



## **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO ENTRE SENSOR DE NÍVEL CAPACITIVO E COMPUTADOR**

**Rodrigo S. F. Do Nascimento** – rodrigoscoralick@ig.com.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Rua José Peres, nº 558, centro

36700-000 – Leopoldina – MG

**Janison R. Carvalho** – janison@leopoldina.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Rua José Peres, nº 558, centro

36700-000 – Leopoldina – MG

**Luis C. G. Lopes** – gamboa@leopoldina.cefetmg.br,

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Rua José Peres, nº 558, centro

36700-000 – Leopoldina – MG

**Matusalem M. Lanes** - mmlanes@leopoldina.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Rua José Peres, nº 558, centro

36700-000 – Leopoldina – MG

**Lindolpho O. A. Junior** – lindolpho@leopoldina.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Rua José Peres, nº 558, centro

36700-000 – Leopoldina – MG

**Resumo:** *Este artigo tem por finalidade apresentar o resultado do desenvolvimento de placas transdutoras de capacitância em tensão junto com uma placa para comunicação com o PC. Através de sensores capacitivos construídos previamente em outro estudo, desenvolveu-se a placa com o intuito de gerar um kit para estudo de controle multivariável, utilizando controle de nível em tanques. A construção desse protótipo possibilitará o início de estudos de controle multivariável com aplicação prática e, assim, sair do universo teórico de estudos para o universo prático do estudo de controle de sistemas dinâmicos fortemente acoplados. O estudo apresentado neste artigo baseou-se na variação da capacitância nos sensores de nível capacitivos desenvolvidos em etapa anterior, realizando a conversão da grandeza medida em valor de capacitância convertendo-a em seguida em valor de tensão e apresentando ao sistema de controle, através de um sistema baseado em microcontrolador, o qual interpreta o sinal e assim toma a decisão de acordo com o que foi pré-definido como regra de controle.*

**Palavras-chave:** *Placa transdutora, controle de nível, sistema microcontrolado;*

## 1. INTRODUÇÃO

O artigo tem como alvo principal, apresentar de maneira tutorial o resultado do trabalho de construção de quatro placas transdutoras de capacitância em tensão e uma placa para a comunicação de sensores de nível capacitivo com o PC.

Com o objetivo de realizar o estudo de controle de nível em sistema multivariável composto de quatro tanques e duas malhas de controle acopladas (Johansson, 2000), quatro sensores de nível foram projetados e construídos (Nascimento, 2011) com dinâmica contínua, onde a variação da capacitância ocorre proporcionalmente ao nível do líquido nos tanques. No entanto há a necessidade de conversão do valor encontrado para que esse possa ser interpretado por um *software* e, posteriormente, a tomada de decisão seja feita pelo controlador de acordo com a estratégia de controle a ser adotada.

Baseado na variação da capacitância, que é obtida através dos sensores previamente construídos, optou-se por uma conversão da capacitância em sinal de tensão elétrica estável, com um pequeno fator de ripple e um range que fique entre 0Vcc a 5Vcc, grandeza em que se pode facilmente trabalhar, através de sistemas eletrônicos microcontrolados, dentre eles o PIC18F4550 da Microchip® . Assim, pode-se determinar o nível de líquido nos tanques.

A construção de placas transdutoras foi de suma importância para a finalização do protótipo. Isso se deve ao fato de grupos de pesquisa do CEFET-MG - Campus Leopoldina necessitarem desse material para trabalhos futuros e realizarem estudos de caso. Vislumbrada também a utilização do sistema completo de nível de tanques na disciplina de Controle Automático IV, do curso de Engenharia de Controle e Automação do CEFET-MG, que trata de sistemas Multivariáveis. Na “Figura 1” tem-se um esquemático do projeto, o qual foi definido através de blocos com funções básicas, na sequência de funcionamento implementada e com os recursos de comunicação do sensor com o computador.

