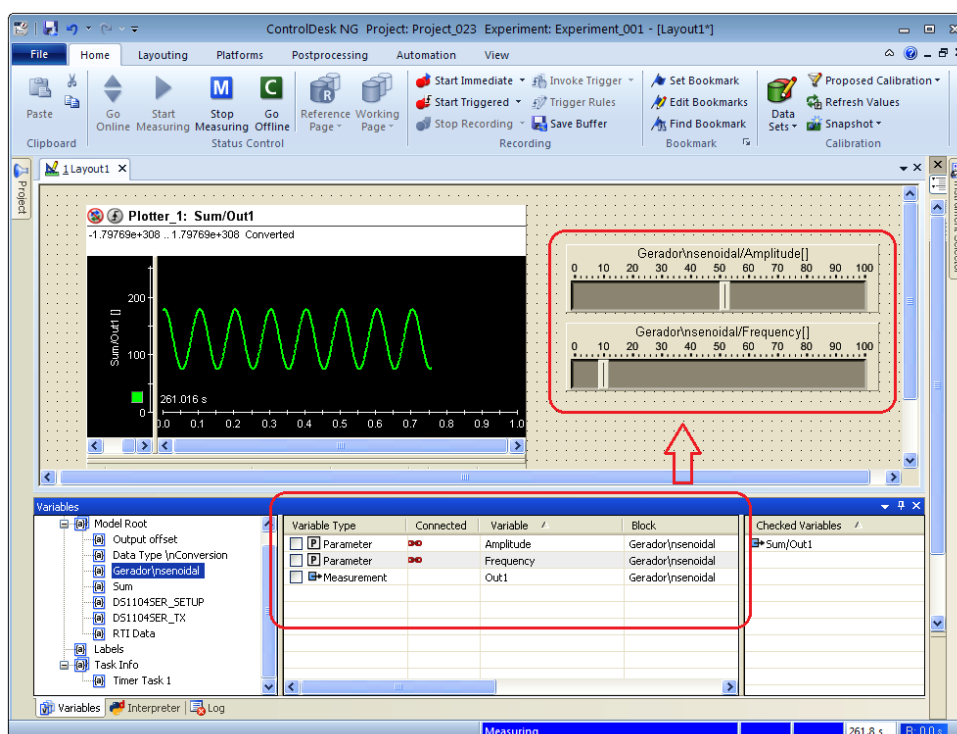
Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 15, o MatLab informou que o processo foi executado com sucesso, logo, o “arquivo.sdf” foi gerado. Ressalta-se que esse processo só é possível de ser realizado quando no ControlDesk® o dSPACE se encontra *off-line*, caso contrário a compilação sempre apresentará erros.

Passo 3: Embarque do arquivo.sdf no dSPACE

É criado um projeto do ControlDesk® e o mesmo requer a inserção do arquivo.sdf nele. Após isso, é possível criar no *software* todo um instrumental para que seja possível alterar os parâmetros do gerador senoidal e acompanhar as formas de onda, como apresentado na Figura 16. Para que o microcontrolador entre em modo operante é necessário clicar na opção “Go Online”, disponível no *menu* do ControlDesk®.

Figura 16 – Forma de onda e os parâmetros do circuito embarcado passíveis de mudança no ControlDesk®



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 16, os parâmetros do gerador senoidal são relacionados aos *sliders* na interface de simulação.

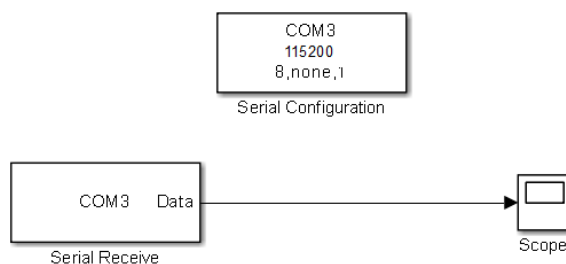
Passo 4: Recepção no Simulink do sinal gerado no dSPACE

A etapa anterior concluiu o embarque do circuito no dSPACE, já esta etapa, configura a implementação da comunicação no sentido dSPACE → Simulink.

Salienta-se que já existe uma comunicação natural entre o computador e o dSPACE, a mesma que permite que o ControlDesk® seja executado desse computador e os arquivos SDF embarcados no dSPACE. Porém, o que se deseja nessa etapa, é firmar uma comunicação dSPACE → Simulink, no qual os sinais gerados pelos circuitos embarcados no segundo sejam recebidos pelo primeiro. A comunicação será realizada através de um cabo conectando a porta RS232 do dSPACE a uma entrada USB (*Universal Serial Bus*) do PC.

Para a recepção do sinal proveniente da porta RS232 no Simulink, o procedimento realizado é a criação de uma nova simulação. Ela contém um bloco de recepção serial e um bloco de *display* que mostra o sinal de entrada, como apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Circuito para recepção do sinal proveniente do dSPACE

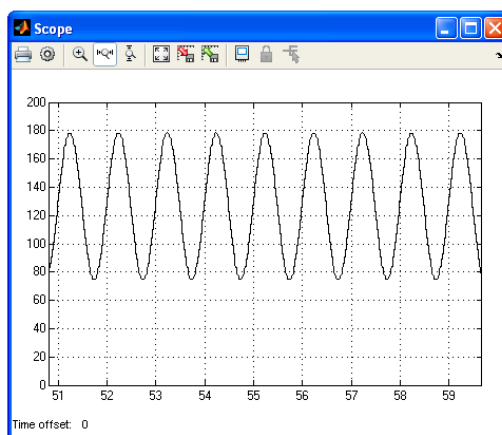


Fonte: Produção do próprio autor.

O bloco *Serial Configuration* permite configurar as taxas da recepção serial, além disso, COM3 se refere à porta de comunicação aberta para o serial no computador. O bloco *Scope* permite visualizar o sinal recebido.

Configura-se a taxa de transmissão (*baud rate*) do bloco serial de modo que ele tenha a mesma taxa de transmissão do circuito embarcado. Nesse caso, é utilizada em ambas uma taxa de 115.200 bps (bits por segundo). O sinal de entrada que o Simulink recebe é mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Sinal recebido pelo Simulink



Fonte: Produção do próprio autor.

Concluídas as quatro etapas, a comunicação no sentido dSPACE → Simulink foi implementada. Ressalta-se que todas as simulações foram executadas no modo *Fixed Step*, com *sample time* (tempo de amostra) de 0,001s.

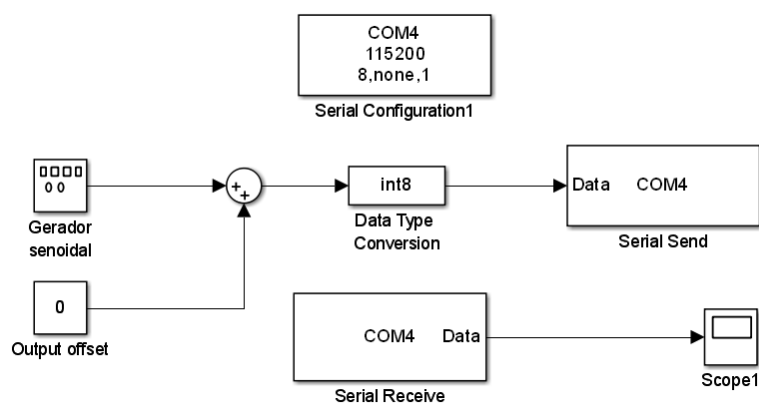
5.3 Comunicação Simulink ↔ dSPACE

O desenvolvimento do sentido de comunicação dSPACE → Simulink foi primordial para que, neste subcapítulo, fosse estabelecida a comunicação simultânea entre as duas plataformas.

