

DESENVOLVIMENTO DE TRANSDUTORES DE FORÇA COMO INSTRUMENTO GERADOR DE CONHECIMENTOS EM CURSOS DE ENGENHARIA

André Roberto de Sousa – asousa@ifsc.edu.br

IFSC - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Av. Mauro Ramos, 950
80020-300 – Florianópolis – SC

Valdir Noll – vnoll@ifsc.edu.br

IFSC - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Av. Mauro Ramos, 950
80020-300 – Florianópolis – SC

Guilherme Klegues Cidade – gklegues@gmail.com

IFSC - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Av. Mauro Ramos, 950
80020-300 – Florianópolis – SC

Resumo: *Este trabalho descreve os resultados do emprego do desenvolvimento de transdutores de força por meio do uso de células de carga em disciplinas curriculares do curso de Engenharia Mecatrônica do IFSC como instrumento gerador de conhecimentos e habilidades para os alunos do curso. O desenvolvimento de células de carga envolve conhecimentos multidisciplinares abrangendo os temas de especificação de materiais, CAD, cálculos de resistência dos materiais, simulação computacional (CAE), prototipagem mecânica e eletrônica, circuitos elétricos e eletrônicos, comunicação de sinais e avaliação da confiabilidade metrológica do sistema desenvolvido. Pela diversidade de temas, pela relativa facilidade e baixo custo de desenvolvimento e construção, a célula de carga tem sido empregada como instrumento gerador em disciplinas de metrologia e instrumentação no curso de Engenharia Mecatrônica do IFSC com muito bons resultados.*

Palavras-chave: *Problem-based Learning. Ensino na Engenharia. Células de Carga.*

1 PROJETOS INTEGRADORES COMO INSTRUMENTOS GERADORES DE CONHECIMENTO

Na construção do conhecimento dos alunos do curso de Engenharia Mecatrônica usa-se, já há um bom tempo, Projetos Integradores com o objetivo de aplicar conhecimentos, obtidos em diversas disciplinas, na solução de problemas reais de engenharia. Segundo Oliveira et alii, 2013, o ensino baseado em projetos é, de fato, é uma abordagem que tem sido bastante utilizada no ensino de engenharia. Neste tipo de abordagem o aluno desenvolve, no tempo estabelecido, um determinado trabalho em conjunto com outros alunos. Além do desafio de se desenvolver um produto de engenharia, o aluno deve aprender a lidar com as dificuldades advindas do trabalho em grupo.

De acordo com Santos, 2012, o Projeto Integrador é uma estratégia pedagógica de caráter interdisciplinar, constituída de etapas e fases, funcionando como um eixo articulador do currículo (disciplina ou tema). Tem a função de integração curricular, mobilização, realização e aplicação de conhecimentos que contribuam com a formação de uma visão do conjunto no decorrer do percurso formativo do estudante. Por meio deste enfoque, a utilização do Projeto Integrador sinaliza para a construção de competências pelo aluno a partir da realização conjunta do trabalho em equipe, da pesquisa sistematizada, da adoção de escrita normatizada e de estratégias de apresentação oral de trabalhos interdisciplinares nos semestres letivos que compõem o curso, sempre tendo amplo envolvimento do corpo docente nesse processo.

Desde a sua concepção em 2002, o Curso de Graduação em Mecatrônica do IFSC utiliza-se de Projetos Integradores, tendo desenvolvido mais de 300 projetos desde então. O instrumento gerador de cada projeto varia conforme as disciplinas que busca integrar, havendo sempre temas transversais comuns, tais como o emprego de metodologia de desenvolvimento de produtos e o gerenciamento de projetos. A Figura 1 ilustra alguns projetos integradores desenvolvidos ao longo deste período. Em fases mais avançadas dos cursos alguns projetos foram desenvolvidos para resolver problemas reais do setor industrial.