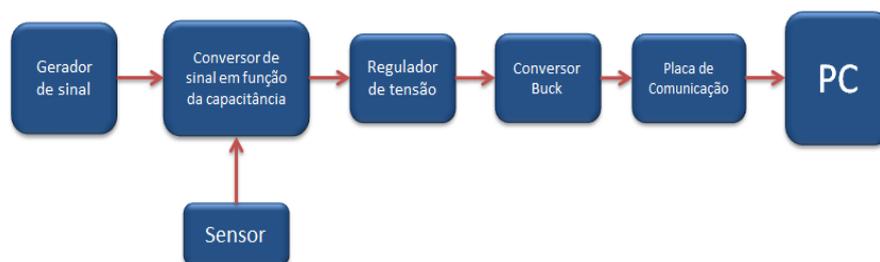


Figura 1 – Projeto de Comunicação Sensor/PC

O circuito das placas transdutoras é basicamente formado por quatro etapas/fase. Na primeira fase tem-se um gerador de sinal, o qual gera uma forma de onda quadrada de frequência pré-determinada. A saída deste bloco compõe a entrada da segunda, onde o sinal é transformado em função da capacitância. Uma etapa intermediária é necessária para obter a regulação de tensão, que é dependente do sinal requerido na saída, que por sua vez está ligado a um conversor Buck, que produz uma tensão contínua final. Através de um sistema de aquisição e comunicação de sinais, esta tensão é recebida pelo computador como uma palavra binária. Todo o processo foi idealizado, em boa parte, através do uso de sistemas eletrônicos analógicos, por uma questão de recursos



disponíveis no laboratório, não se atendo somente a este pensamento, poderia ser construído através de outros métodos. Por exemplo, um sistema totalmente microcontrolado com funções executadas por processamento digital de sinal, como filtragem.

## 2. PLACA TRANSDUTORA DE CAPACITÂNCIA EM TENSÃO

No caso do transdutor desenvolvido, capacitância-tensão elétrica, o desafio foi o de se conseguir um conversor que apresentasse um bom nível de variação (faixa de medição e sensibilidade) e boa característica de linearidade. Os limites inferior e superior de capacitância do sensor construído ficaram em torno de 40pF a 1600pF. A partir desta variação foi possível realizar a medição do sinal do elemento sensor primário capacitivo, pois com uma mudança mais acentuada é possível realizar um número maior de associações entre capacitância gerada e tensão elétrica medida na saída do transmissor. Para cada nível de tensão elétrica tem-se uma capacitância associada, revelando uma boa característica de resolução para ao sistema de medição (Nascimento, 2011). Outro fator importante é conseguir uma tensão contínua e estável na saída.

O princípio de funcionamento do circuito eletrônico é baseado na modulação por largura de pulso. Na técnica PWM (*Pulse Width Modulation*) (Lathi, 1998), com o aumento da largura do pulso TON, ou pulso ativo, ocorre o aumento da tensão média do sinal gerado. Para isso, foi utilizado o CI555 (Scherz, 2012), primeiramente na topologia de um gerador de *clock* astável. Com ciclo de trabalho de 90%, ou seja, 90% de tensão em nível alto e 10% em nível baixo e com uma frequência em torno de 4,5 kHz.

O sinal PWM formado é transmitido ao *trigger* do próximo circuito gerador de sinal. Este Gerador foi obtido a partir de outro circuito utilizando o CI555, agora no modo monoastável. Ele é ativado pelo nível baixo do gerador astável, que por sua vez gera um sinal com TON que pode ser variável. A variação é produzida a partir da modificação da capacitância conectada aos pinos *threshold* e *discharge* no circuito do gerador de *clock* do monoastável. Este capacitor variável é substituído pelo sensor, onde a alteração do nível no líquido mudará a capacitância e o circuito do monoastável consequentemente gerará uma variação em TON proporcional a capacitância do sensor. A variação na capacitância do sensor muda a largura do pulso na entrada do conversor Buck, fazendo com que quanto maior o nível de líquido no recipiente, maior será o tempo em que o modulo 555 monoastável irá operar em alta no ciclo de trabalho. Obtém-se assim uma variação na tensão média na saída do modulo 555. O valor de TON é determinado por:

$$T_{on} = 1,1 \cdot R_M \cdot C \quad (1)$$

onde  $R_M$  é a resistência do monoastável, que é fixa, e  $C$  é a capacitância do sensor.