A configuração da comunicação entre as duas plataformas foi obtida através do envio de um sinal senoidal a partir do Simulink para o dSPACE, e o retorno deste mesmo sinal para o Simulink. Novamente, essa comunicação só pode ser implementada se a configuração dos blocos senoidais, tanto do circuito do Simulink como do circuito embarcado no dSPACE, apresentar a mesma taxa de transmissão.

O circuito que inclui a geração do sinal senoidal, envio e recepção do sinal vindo do dSPACE é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Circuito do Simulink para geração do sinal senoidal, envio e recepção



Fonte: Produção do próprio autor.

O circuito que será embarcado no dSPACE e tem como função apenas receber e enviar de volta o sinal é apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Circuito embarcado no dSPACE para transmissão e recepção

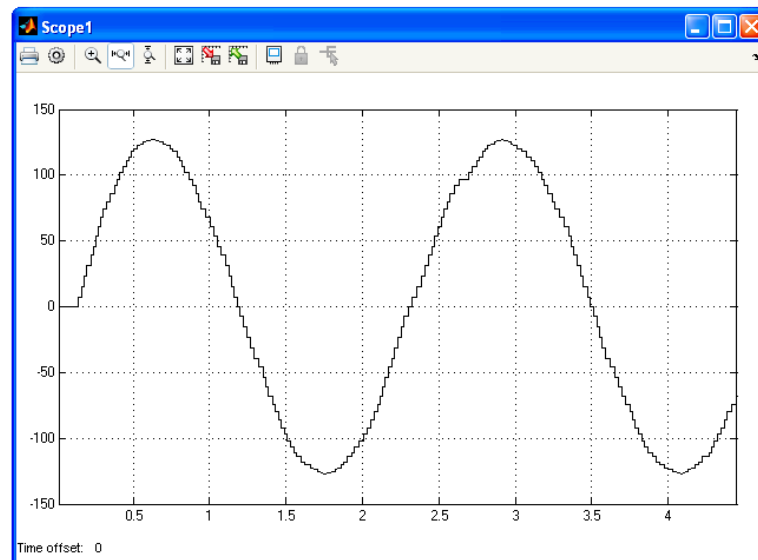


Fonte: Produção do próprio autor.

Os blocos DS1104SER_TX e DS1104SER_RX são específicos do dSPACE e representam a utilização da comunicação serial nessa plataforma. Já o bloco DS1104SER_SETUP é utilizado para configurar a transmissão e recepção: taxas de transmissão e bloqueio em caso de *overload*.

Após o envio e recepção, o sinal recebido do dSPACE no Simulink encontra-se na Figura 21.

Figura 21 - Sinal recebido do dSPACE no Simulink



Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que nessa comunicação ida e volta, a onda recebida pouco se distorceu no caminho, esse fato se deve a uma sincronização satisfatória entre Simulink e dSPACE.

Todas as vezes que uma simulação foi executada, houve a necessidade de utilizar a opção “*Clear Flash*” no ControlDesk®, tal opção limpa a memória *flash* do dSPACE e possibilita que não sejam carregados valores antigos na simulação atual.

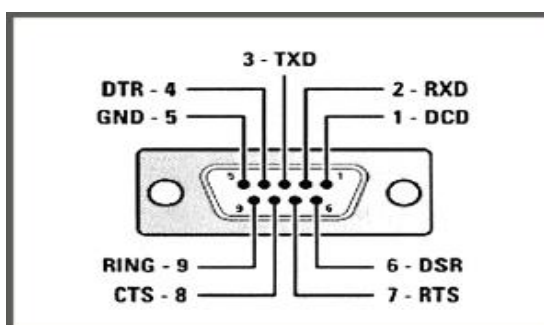
Concluída essa etapa, a plataforma HIL está pronta.

5.4 Comunicação RS232

A comunicação serial é definida pela transferência de dados bit a bit, isto é, um de cada vez, e é utilizada para a comunicação entre um computador e outros dispositivos (KIOSKEA, 2014).

A comunicação serial faz-se de maneira assíncrona, o que significa que nenhum sinal de sincronização (*clock*) é necessário: os dados podem ser enviados a intervalos de tempo arbitrários. Por outro lado, o periférico deve ser capaz de distinguir os caracteres (um caractere tem um comprimento de 8 bits) entre a sequência de bits que lhe é enviada. É a razão pela qual neste tipo de transmissão, cada caractere é precedido de um bit de início (chamado bit *START*) e um bit de fim (bit *STOP*). Estes bits de controle, necessários para uma transmissão serial, desperdiçam 20% da banda concorrida: para 10 bits enviadas, 8 servem para codificar o caractere e 2 servem para assegurar a recepção (KIOSKEA, 2014). A Figura 22 apresenta a pinagem de uma porta RS232.

Figura 22 - Pinagem da porta RS232



Fonte: INSTRUMENTIC, 2016.

O Quadro 2 descreve os pinos da porta RS232.

Quadro 2 – Pinagem da porta RS232

Pino	Nome	Descrição
1	DCD	Portadora detectada (Usado em comunicação com Modems)
2	RXD	Recepção de dados
3	TXD	Transmissão de dados
4	DTR	Solicitação de permissão para envio de dados
5	GND	Terra
6	DSR	Verificação de permissão para recepção de dados
7	RTS	Solicitação de permissão para envio de dados
8	CTS	Verificação de permissão para recepção de dados
9	RING	Indicador de chamada (Usado para comunicação com Modems)

Fonte: C20, 2012.

6 APLICAÇÃO DA PLATAFORMA HIL EM UM CONVERSOR *BUCK-BOOST*

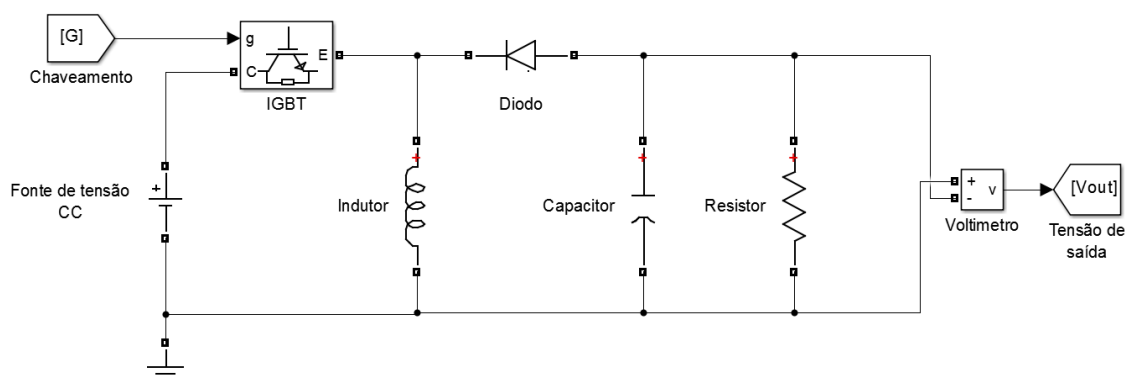
O capítulo anterior teve como objetivo definir as estruturas da plataforma *Hardware-in-the-Loop* utilizada nesse projeto. O capítulo a seguir é destinado a moldar toda a configuração descrita no capítulo anterior para aplicação a um conversor *Buck-Boost*.

6.1 Simulação do conversor *Buck-Boost* via *software*

Como já mencionado neste trabalho, a etapa que antecede à confecção de uma simulação em uma plataforma HIL é a simulação dos processos via *software*. Através do Simulink, foi simulado por completo o conversor *Buck-Boost*, isto é, tanto o circuito de potência quanto o circuito de controle de chaveamento foram executados a partir de uma mesma simulação.