Figura 1 - Exemplos de Projetos Integradores desenvolvidos na área de Mecatrônica no IFSC



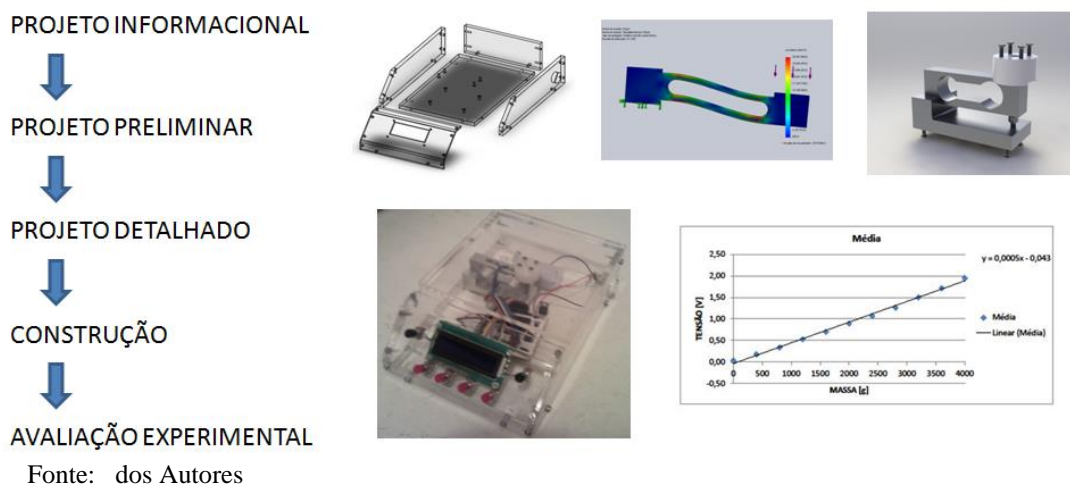
Fonte: dos Autores

Um desafio permanente no desenvolvimento dos projetos é a sua capacidade de motivar os alunos, integrar conhecimentos, e avaliar a viabilidade técnica e econômica de execução do projeto diante da disponibilidade de recursos financeiros e de tempo. Vários dos projetos integradores desenvolvidos demandaram uma carga de trabalho acima do esperado, e o correto dimensionamento dos requisitos de projeto é muito importante para o uso como ferramenta efetiva de construção do conhecimento. A Figura 2 ilustra esquematicamente a metodologia empregada em projetos integradores de Mecatrônica, no qual se procura aplicar os conceitos de metodologia e gestão de projetos.

Como já citado, o ponto central no desenvolvimento dos projetos integradores é o Instrumento Gerador, definido como o tema do projeto ou o desafio técnico a ser vencido, o qual deve conter um nível de complexidade suficiente para os objetivos do projeto integrador, ser multidisciplinar para abranger e integrar conhecimentos de diferentes áreas, e ser viável de execução, nos aspectos técnico e econômico.

Este trabalho analisa as experiências do uso de transdutores tipo célula de carga como instrumento gerador empregado na disciplina de metrologia e instrumentação do curso de engenharia mecatrônica do IFSC.