O projeto dos circuitos eletrônicos dos transdutores e da placa de comunicação foi executado no *software* livre *Kicad* ®. Foi criado o esquema eletrônico dos circuitos, vinculados os componentes aos módulos e, por fim, obteve-se o *layout* das placas. Na “Figura 2” está a representação do circuito no *Eschema* ®, onde se podem ver as quatro etapas do processo, como os dois módulos 555, astável e monoastável, da esquerda para

direita, sucessivamente. Os componentes foram nomeados para facilitar a compreensão do projeto.

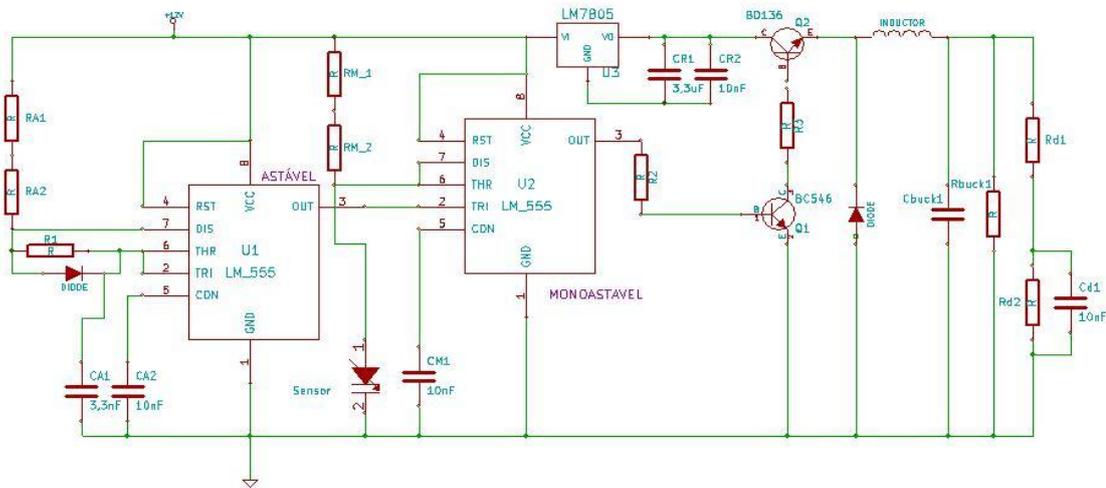


Figura 2- Circuito transdutor de capacitância em tensão

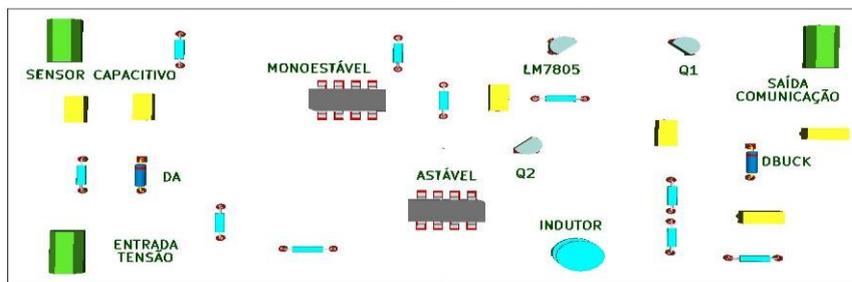


Figura 3 – Alocação dos componentes eletrônicos da placa transdutora em 3D

Na “Figura 3” é visualizada em 3D a alocação dos componentes, em placa projetada através do PcbnewR. Já na “Figura 4”, podem ser vistos todos os transdutores construídos. Sucessivamente, na “Figura 5”, a vista *copper bottom* do transdutor A. Todos os transdutores foram elaborados em equipamento prototipador de placas de circuito impresso, LPKF S42, no laboratório de Sistemas Flexíveis de Manufatura do CEFET-MG – Campus Leopoldina.