O circuito de potência do conversor é apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Circuito de potência do conversor *Buck-Boost*



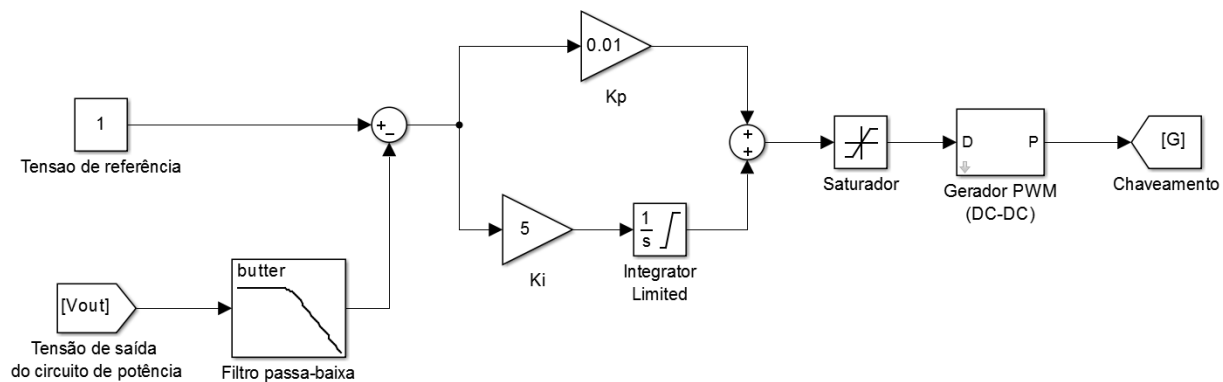
Fonte: Produção do próprio autor.

No circuito de potência foram utilizados os seguintes valores:

- Fonte de tensão CC: $V_{in} = 5 \text{ V}$
- Indutor: $L = 150 \text{ } \mu\text{H}$
- Capacitor: $C = 0,22 \text{ mF}$
- Resistor: $R = 1 \text{ } \Omega$

O circuito de controle do chaveamento do conversor é apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Circuito de controle do chaveamento do conversor *Buck-Boost*

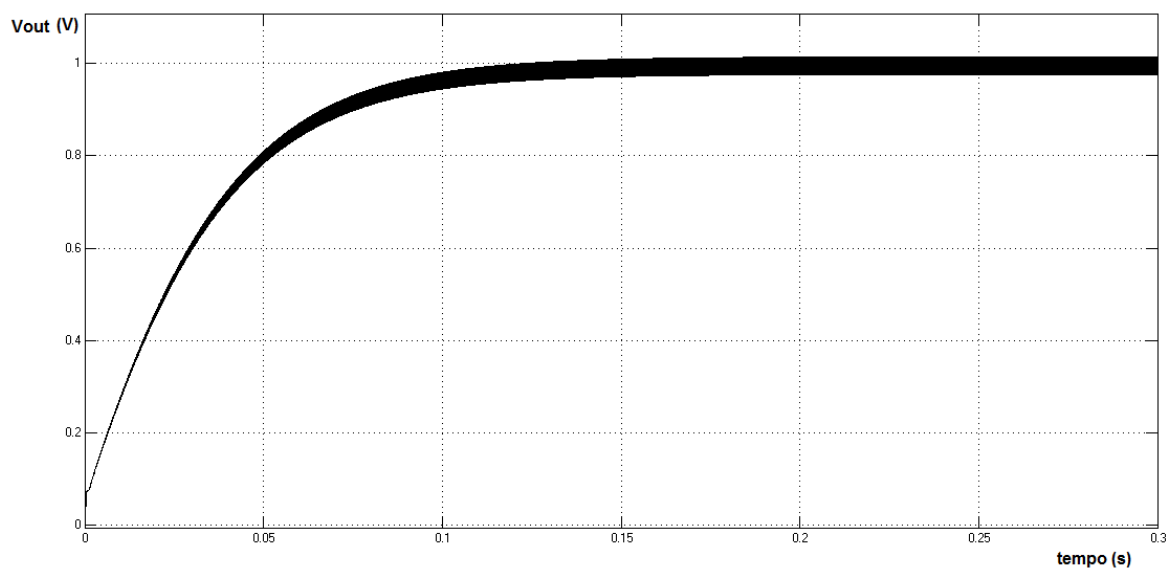


Fonte: Produção do próprio autor.

O bloco Gerador PWM está trabalhando numa frequência de chaveamento de 20 kHz. A Tensão de Referência do chaveamento é igual a 1 V.

O sinal tensão de saída do conversor é apresentado na Figura 25.

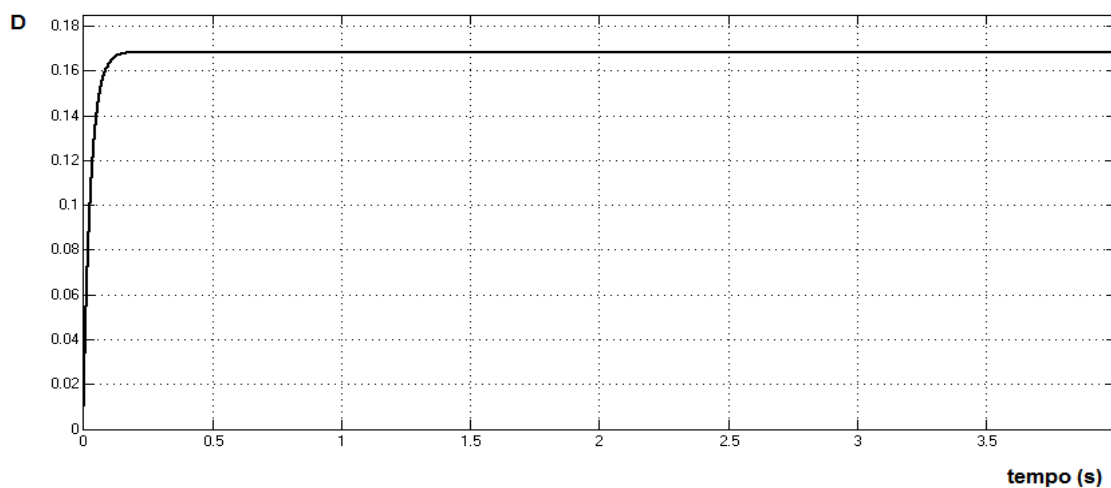
Figura 25 - Sinal de tensão de saída do conversor *Buck-Boost* na simulação via *software*



Fonte: Produção do próprio autor.

O sinal de *duty cycle* (D) que entra no bloco Gerador PWM é apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Sinal de *duty cycle* do circuito de controle de chaveamento



Fonte: Produção do próprio autor.

Tanto a tensão de saída quanto o sinal de *duty cycle* se estabilizam a partir de um determinado tempo: 0,15 segundos.

Com a simulação via *software* funcionando perfeitamente, o próximo passo é atender ao propósito desse trabalho e embarcar o *Buck-Boost* na plataforma HIL desenvolvida.