Figura 2 - Metodologia de desenvolvimento de projetos integradores



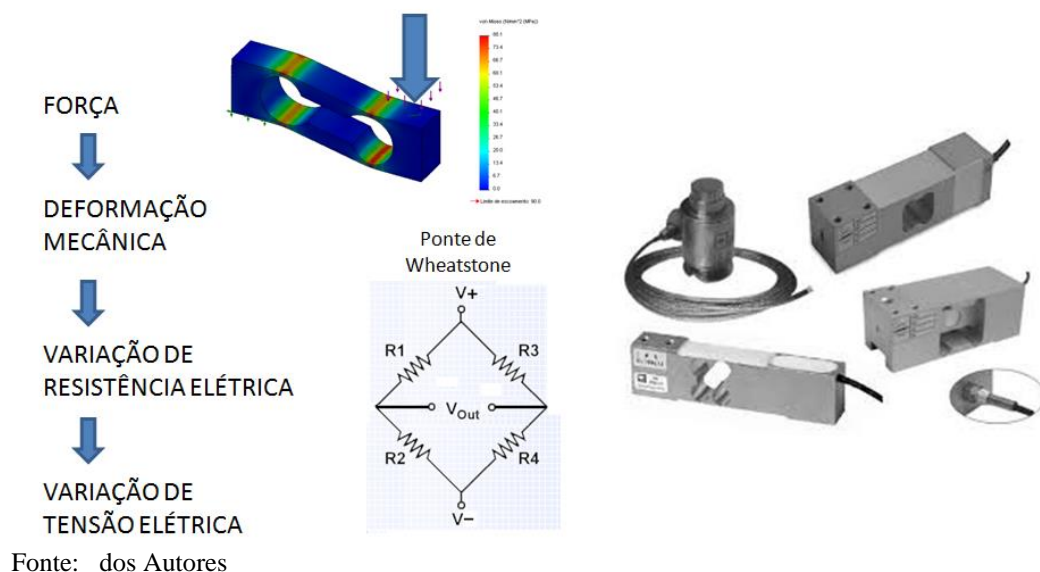
2 TRANSDUTORES DE FORÇA DO TIPO CÉLULAS DE CARGA

As células de carga são transdutores de força largamente empregados em diversos sistemas de medição de força e massa. Sua utilização mais popular ocorre nas balanças em geral empregadas em indústria, comércio e serviços. Trata-se de uma estrutura mecânica instrumentada com resistores elétricos como sensores (em inglês, *strain gage*). Estes sensores são colados firmemente na estrutura mecânica de modo a acompanharem a deformação desta quando submetido a um esforço.

Sendo deformados, os resistores alteram a sua resistência elétrica e esta variação de resistência é convertida em variação de tensão elétrica através da ponte de *Wheatstone* (Figura 3). Desse modo, a força incidente sobre a célula de carga provoca como saída uma tensão elétrica proporcional que, uma vez condicionada, permite medir o esforço aplicado. As células de carga comerciais possuem formatos diversos, dependendo do tipo e magnitude do esforço a medir.

Por congregarem dispositivos mecânicos, eletroeletrônicos e software de medição, o desenvolvimento de uma célula de carga é um momento bastante rico para os alunos trabalharem diversas áreas do conhecimento, dentre elas, a especificação de materiais, projeto mecânico CAD, cálculos de resistência dos materiais, simulação computacional (CAE), prototipagem mecânica e eletrônica, circuitos elétricos e eletrônicos, comunicação de sinais e avaliação da confiabilidade metrológica do sistema desenvolvido.

Figura 3 - Princípio de funcionamento e modelos de células de carga



3 A CÉLULA DE CARGA COMO INSTRUMENTO GERADOR

O desenvolvimento da célula de carga como instrumento gerador de conhecimento é composto das etapas e tecnologias descritas nos itens 3.1 a 3.8, e ilustradas de modo esquemático na Figura 4.

3.1 Caracterização da demanda

Como a célula de carga deve ser particularizada para cada aplicação, a primeira etapa do trabalho é definir as condições operacionais em que a célula de carga estará submetida. Para cada grupo de alunos é definida uma faixa diferente de medição a ser atingida com o sistema de medição, normalmente de 0 a 5 kg ou 0 a 10 kg, para permitir maior facilidade de calibração do sistema. Junto com a faixa de medição são definidas as dimensões que a célula de carga pode ter, bem como o tipo de esforço que irá sofrer (tração, compressão ou flexão). Nesta etapa os alunos têm que lidar com conhecimentos de metrologia, estática e resistência dos materiais.

Figura 4 - Demandas tecnológicas no projeto, construção e operação de uma célula de carga



Fonte: dos Autores

3.2 Modelamento CAD e dimensionamento estrutural

Uma vez definidos os requisitos a serem atendidos e selecionado o material a ser utilizado, os estudantes têm que projetar a célula de carga em ambiente computacional, usando um software de auxílio a projetos (CAD). Neste ambiente é realizado o modelamento geométrico da célula de carga para atender ao tipo de carga aplicado e às dimensões limite. Em seguida é realizada uma simulação por elementos finitos da deformação mecânica que a célula de carga irá sofrer frente aos esforços aplicados. O objetivo desta simulação é permitir a otimização das dimensões da célula de carga de modo que a mesma se deforme de modo significativo dentro do regime elástico do material, permitindo que o transdutor tenha boa sensibilidade à carga aplicada.