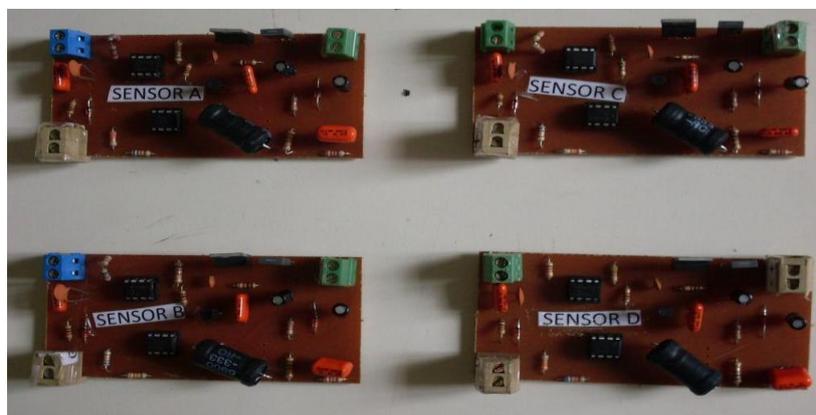


Figura 4 – Transdutores A, B, C e D.

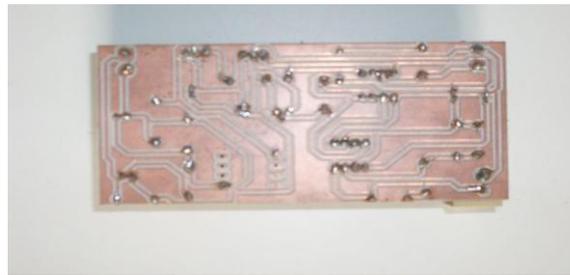


Figura 5 – Vista Inferior do Sensor A

### 2.1. Sinal verificado no osciloscópio

Pode ser observado nas “Figuras 6 a 12” que foram geradas pelo osciloscópio analógico *GoldStarR* 20 MHz, a saída do astável do transdutor A, as variações da largura de pulso na saída do monoestável proporcionais às variações da capacitância do sensor primário, bem como a saída do sistema de transdução. Para as “Figuras 11 e 12”, usou-se as escalas de 2V/divisão, as demais figuras estão com escala de 5V/divisão.

Por final a saída do 555 monoestável é ligada à base do transistor Q1 (BD136), que por sua vez faz o chaveamento da corrente no próximo transistor Q2 (BC546BP).

O transistor Q2 faz parte do conversor Buck, que converte a tensão de saída em uma tensão contínua como o esperado. Nas “Figuras 11 e 12” são mostrados, respectivamente, a tensão sobre o resistor do conversor Buck e a saída no chaveamento de Q2.