6.2 Embarque do conversor *Buck-Boost* na plataforma HIL desenvolvida

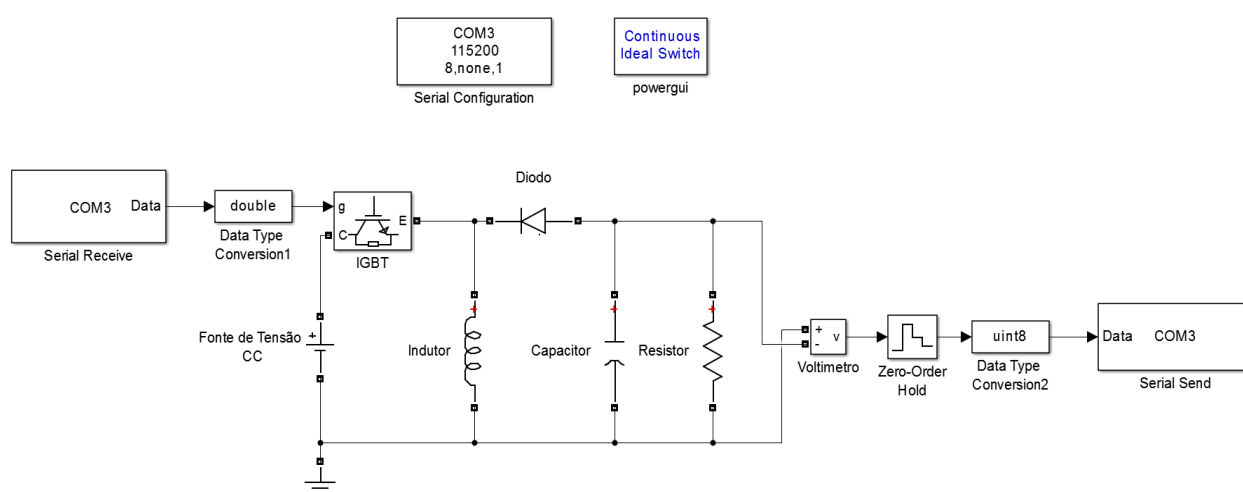
Nesta etapa do trabalho, a plataforma HIL já foi estabelecida, além de já ter sido obtida uma simulação do conversor via *software* para servir de modelo e referência para a aplicação do HIL no projeto.

O conversor *Buck-Boost* embarcado pode ser dividido em dois circuitos: circuito de potência e circuito de controle.

O circuito de potência é executado no Simulink e pode ser considerado uma bancada virtual. Nele, o projetista tem a liberdade de alterar parâmetros como resistência, capacitância e

indutância e observar a resposta dessas mudanças no sinal de saída. A vantagem de se trabalhar com uma bancada virtual é, em primeiro lugar, promover a segurança para os operadores e desenvolvedores, visto que, trabalhar com um circuito em fase de testes operando a potências muito altas pode ser uma exposição perigosa. Em segundo lugar, a bancada virtual proporciona uma considerável redução de custos, devido ao fato de que, em fase de testes, uma infinidade de componentes eletrônicos pode ser queimada. A bancada virtual, isto é, o circuito de potência do conversor, é apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Circuito de potência do conversor *Buck-Boost*

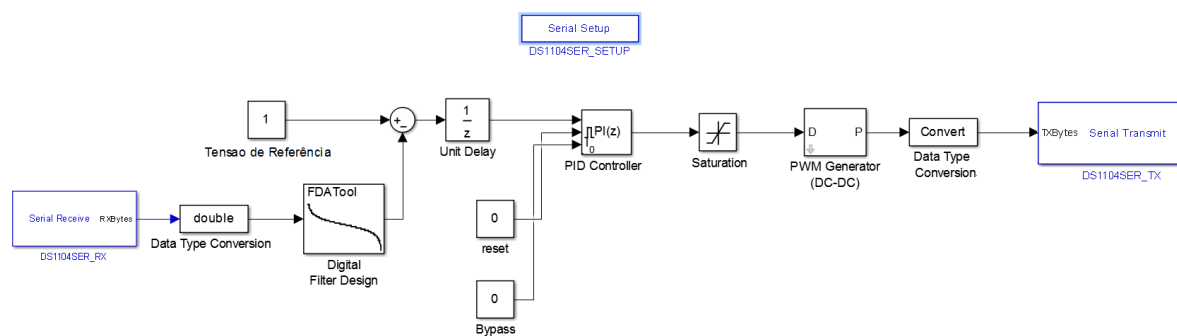


Fonte: Produção do próprio autor.

Em uma bancada física, qualquer operação envolvendo eletricidade irá ocorrer em tempo contínuo, e por esse motivo, a bancada virtual é simulada também em tempo contínuo, para agregar mais fidelidade aos resultados. Ressalta-se a inclusão do bloco *Zero-Order-Hold*, cuja função é discretizar o sinal de saída, ou seja, colher amostras de tempo em tempo para gerar o mesmo sinal, porém com finitos pontos. Tal discretização é realizada devido ao fato de o dSPACE só operar em tempo discreto, logo, seu sinal de entrada também deve ser. A taxa de amostragem é de 2 kHz. O bloco *Data Type Conversion2* (uint8) transforma o sinal do tipo *double* em um sinal do tipo uint8. Já o bloco *double* faz justamente o contrário do bloco anterior.

O circuito embarcado no dSPACE será o controle de chaveamento do conversor, ele é apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Circuito de controle de chaveamento do conversor *Buck-Boost*



Fonte: Produção do próprio autor.

Esse circuito recebe o sinal de saída discretizado da bancada virtual e devolve a este o sinal de chaveamento para o IGBT. O gerador de PWM realiza o chaveamento a uma frequência de 20 kHz. A Tensão de Referência é igual a 1 V.

Os valores dos ganhos do controlador PID (Proporcional Integrador Derivativo) foram obtidos empiricamente, sua principal função é definir a velocidade de processamento do circuito de chaveamento, além de definir algumas características desejáveis como estabilidade do sinal e tempo de resposta. Essa velocidade deve ser condizente para que o circuito embarcado consiga processar dentro de um tempo cabível para que o a plataforma HIL não perca o processamento em tempo real. Em outras palavras, caso o PID seja ajustado com ganhos indevidos, o circuito de chaveamento irá despender um determinado tempo que colocará a bancada virtual em modo de espera do sinal de chaveamento, perdendo assim, o processamento em tempo real. Nesse circuito, o ganho proporcional é igual a 0,001 e o ganho integrativo é igual a 0,005. Nesse bloco do PID também é possível, no ControlDesk®, resetar o valor de saída dele ou definir um valor fixo para ela, isso é útil para realizar testes no chaveamento quando o sinal de entrada se encontra indisponível.

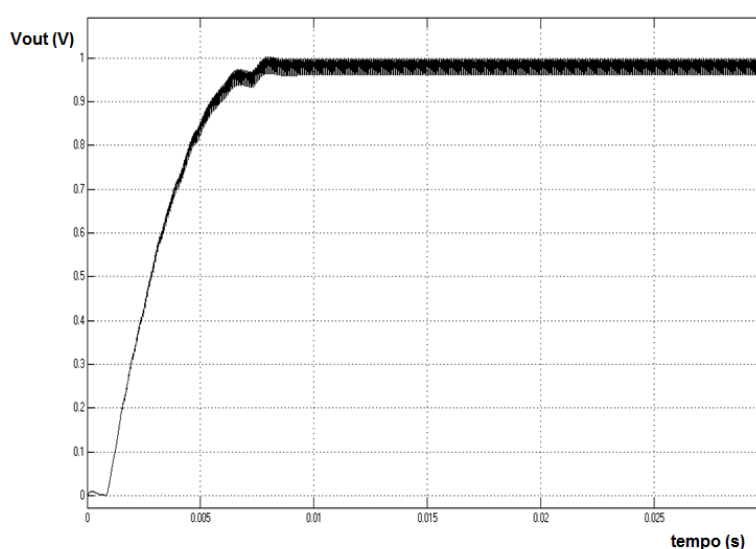
Os blocos de *Data Type Conversion* são utilizados para conversão de sinal no formato *double* para formato binário e vice-e-versa. O bloco *Unit Delay* é utilizado para inserir um atraso de

um período de amostra no sinal. Esse atraso é de suma importância para sincronizar o sinal que entra no circuito com o sinal que retorna para o circuito de potência.

Os circuitos de potência e controle são executados simultaneamente, porém o de controle é iniciado primeiro devido ao fato das condições iniciais no circuito de potência serem nulas na partida: corrente no indutor e tensão no capacitor iguais a zero.