Caso a célula de carga fique subdimensionada, irá se deformar plasticamente ou mesmo fraturar em serviço. Caso a célula de carga fique superdimensionada, será pouco sensível à carga aplicada, sendo difícil o tratamento eletroeletrônico do sinal gerado. Embora esta otimização possa ser feita manualmente através dos cálculos de resistência dos materiais, opta-se pela utilização de software CAE para que os alunos desenvolvam habilidades no uso destes sistemas. O resultado desta etapa é o projeto mecânico detalhado da célula de carga e o desenho técnico pronto para fabricação mecânica.

3.3 Fabricação mecânica e controle dimensional

Completado o desenho mecânico detalhado os estudantes têm que fabricar as células de carga empregando processos de usinagem. Como a maioria das células de carga possuem geometria de revolução ou prismática, são empregados processos de torneamento e fresamento. Uma vez fabricadas as células de carga, estas são medidas para atestar que suas dimensões estão dentro dos limites estabelecidos no projeto mecânico. Este controle pode ser feito com instrumentação manual (paquímetros e micrômetros) bem como por sistemas de medição mais sofisticados (máquina de medir por coordenadas tridimensional). Nesta etapa são trabalhados conceitos e práticas de fabricação mecânica e metrologia.

3.4 Seleção e colagem dos sensores de deformação elétricos

Realizada a parte mecânica, é necessário instrumentá-la com os sensores elétricos de deformação (strain gage). Existem diversos modelos e tamanhos de strain gage disponíveis no mercado e os estudantes têm que especificar aquele que melhor atende às limitações de tamanho da célula de carga e ao tipo de esforço. Após a seleção e aquisição dos sensores estes devem ser posicionados e colados sobre a superfície da célula de carga. Para este procedimento os alunos são orientados quanto à marcação do local de colagem dos sensores, limpeza da superfície, posicionamento dos sensores, e a aplicação e cura do adesivo. Após colados, é necessário soldar os fios de conexão nos sensores. Esta etapa do projeto envolve conceitos de mecânica de precisão, manuseio de produtos químicos, soldagem eletrônica e segurança do trabalho.

3.5 Projeto de circuitos e confecção de placas de circuito impresso

Para a geração e condicionamento do sinal elétrico da célula de carga, é necessário o projeto do circuito elétrico e a confecção de placa eletrônica. O circuito clássico utilizado em instrumentação com células de carga é do tipo Ponte de Wheatstone, que transforma pequenas variações de resistência elétrica dos sensores em variações de tensão elétrica. São adicionados potenciômetros para balanceamento da ponte e amplificadores para aumento da tensão de saída. A seguir esse sinal é isolado e amplificado por meio de amplificadores operacionais, que entregam esse sinal a um conversor analógico para digital, tornando possível a entrega dessa informação a um computador do tipo PC. A fabricação da placa pode ser feita por corrosão química ou por fresamento em máquina CNC. Caso não estejam disponíveis estas facilidades para a construção de placas, o circuito pode ser montado em uma matriz de contato (protoboard). Por fim, os componentes são soldados na placa ou montados na matriz de contatos.

3.6 Conexão de módulos e interfaceamento com o computador

O objetivo desta etapa é integrar todo o sistema mecânico e eletroeletrônico, deixando-o funcional. Para isto a célula de carga já instrumentada é montada em estrutura mecânica apropriada. Na maior parte dos casos a célula de carga é montada em uma balança e, sendo assim, é necessário fixá-la na base da balança, e montar um prato de balança sobre a célula de carga. A montagem mecânica é acompanhada da conexão de todas as ligações elétricas dos sensores aos circuitos eletrônicos, e da conexão deste circuito a um módulo de interfaceamento com o computador para automação da medição. Para esta finalidade podem ser empregados sistemas dedicados tais como o módulo de aquisição de sinais desenvolvido

no IFSC, utilizando o microcontrolador ADUC841 da AnalogDevice®, ou módulos configuráveis baseados em Arduino®, por exemplo. Alternativamente podem ser empregados sistemas comerciais, tais como módulos da National Instruments® e software LabView®. Nesta etapa os alunos têm que lidar com temas multidisciplinares que vão desde a montagem mecânica, integração eletroeletrônica, transmissão, finalizando no processamento de sinais e programação.