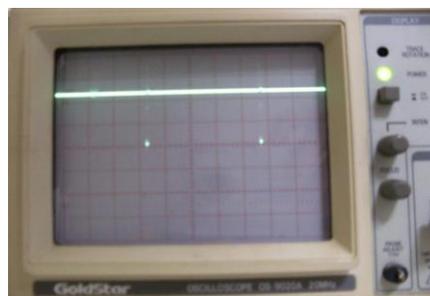


Figura 6 – Saída 555 astável

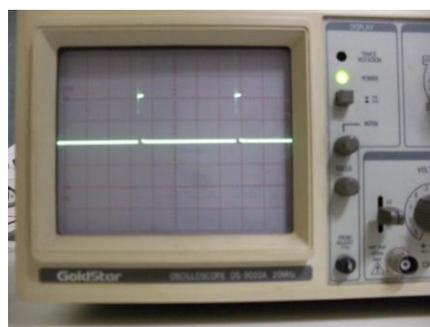


Figura 7 – Saída 555 monoestável com 5% de variação da capacitância total

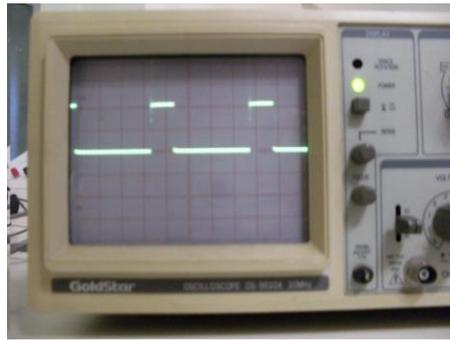


Figura 8 - Saída 555 monoestável com 35% de variação da capacitância total

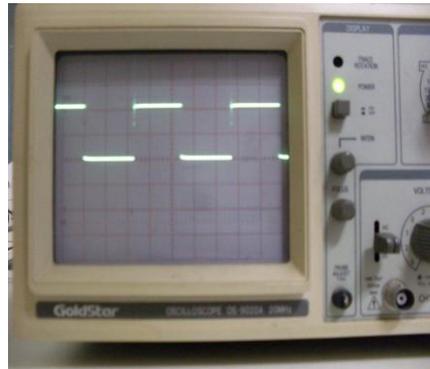


Figura 9 - Saída 555 monoestável com 55% de variação da capacitância total

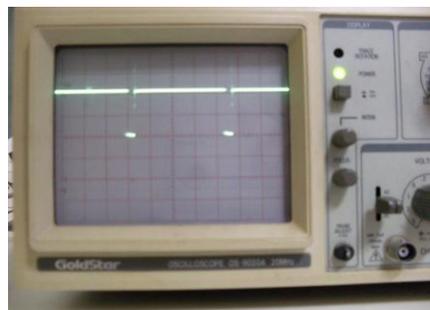


Figura 10 - Saída 555 monoestável com 100% de variação da capacitância total

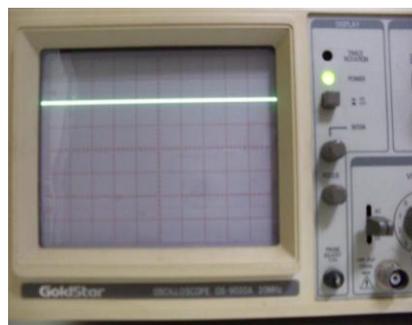


Figura 11 – Saída do resistor Buck com 80% da capacitância total

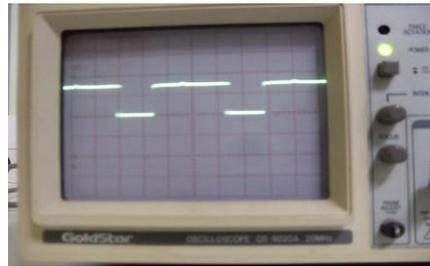


Figura 12 – Saída do transistor Q2

Foi necessária a utilização de um regulador de tensão LM7805 para rebaixar a tensão na entrada do conversor Buck, pois o circuito integrado trabalha com uma tensão de 12 V, sendo que mesmo enviará o sinal para um PIC18F4550 da *Microchip*® que trabalha com tensão de 0Vcc a 5Vcc.

Para melhor ajuste, foi colocado em paralelo ao resistor Buck, duas resistências em série, que formam um divisor de tensão, a saída de tensão do transdutor esta em um resistor em serie, R<sub>carga\_2</sub>.

## 2.2. Base de Cálculo e Fórmulas

Para o cálculo dos componentes da placa foram utilizadas três variações de capacitâncias (máximas e mínimas) de acordo com as curvas obtidas de cada sensor, as variações foram: 50-1600 pF (sensores A e B), 50-1400 pF (sensor D) e 50-1200 pF (sensor C), e estão calculadas respectivamente.

Foi considerado no CI555 monoestável o período máximo de 90% de nível alto e 10% de nível baixo. Já no CI555 astável utilizou-se um TON de 1% do período total, implicando assim, um TOFF 99% do período total. Foi utilizada uma frequência de 4,5 KHz como referência nos cálculos apresentados para os componentes. Será demonstrada apenas a memória de cálculo para o Sensor A, com uma capacitância máxima de 1600pF e mínima de 50pF. Para os demais sensores foi adotado o mesmo método.