A plataforma *Hardware-in-the-Loop* encontra-se nessa etapa em funcionamento. O sinal de tensão de saída do circuito de potência é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Sinal de tensão de saída do conversor *Buck-Boost* na simulação HIL

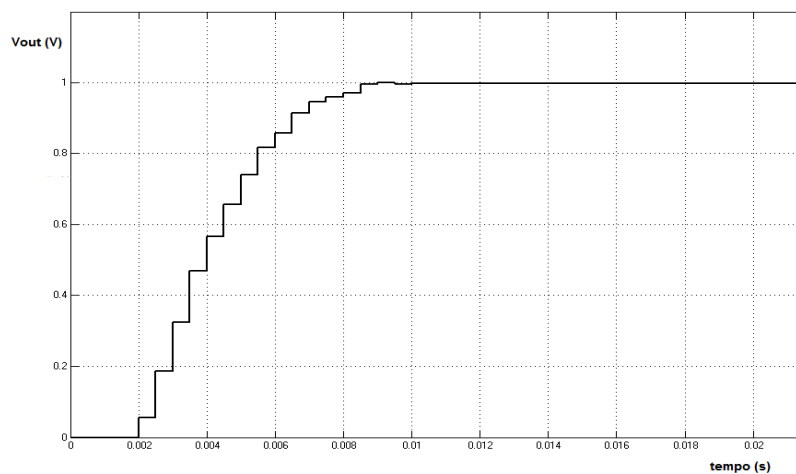


Fonte: Produção do próprio autor.

A forma de onda da tensão de saída na simulação HIL possui um desenvolvimento muito próximo da forma de onda da simulação via *software*. Ressalta-se que na simulação HIL a onda necessita de menos tempo para se estabilizar na tensão de referência devido ao fato de o dSPACE utilizar sinal em tempo discreto no circuito de controle, enquanto na simulação via *software* o tempo é contínuo tanto no circuito de controle quanto no de potência.

A forma de onda da tensão de saída do circuito de potência amostrada pelo bloco *Zero-Order-Hold* é apresentada na Figura 30.

Figura 30 - Forma de onda da tensão de saída do circuito de potência amostrada pelo bloco Zero-Order-Hold

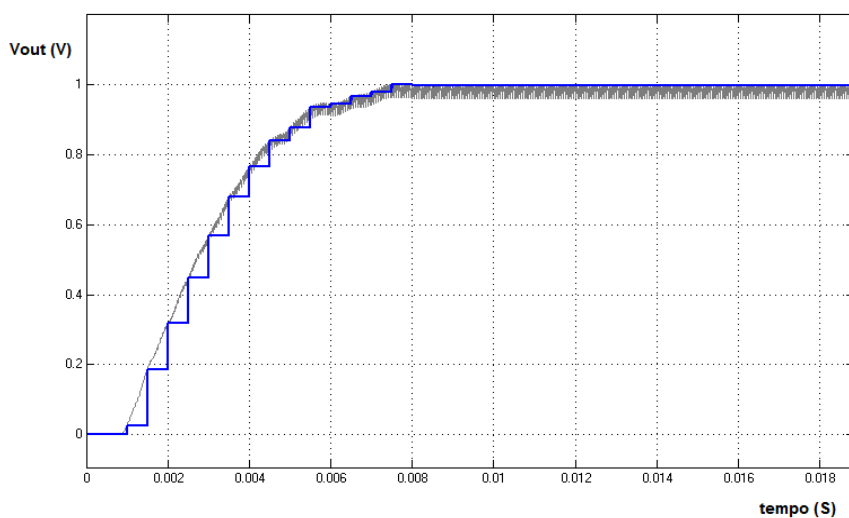


Fonte: Produção do próprio autor.

O circuito embarcado foi executado no modo *Fixed Step*, com *sample time* (tempo de amostra) de 0,05 ms. Essa amostragem num intervalo de tempo baixo permite que haja maior precisão nos sinais gerados, pois será utilizada uma quantidade maior de amostras e com isso, os sinais gerados serão muito mais detalhados. Além disso, a comunicação entre computador (bancada virtual) e dSPACE (controle do chaveamento) é realizada por meio do cabo serial RS232.

A Figura 31 apresenta um paralelo entre o sinal de tensão de saída no tempo contínuo (cinza) e o sinal de tensão de saída no tempo discreto (azul).

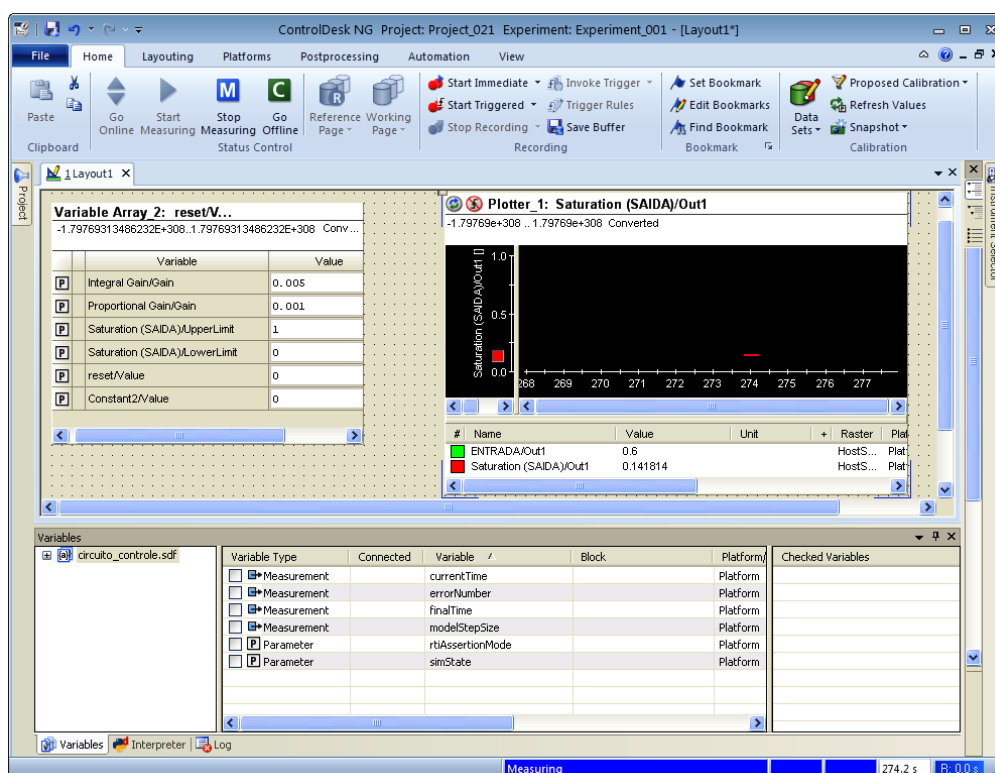
Figura 31 - Paralelo entre os sinais de tensão de saída nos tempos contínuo e discreto



Fonte: Produção do próprio autor.

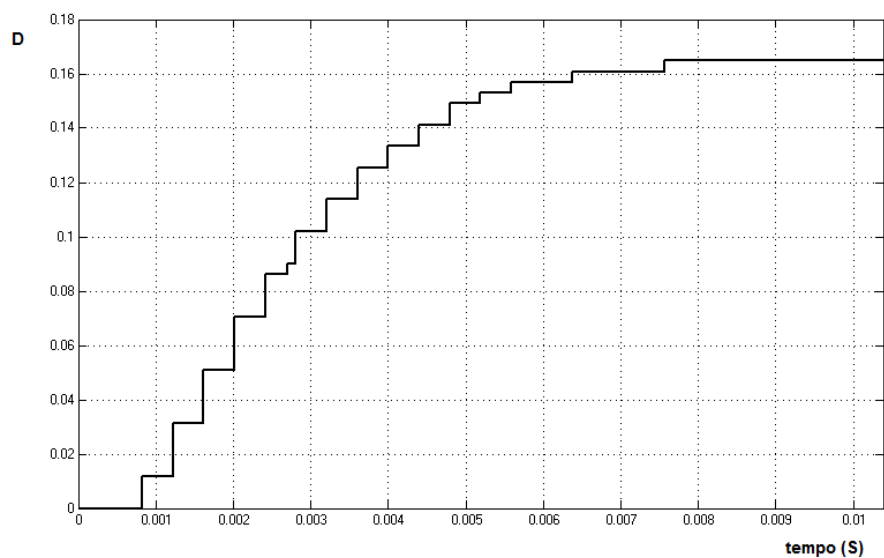
Durante toda a configuração da plataforma HIL, foi necessário construir no ControlDesk® uma interface que permitisse analisar os sinais que chegavam e saíam do dSPACE, além de permitir a mudança de certos parâmetros do circuito de controle. A interface da simulação no ControlDesk® é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Interface no ControlDesk® da simulação do circuito embarcado no dSPACE



Fonte: Produção do próprio autor.