3.7 Otimização e calibração do sistema completo

Uma vez operacional, o sistema é otimizado, reduzindo-se ruídos, adequando-se o sinal, melhorando-se a sensibilidade, eliminando-se problemas mecânicos, dentre outros. A etapa final do projeto é a qualificação metrológica do sistema, que consiste em determinar a relação entre força e tensão elétrica, quantificar e corrigir os erros de medição e determinar a incerteza de medição do sistema desenvolvido. Para isso são empregadas massas-padrão calibradas, que são aplicadas sobre a célula de carga de modo avaliar, experimentalmente, o seu comportamento. Os resultados dos ensaios são processados e é elaborado um certificado de calibração do sistema de medição. Nesta fase os alunos trabalham com todas as áreas do conhecimento envolvidas no projeto, além de metrologia e estatística.

3.8 Relatório final e defesa do projeto

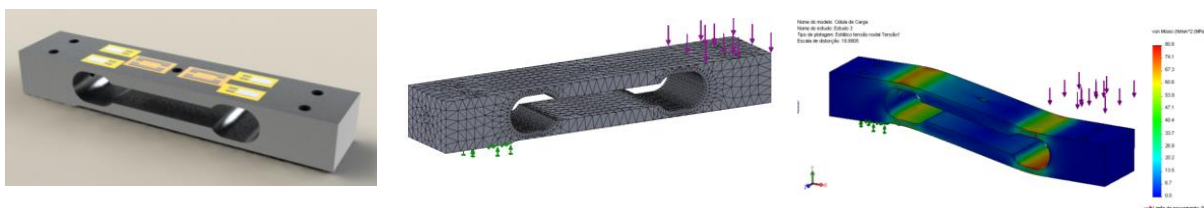
A última etapa do projeto consiste na documentação do projeto, elaboração de relatório e apresentação oral das etapas do projeto, das experiências vivenciadas e dos resultados experimentais obtidos.

4 EXEMPLOS DE TRABALHOS REALIZADOS

Ao longo do tempo foram desenvolvidos diversos trabalhos buscando contemplar as etapas descritas no item 3 deste artigo. Nem todas as turmas conseguiram passar por todas as etapas descritas. Por razões de tempo, disponibilidade de recursos e mesmo pelo desempenho dos alunos, por vezes algumas etapas foram resumidas. As Figuras 5 e 6 ilustram resultados de trabalhos realizados.

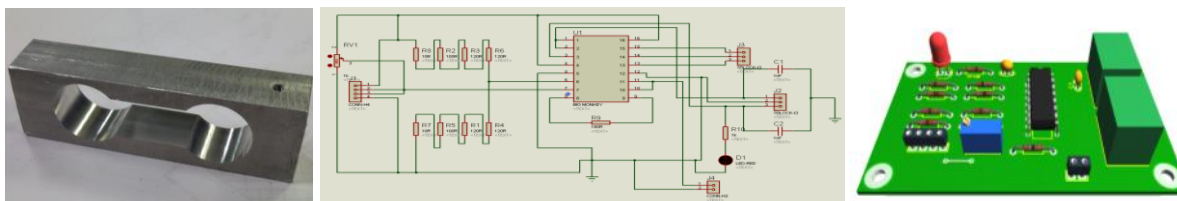
A Figura 5 mostra resultados de um dos trabalhos na etapa de modelamento CAD e simulação computacional por elementos finitos, e análise de tensões mecânicas sobre a célula de carga. A Figura 6 mostra uma célula de carga fabricada, o projeto do circuito de condicionamento dos sinais, e da placa eletrônica a ser construída com base em conhecimentos de eletrônica digital e microcontroladores.