Multivibrador Monoestável:

$$T_{total} = \frac{1}{f} = \frac{1}{4,5 \cdot 10^3} = 222 \mu s \quad (2)$$

$$T_{cmáx} = 1,1 \cdot RM \cdot C_{máx} = 0,9 T_{total} \quad (3)$$

$$T_{cmáx} = 0,9 \cdot 222 \mu = 200 \mu s \quad (4)$$

$$RM = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{1,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-9}} = 113 K\Omega \quad (5)$$

$$T_{cmín} = 1,1 \cdot 113 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-12} = 6,215 \mu s \quad (6)$$

Multivibrador astável:

$$T_{on} = 0,01 \cdot T_{total} = 2,2 \mu s \quad (7)$$

$$T_{off} = 0,99 \cdot T_{total} = 220 \mu s \quad (8)$$

Foi utilizada uma resistência de 1 K $\Omega$  no resistor Ra\_1.

$$T_{on} = 0,693 \cdot R_{a_1} \cdot C_a \quad (9)$$

$$C_a = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{0,693 \cdot 1 \cdot 10^3} = 3,3 nF \quad (10)$$

$$R_{a_2} = \frac{220 \cdot 10^{-6}}{0,693 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}} = 96 K\Omega \quad (11)$$

Conversor Buck:

$$D_{mín} = \frac{T_{cmín}}{T_{total}} = \frac{6,215 \cdot 10^{-6}}{222 \cdot 10^{-6}} = 0,03 \quad (12)$$

$$D_{máx} = \frac{T_{cmáx}}{T_{total}} = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{222 \cdot 10^{-6}} = 0,90 \quad (13)$$

$$D_{mín} = 1 - \frac{2 \cdot L_{mín} \cdot f}{R_{buck}} \quad (14)$$

$$L_{mín} = \frac{0,97}{2 \cdot 4,5 \cdot 10^3} \cdot R_{buck} = 107 \cdot 10^{-6} \cdot R_{buck} \quad (15)$$

Foi utilizado um indutor comercial que suporta a corrente simulada máxima do circuito de 70 mA. No indutor utilizado Isat = 470 mA , e tem indutância de 33 mH.

$$R_{buck} = \frac{33 \cdot 10^{-3}}{107 \cdot 10^{-6}} = 308 \Omega \quad (16)$$

Definiu-se um  $V_{ond(p-p)}$  de 0,2 V.

$$V_{ond(p-p)} = \frac{D_{mín} (1 - D_{mín}) \cdot V_{cc}}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2} \quad (17)$$

$$C_{máx} = \frac{0,03 \cdot 0,97 \cdot 5}{8 \cdot 0,2 \cdot (4,5 \cdot 10)^2 \cdot 33 \cdot 10^{-3}} = 136 nF \quad (18)$$

### 2.3. Resultados

Nesta seção serão apresentados gráficos gerados para a análise dos resultados simulados e obtidos na prática. As curvas de tensão ( $V_{cc}$ ) em função da capacitância (pF) foram plotadas utilizando-se o software Matlab®. Nas “Figuras 13, 15 e 16” são apresentados os gráficos alcançados na bancada de testes no laboratório, já o gráfico mostrado na “Figura 14” contém as informações da simulação, sendo que todos os resultados referem-se ao transdutor A. Pode-se constatar que o resultado da placa construída ficou próximo do resultado da simulação. A linearidade do sistema ficou compatível com o propósito inicial.