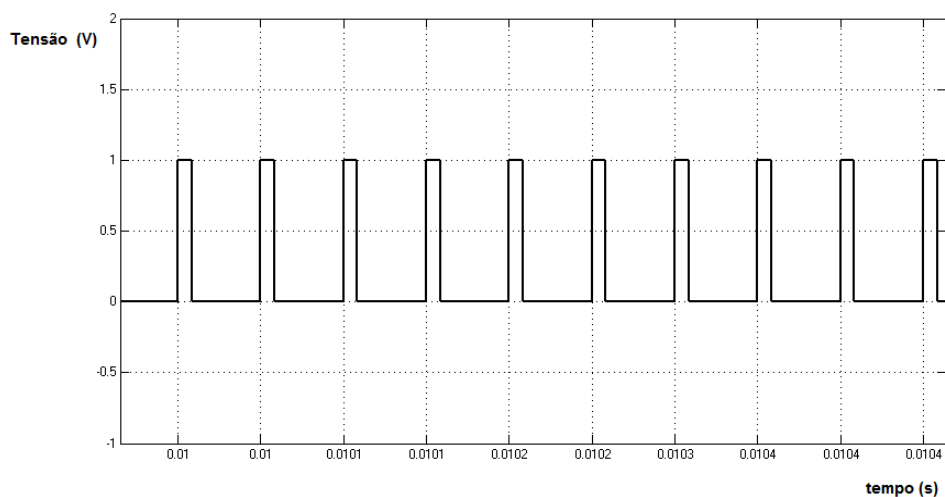
O sinal de entrada do bloco PWM Generator, isto é, o *duty cycle*, é mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Sinal do *duty cycle* do PWM

Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que o *duty cycle* estabiliza-se em $D = 0,165$. Após a sua estabilização, o sinal de tensão de saída tende a se estabilizar também. O *duty cycle* influencia diretamente no formato de onda do PWM, que irá chavear o IGBT. O formato de onda do PWM é apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Tensão de saída do PWM



Fonte: Produção do próprio autor.

Em conclusão, o conversor *Buck-Boost* foi embarcado de maneira satisfatória na plataforma *Hardware-in-the-Loop*. O subcapítulo seguinte apresenta outras simulações da plataforma.

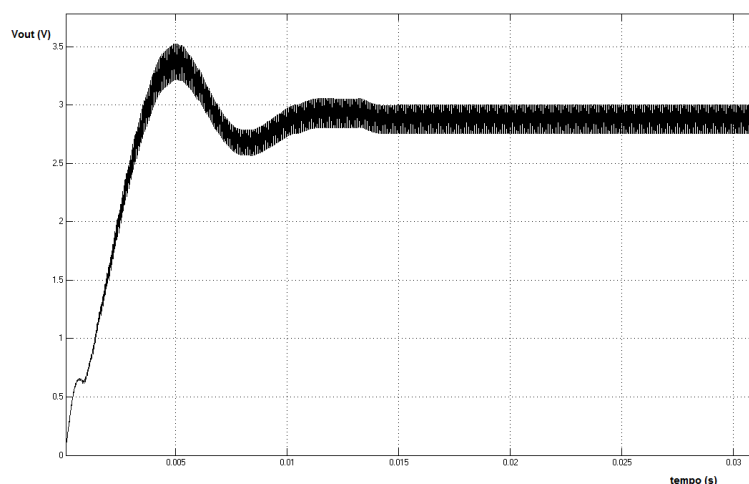
6.3 Simulações complementares

Outras simulações foram executadas na plataforma HIL a fim de testar o seu funcionamento e a comprovar que o conversor pudesse trabalhar tanto no modo *Buck* como no modo *Boost*.

6.3.1 Simulação 1

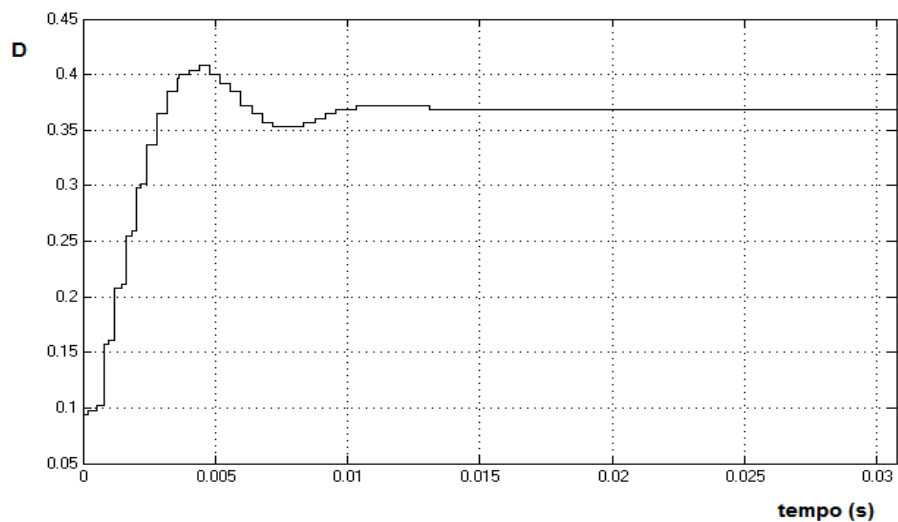
Nessa simulação, foi mudado o valor da Tensão de Referência para 3 V. O circuito ainda trabalhará no modo *Buck* (abaixador), pois a tensão de entrada do circuito de potência continua sendo 5 V. A Figura 35 apresenta a tensão de saída do conversor.

Figura 35 - Sinal de tensão de saída do conversor *Buck-Boost* na simulação HIL para $V_{ref} = 3V$



Fonte: Produção do próprio autor.

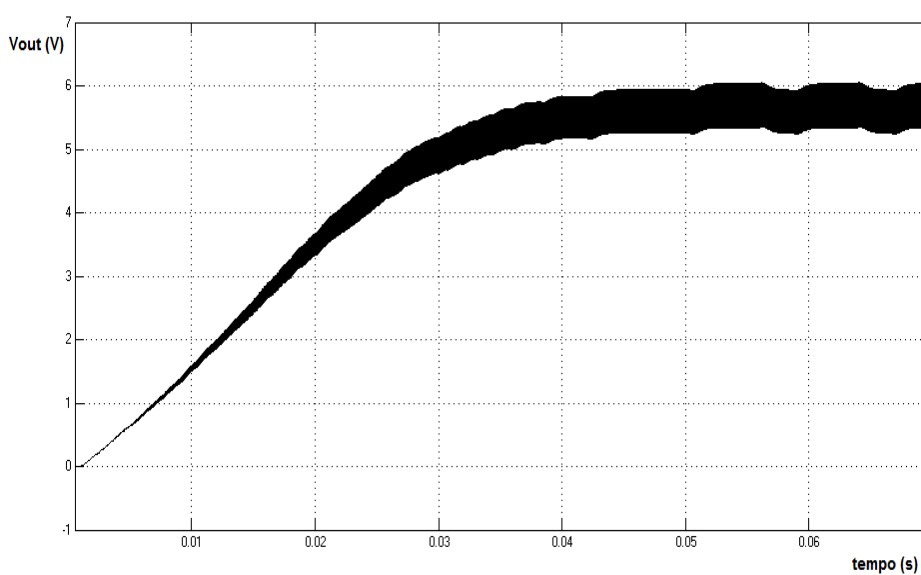
A Figura 36 apresenta o sinal de entrada do bloco *PWM Generator*, isto é, o *duty cycle*.