Figura 5 - Etapa de modelamento CAD e simulação CAE



Fonte: dos Autores

Figura 6 - Prototipagem mecânica e eletrônica



Fonte: dos Autores

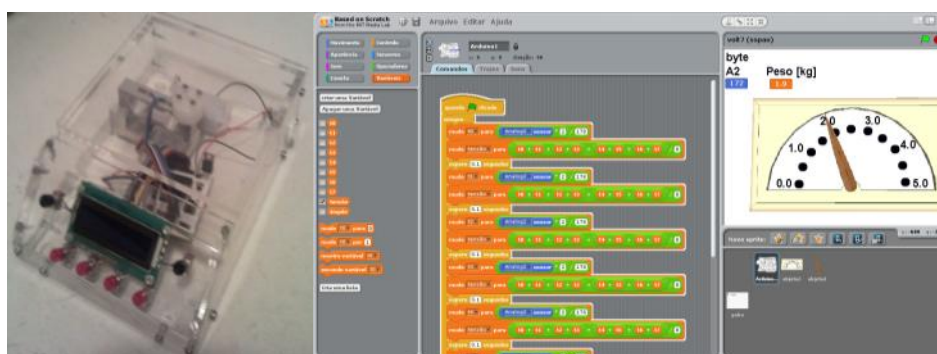
Figura 7 - Montagem e calibração das células de carga



Fonte: dos Autores

Na Figura 8 pode ser visto uma tela do software de aquisição de sinais baseado em Arduino e a indicação dos resultados no computador. Na Figura 9 mostra-se um exemplo de resultado de avaliação metrológica do sistema de medição.

Figura 8 - Aquisição do sinal de medição e indicação do resultado



Fonte: dos Autores

Figura 9 - Avaliação metrológica do sistema de medição desenvolvido

CALIBRAÇÃO DE BALANÇA						
Massa (g)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Média	Desv. Padrão	Repetitividade
0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00
400	0,18	0,16	0,17	0,17	0,01	0,05
800	0,35	0,33	0,32	0,33	0,02	0,07
1200	0,50	0,55	0,51	0,52	0,03	0,12
1600	0,70	0,71	0,67	0,69	0,02	0,09
2000	0,87	0,92	0,87	0,89	0,03	0,13
2400	1,07	1,09	1,04	1,07	0,03	0,11
2800	1,25	1,29	1,24	1,26	0,03	0,12
3200	1,48	1,54	1,47	1,50	0,04	0,17
3600	1,70	1,74	1,70	1,71	0,02	0,10
4000	1,96	1,96	1,93	1,95	0,02	0,08

Fonte: dos Autores

5 RESULTADOS E CONCLUSÕES

A fabricação e operação correta de uma célula de carga, como descrito no item 3 deste artigo, mostra que há vários benefícios envolvidos neste tipo de metodologia. Quando os alunos são desafiados a buscarem a caracterização da demanda de mercado, percebemos neles o interesse por conhecer empresas da região, visando fazer um trabalho aplicado a uma demanda real. Essa prática tem sido muito incentivada pelos professores e traz um ganho real ao processo de ensino-aprendizagem.

Após, quando precisam definir os elementos mecânicos, há a constatação que os alunos se envolvem na busca de materiais adequados, discutem quais materiais estão disponíveis e se não haveria a possibilidade de utilizarem novos materiais, e assim por diante. Escolhido o material, passam à parte de simulação e validação das ideias de formas mecânicas mais adequadas, enriquecendo os conhecimentos de mecânica, especialmente na parte de materiais e metrologia. Ao se dedicarem à interligação eletrônica com a mecânica, percebem a necessidade de conhecimentos na área de eletrônica, fabricação, testes e integração com a parte mecânica, finalizando com o desenvolvimento do software.