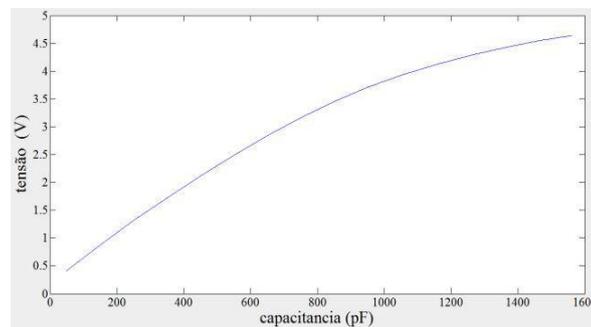


Figura 13 – Curva de saída do real do conversor Buck

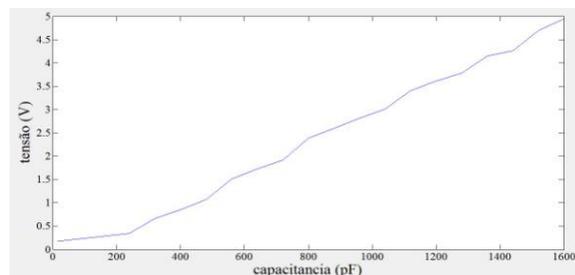


Figura 14 – Curva de saída simulada do conversor Buck

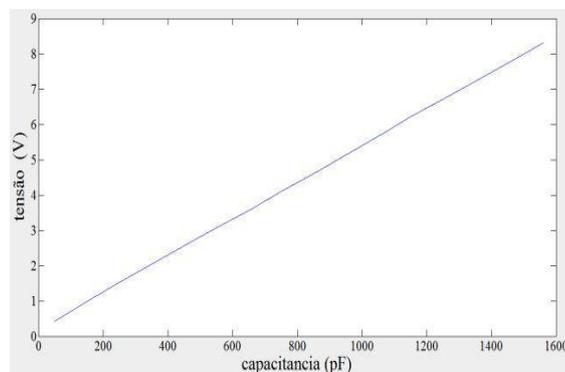


Figura 15 – Curva de saída do 555 monoestável

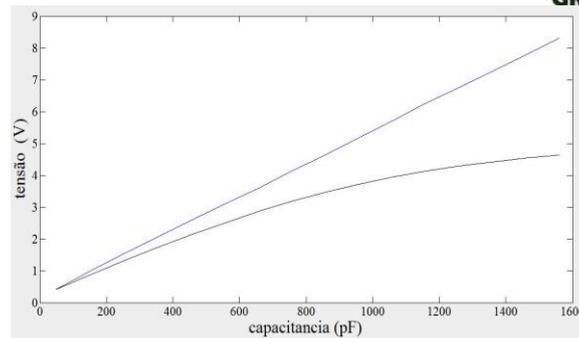


Figura 16 – Comparação das saídas do CI 555 monoestável e conversor Buck

### 3 . PLACA DE COMUNICAÇÃO SENSOR/PC

Para a confecção da placa de comunicação foi utilizado o PIC18F4550 da *Microchip*®. O PIC18F4550 é um microcontrolador pertencente à família PIC18xx (Ibrahim, 2008) e este pode funcionar a uma velocidade de até 48 MHz. Este microcontrolador pode emular uma saída serial em uma porta USB que facilita o envio de dados. A comunicação foi desenvolvida no *matlab*®, com o bloco *Query Instrument*, que se encontra no *Simulink*®, a leitura foi realizada com uma pequena linha de código, onde é feita uma varredura cíclica nas quatro portas de entrada, saídas dos sensores (0 a 5 V). A pinagem do PIC18F4550 pode ser vista na “Figura 17”, que apresenta o esquema de ligação do PIC, onde foram utilizadas as entradas A0, A1, A2, A3, que foram conectadas os Sensores A, B, C, D, respectivamente.

Foi necessária a elaboração de funções fundamentadas em regra de três simples para a conversão dos valores da saída do transmissor em informações de nível de líquido que são expressas em centímetros, pois os valores na saída do PIC estão entre 0 e 1024.

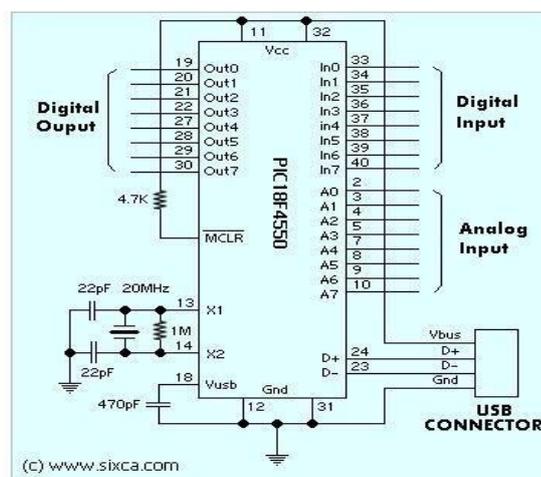


Figura 17 – Esquema de ligação PIC18F4550

Esse controlador possui as seguintes especificações:

- a) 8 saídas Digitais;
- b) 8 entradas de Digitas;
- c) 8 saídas analógicas;
- d) Não requer alimentação externa;
- e) Comando ASCII simples.

Na “Figura 18” é mostrada a placa de comunicação construída com suas respectivas entradas nomeadas para facilitar sua ligação. Esta placa também foi gerada através do auxílio da LPKF S42.