Figura 36 - Sinal do *duty cycle* do PWM para $V_{ref} = 3\text{ V}$ 

Fonte: Produção do próprio autor.

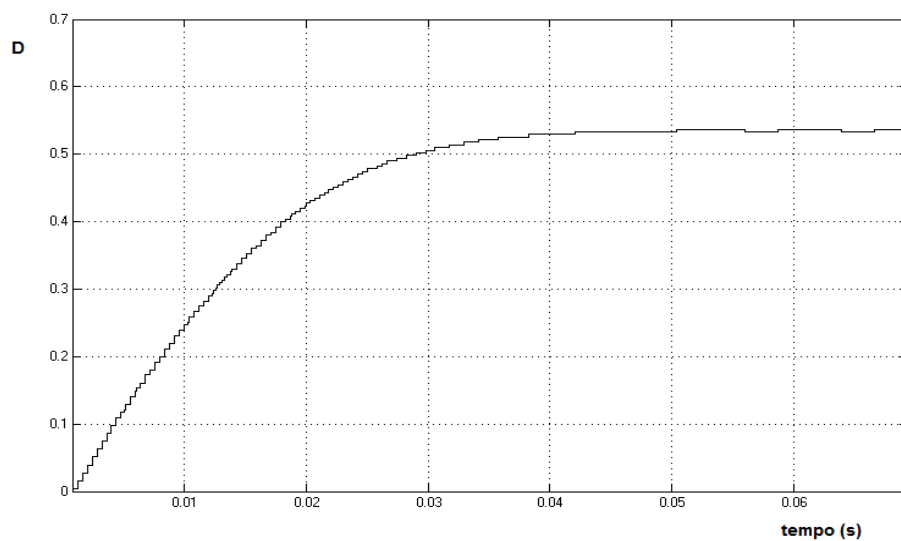
6.3.2 Simulação 2

Nessa simulação, foi mudado o valor da Tensão de Referência para 6 V, logo, o conversor trabalhará no modo *Boost* (elevador). A Figura 37 apresenta a tensão de saída do conversor.

Figura 37 - Sinal de tensão de saída do conversor *Buck-Boost* na simulação HIL para $V_{ref} = 6\text{ V}$ 

Fonte: Produção do próprio autor.

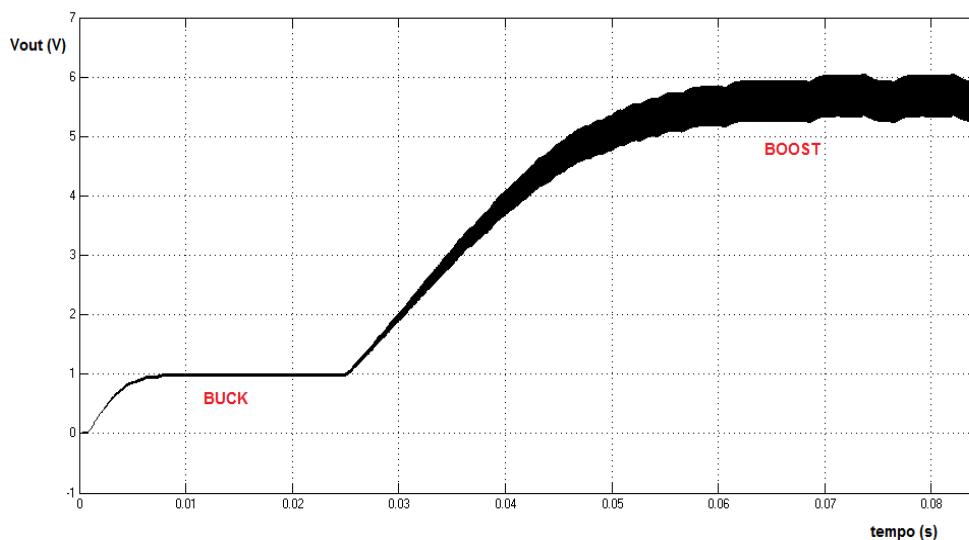
A Figura 38 apresenta o sinal de *duty cycle* dessa simulação.

Figura 38 - Sinal do *duty cycle* do PWM para $V_{ref} = 6\text{ V}$ 

Fonte: Produção do próprio autor.

6.3.3 Simulação 3

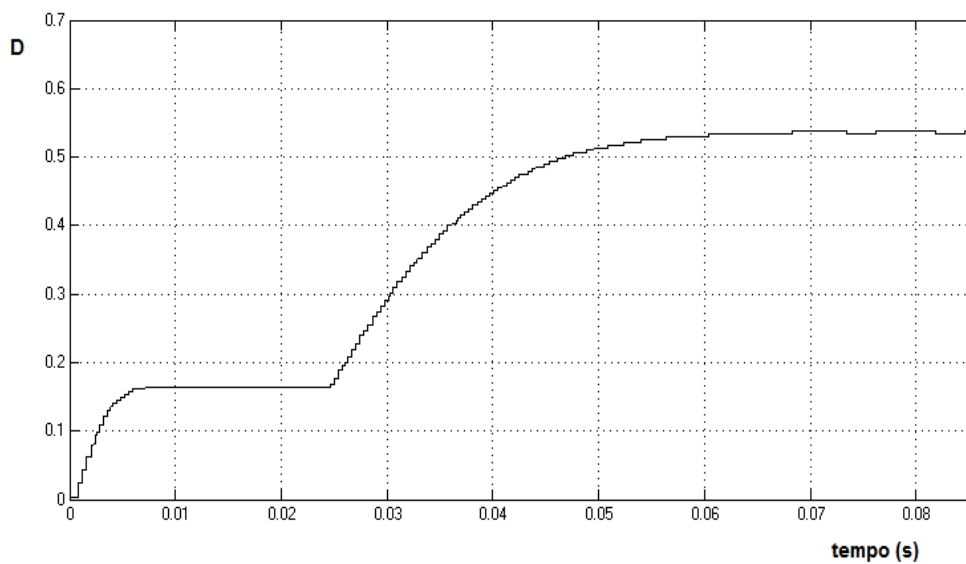
Nessa simulação foi requisitado que o conversor alternasse, em uma mesma simulação, do modo *Buck* para o modo *Boost*. A Figura 39 apresenta a tensão de saída do conversor.

Figura 39 - Sinal de tensão de saída do conversor *Buck-Boost* na simulação HIL para $V_{ref} = 1\text{ V}$ (*Buck*) e $V_{ref} = 6\text{ V}$ (*Boost*)

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 40 apresenta o sinal de *duty cycle* dessa simulação.

Figura 40 - Sinal do *duty cycle* do PWM para $V_{ref} = 1\text{ V}$ e $V_{ref} = 6\text{ V}$



Fonte: Produção do próprio autor.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvida uma plataforma de comunicação e controle denominada *Hardware-in-the-Loop* e nesta plataforma foi embarcada uma simulação de um conversor *Buck-Boost*, com isso, o objetivo deste trabalho foi alcançado. Ao longo deste trabalho, foram citadas inúmeras vantagens de uma simulação em HIL, porém são duas que se destacam das demais e definem a importância dessa técnica na elaboração de protótipos: segurança e custo.