Pode, portanto, afirmar que esse tipo de projeto tem conseguido aumentar conceitos fundamentais de mecatrônica nas mais diversas áreas, os quais tornam esse tipo de tema gerador, muito importante para estimular o estudante no desenvolvimento dos seus conhecimentos. Finaliza-se com um relatório e apresentação dos resultados a uma banca de professores, que são os avaliadores do projeto, estimulando nos alunos a capacidade de falar em público, defender ideias, e gerar relatórios técnicos de boa qualidade.

O uso de Projetos Integradores durante o curso de Engenharia Mecatrônica do IFSC tem elevado a qualidade do ensino, especialmente por permitir a aplicação prática dos conhecimentos obtidos ao longo de vários eixos temáticos em um único projeto. Nesse sentido, a fabricação e operação de células de carga como transdutores de força tem a vantagem de envolver várias áreas do conhecimento, tais como: mecânica, eletrônica, programação, metrologia dimensional, projetos, CAD, CAE, entre outras. Esta integração de conhecimentos num único exemplo prático é a grande vantagem de se utilizar projetos como instrumento gerador de conhecimentos na área de engenharia, especialmente Mecatrônica.

Além disso, os projetos mostram aos alunos o quão importante é trabalharem de forma associativa, colaborativa, em grupo. Dado que o conhecimento tende a ser tornar cada vez mais multidisciplinar, não se pode mais pensar em trabalhar de forma individual. Os resultados alcançados, do ponto de vista da integração de conhecimentos, têm sido muito proveitosos para a melhoria da qualidade do ensino, fortalecendo vínculos entre alunos, entre

alunos e professores, e, quando é possível realizar um projeto envolvendo empresas, permite que os alunos tenham uma vivência inicial no mundo do trabalho.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro e logístico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, que permitiu que esse projeto fosse executado por meio da disciplina de Projetos Integradores do curso superior em Engenharia Mecatrônica.

Agradecemos também ao Laboratório de Metrologia do Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica do IFSC, campus Florianópolis, pela cessão de espaço físico e laboratorial para a execução dos experimentos.

REFERÊNCIAS

ANALOG DEVICE – ADUC841. Site: <http://www.analog.com/en/products/processors-dsp/analog-microcontrollers/8052-core-products/aduc841.html>. Acessado em 10/06/2016

DOEBELIN, E. Measurement Systems: Application and Design 5th Edition, McGraw-Hill 2003.

LEACH, D. P. MALVINO, A. P.; Eletrônica digital, princípios e aplicações.vols. 1 e 2. São Paulo: McGraw-Hill,1987.

NATIONAL INSTRUMENTS. Site: <http://www.ni.com/labview/pt/>. Acessado em 10/06/2016.

OLIVEIRA et alii, 2013. Projeto integrador de engenharia: experiência de uma disciplina em busca por uma didática em ambiente desafiador. Anais do XLI Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Gramado, 2013.

SANTOS, 2012 O projeto integrador como ferramenta de construção de habilidades e competências no ensino de engenharia e tecnologia. Anais do XL Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Belém, 2012.

TEXAS INSTRUMENTS, amplificadores lineares. Site: <http://www.ti.com/llds/ti/analog/amplifiersandlinears/amplifiersandlinears.page>, acessado em 10/06/2016

TOKHEIM, R. Fundamentos de Eletrônica Digital - Vol.2 McGraw-Hill, 2013

DEVELOPMENT OF FORCE TRANSDUCERS AS A KNOWLEDGE GENERATOR INSTRUMENT IN ENGINEERING COURSES

Abstract: *This work describes the results of the use of the development of force transducers using load cells in curricular subjects of the course of Mechatronics Engineering of the IFSC as a tool to generate knowledge and skills for students of the course. The development of load cells involves multidisciplinary knowledge covering the subjects of material specification, CAD, materials resistance calculations, computer simulation (CAE), mechanical and electronic prototyping, electrical and electronic circuits, signal communication and metrological reliability evaluation. developed system. Due to the diversity of themes, the relative ease and low cost of development and construction, the load cell has been used as a generator instrument in metrology and instrumentation disciplines during Mechatronics Engineering Course of the IFSC with very good results.*

Key-words: *Problem-based Learning. Teaching in Engineering. Load Cells.*