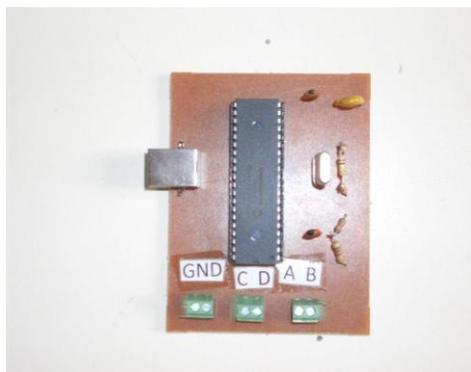


Figura 18 – Placa de comunicação sensores/PC

#### 4. CONCLUSÕES

No circuito do transdutor obteve-se o resultado desejado, pois ele possui uma variação de 0,4 a 4,8 volts, para uma variação de capacitância do sensor entre 0 a 1600pF, com característica de linearidade satisfatória para a aplicação desejada em ensino. Para finalidade de pesquisa o projeto pode ser melhorado. Desta maneira é possível efetuar várias medidas de níveis diferentes. Obteve-se também uma tensão de saída com fator de *ripple* baixo, pois as ondulações são quase imperceptíveis, gerando assim um sinal mais estabilizado. O circuito de comunicação dos sensores com o computador se mostrou eficaz e de simples construção. O preço das placas foi atrativo, com uma relação custo-benefício elevada, em que a maioria dos componentes utilizados nos circuitos é de fácil aquisição no mercado, o que facilitou a construção. O impacto que este protótipo criará na graduação, no que se refere ao ensino e a iniciação científica, é condição importante para a garantia da continuidade do trabalho.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao suporte financeiro do CNPq a realização deste trabalho e ao apoio logístico do CEFET-MG. Também agradecem aos Grupos de Pesquisa do CEFET-MG – Campus Leopoldina pelo apoio ao desenvolvimento do protótipo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Balbinot, A.; Brusamarelo, V. J. Instrumentação e Fundamentos de Medidas. In: Medição de Nível. v. 2. Rio de Janeiro : LTC, 2007. p. 362-394.

Barquero, R. Vygotsky e a Aprendizagem Escolar. 1. ed. Porto Alegre: Artmed, 1998. p. 168.

Boylestad, Robert; Nashelesky, Louis. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 5ta. Ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.

Ibrahim, D. Advanced PIC microcontroller projects in C. In: Advanced PIC18 Projects—USB Bus Projects. USA: Elsevier. p. 409-464. 2008.

Johansson, K. H. The Quadruple-Tank Process: A Multivariable Laboratory Process with an Adjustable Zero. IEEE Transactions on Control Systems Technology, v.8, n.3, pp.456-465, 2000.

Nascimento, R. S. F, Construção e Calibração de Um Sensor de Nível Capacitivo para Trabalho por Imersão em Líquido. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Blumenau, 2011.

Scherz, P. "Practical Electronics for Inventors", in Oscillators and Timers, The 555 Timer CI, 3rd ed, Maidenhead: McGraw-Hill, 2012. p. 270-275.

SIX CA: USB Data acquisition with PIC18F4550. In: <http://www.sixca.com/eng/articles/usbdac/>.

Sousa, V. A. Comunicação USB com o PIC. Apostila de Microcontroladores.

## DEVELOPMENT OF A SYSTEM OF COMMUNICATION BETWEEN SENSOR CAPACITIVE LEVEL AND COMPUTER

***Abstract:** This article aims to present the result of the development of capacitance transducer to voltage boards with an adapter for communication with the PC. By means of capacitive sensors made beforehand in another study the board was developed in order to generate a kit for multivariable control study using a level control tanks. The construction of this prototype will allow the beginning of multivariable control studies with practical application and thus the universe out theoretical studies to practical universe of the study of control systems. The studies presented here was based on variation of the capacitance sensors, be made after a conversion of the capacitance voltage value as the controller interprets the signal and thus makes the decision in accordance with what has been preset.*

***Key-words:** Transducer board, level control, microcontrolled system.*