Este trabalho se propôs a criar uma sequência de passos para que futuros pesquisadores encontrem mais facilidade em trabalhar com o conjunto Simulink e dSPACE. A partir da conclusão deste Projeto de Graduação, espera-se que esse trabalho torne mais simples tarefas envolvendo o que foi abordado aqui. Além disso, uma simulação em HIL de um *Buck-Boost* pode ser também ser usada em disciplinas como Eletrônica de Potência, facilitando a aplicação de conceitos abordados nelas.

A aplicação da plataforma HIL em Eletrônica de Potência pode se estender futuramente para outros campos, envolvendo a aplicação em outros tipos de conversores, como os multiníveis. Por definição, um conversor multinível é um sistema de conversão de energia composto por um vetor de semicondutores de potência e fontes de tensão capacitivas que, quando conectada e controlada de forma apropriada, pode gerar formas de onda de tensão de múltiplos degraus com frequência, fase e amplitude controláveis. (RODRIGUEZ et al, 2009). Os conversores multiníveis apresentam inúmeras vantagens sobre os conversores convencionais, tais como: capacidade de sintetizar níveis de tensões de saída maiores, utilização de dispositivos semicondutores de menor potência, apresentação de maior número de níveis na tensão de saída resultando assim numa forma de onda com um conteúdo harmônico reduzido, redução do estresse de tensão nas chaves semicondutoras e redução de frequência de chaveamento em cada componente (HAGIWARA e AKAGI, 2008).

Em uma aplicação da plataforma HIL em conversores multiníveis, a utilização de uma FPGA (*Field Programmable Gate Array*), circuito integrado com portas lógicas programáveis, pode conferir a plataforma um ganho em quesitos de processamento, devido a sua dinamicidade. Incluir uma FPGA como outro elemento na comunicação do HIL é interessante também pela possibilidade de destinar uma função específica a ela, no caso, a geração do PWM. Em

resumo, a inclusão da FPGA possibilitaria não somente a simulação de mais modelos, de outras diversas áreas da Engenharia, mas uma plataforma HIL ainda mais completa e robusta, capaz de produzir resultados ainda melhores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, A. **Eletrônica de potência**. São Paulo, SP. Prentice Hall. 479 p. 2000.

AHMED, M. et al. **Sliding Mode Control for Buck-Boost Converter Using Control Desk dSPACE**. Finland. 2003.

ALBUQUERQUE, A. R. L. **A técnica de Hardware-in-the-loop no auxílio de projetos mecatrônicos**. Mecatrônica Atual. Ano 6. Edição 35. Set 2007. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/770-a-tenica-de-hardware-in-the-loop-no-auxilio-de-projetos-mecatronicos>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

ANACOM. **Testes em ECUs com sistemas Hardware-In-The-Loop dSPACE**. 2016. Disponível em: <<http://www.anacom.com.br/pt-br/noticias/616-testes-em-ecus-com-sistemas-hardware-in-the-loop-dspace.html>>. Acesso em: 27 out. 2016.

ANDERSON, O. **A Design Tool (Research and Development) Simulator Survey Report**. [S.l.], 1962.

BADARUDDIN, K. S.; HERNANDEZ, J. C.; BROWN, J. M. **The importance of hardware-in-the-loop testing to the cassini mission to Saturn**. In: IEEE. Aerospace Conference. [S.l.], 2007. p. 1–9.

BARBI, I.; MARTINS, D. C. **Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados**. Florianópolis Ed. do Autor. 377 p. 2006.

BORGES, E.L.; BORGES, M.A.F.; BARANAUSKAS, M.C.C. **Da simulação à Criação de Modelos — Um Contexto para a Aprendizagem na Empresa**. Proceedings of the VI SBIE — Simpósio Brasileiro de Informática na Educação, Florianópolis, SC, Brasil. 1995.

C20. **Portas Seriais e Comunicação Serial**. 2012. Disponível em: <<http://www.c2o.pro.br/automacao/x834.html>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

DROSDOL, J.; KADING, W.; PANIK, F. **The daimler-benz driving simulator**. Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis, v. 14, n. 1-3, p. 86–90, 1985.

DSPACE. 2016. **ControlDesk Product Information**. Disponível em: <https://www.dspace.com/shared/data/bkm/CDNG_en/#>. Acesso em: 30 out. 2016.

DSPACE. **DS1104 R&D Controller Board: Hardware Installation and Configuration**. 2004. Disponível em:
<https://nees.org/data/download/NEES-2011-1076/Experiment-4/Documentation/DS1104_config.pdf>. Acesso em: 30 out. 2016.

FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. **The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education**. Journal of Engineering Education, January, 2005, p. 121-130.

GU, F.; HARRISON, W. S.; TILBURY, D. M.; YUAN. **Hardware-In-The-Loop for Manufacturing Automation Control: Corrent Status and Identified Needs**. 2007.

HALVORSEN, H.P. **Hardware-in-the-Loop Simulation**. University College of Southeast Norway. 2012. Disponível em:
<[http://home.hit.no/~hansha/documents/lab/Lab%20Work/HIL%20Simulation/Background/II Introduct%20to%20HIL%20Simulation.pdf](http://home.hit.no/~hansha/documents/lab/Lab%20Work/HIL%20Simulation/Background/II%20Introduct%20to%20HIL%20Simulation.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2016.

IAZZETTA, F. **Áudio Digital**. 2008. Disponível em:
<http://www2.eca.usp.br/prof/iazzetta/tutor/audio/a_digital/a_digital.html>. Acesso em: 22 nov. 2016.

ISERMANN, R.; SCHAFFNIT, J.; SINSEL, S. **Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems**. Control Engineering Practice, Elsevier, v. 7, n. 5, p. 643–653, 1999.

INSTRUMENTIC. **RS232**. 2016. Disponível em:
<<http://www.instrumentic.info/pt/cabo-rs232.html>>. Acesso em: 01 nov. 2016.

KYOSKEA. **A porta série e a porta paralela**. Junho. 2014. Disponível em:
<<http://br.ccm.net/contents/407-a-porta-serie-e-a-porta-paralela>>. Acesso em: 18 nov. 2016.

LU, B. et al. **A low-cost real-time hardware-in-the-loop testing approach of power electronics controls**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE, v. 54, n. 2, p. 919–931, 2007.

LU, B.; MONTI, A.; DOUGAL, R. **Real-time hardware-in-the-loop testing during design of power electronics controls**. In Proc. IEEE IECON, Nov. 2003, vol. 2, pp. 1840–1845.

MACIEL, B. C. O. et al. **Simulação em tempo real de veículos aéreos não tripulados**. Anais do 12º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XII ENCITA. 2006.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W.P. **Power electronics: converters, applications, and design.** New York. John Wiley & Sons. 802p. 2003.

PALLADINO, A.; FIENGO, G.; LANZO, D. **A portable hardware-in-the-loop (hil) device for automotive diagnostic control systems.** ISA transactions, Elsevier, v. 51, n. 1, p. 229–236, 2012.

PETERSON, G. D.; FEISEL, L. D. **A Colloquy on Learning Objectives For Engineering Education Laboratories.** Proc.American Society for Engineering Education. Annual Conference&Exposition. 2002.

PIRES, J.G. **Mathematical Physiology, Mathematical Biology, and Biomathematics: leptin and the weight control mechanisms.** v. 6, n. 3. 2015.

QUEIROZ et al. **Soluções Hils Baseadas em Foss para Treinamento e Supervisão em Controle de Processos Industriais.** 2010.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações.** São Paulo. Makron Books. 819p. 1999.

SILVA, H. M. d. **Simulação com hardware in the loop aplicada a veículos submarinos semi-autônomos.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecatrônica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

TEWARI, A. **Modern Control Design With MATLAB and SIMULINK.** John Wiley & Sons, LTD. 2002.