

Sensor de nível de tensão

Augusto Mikowski (Mestre)

Curso de Engenharia Elétrica - Universidade Tuiuti do Paraná

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor de constante de tempo, para circuitos RC, para ser utilizado por cursos de engenharia.

Palavras-chave: capacitor, resistor, constante de tempo

Abstract

This work presents the development of a time-constant meter for circuits RC, to be apply for engineering courses.

Key-words: capacitor, resistor, time-constant

Introdução

No estudo de transientes em circuitos elétricos, uma dificuldade existente é a possibilidade de apresentar a teoria, em aulas práticas. Um circuito elétrico elementar composto por um resistor e um capacitor, atuará basicamente da seguinte maneira: haverá um tempo até que a tensão atinja um valor máximo no capacitor e o circuito estabilize. O tempo de carga de um capacitor é obtido pela multiplicação do valor do capacitor com os respectivos valores de resistores a ele conectados, tecnicamente denominamos este valor como constante de tempo de carga do capacitor. No tempo de uma constante de tempo conseguimos 63,21% da tensão total, para carga total e estabilização do circuito necessitamos de um tempo maior de cinco constantes de tempo. Os valores típicos deste tempo de carga de um capacitor tem valores típicos na ordem de nanosegundos a alguns segundos, muito embora para se conseguir alguns segundos são necessários

valores de resistores e capacitores na prática altos. Esta dificuldade problematiza as aulas práticas de circuitos elétricos no estudo desta matéria.

Um dispositivo para medir o tempo de carga de capacitores é o que se pretende inicialmente com esta pesquisa. Posteriormente poderá ser estendido para transientes de corrente em circuitos compostos por resistores e indutores. Primeiramente o protótipo deverá ter um sensor para o nível de tensão desejado, com a possibilidade de ajustar a tensão desejada, um contador de tempo inicializado na alimentação do circuito em teste até o patamar de tensão elétrica referente a uma constante de tempo. A contagem de tempo no primeiro protótipo do projeto foi feito em um cronômetro digital com circuitos integrados, contendo porta lógicas e contadores e, em segunda fase, através de um software apropriado a um microcontrolador.

Esta pesquisa tem o objetivo principal de gerar um produto para dentro da própria instituição, mas que poderá ser comercializado para outras faculdades e com certas adaptações poderá ter outras aplicações e comercializações. A viabilidade desta pesquisa se faz através da utilização de materiais, equipamentos e mão de obra especializada existentes dentro da própria Universidade Tuiuti do Paraná.

Fundamentação teórica

Capacitores

Considere duas placas paralelas de material condutor carregadas e separadas por um material isolante, por exemplo, o ar e que a tensão elétrica seja baixa o suficiente para não provocar a ruptura do isolante. Uma placa se torna positivamente carregada, uma vez que o terminal positivo da fonte de tensão remove elétrons suficientes para equalizar a carga nesta parte do circuito. Da mesma forma, a outra placa se torna negativamente carregada, uma vez que o terminal negativo da bateria fornece elétrons para ela. Assim entre as placas existe um campo elétrico, cujo caminho é representado por linhas de força elétrica. Estas linhas, por conveniência, possuem as seguintes características:

- possuem origem em uma carga positiva e terminam em uma carga negativa, e
- entram e saem perpendicularmente à superfície da carga.

Existe uma relação entre a tensão aplicada e a carga que aparece nas placas. Considere o capacitor inicialmente descarregado, isto é, $q = 0$ (cargas elétricas no capacitor) e $v = 0$ (tensão elétrica entre as placas do capacitor). Ao conectar o capacitor a uma fonte de corrente contínua, as cargas vindas da fonte se

distribuem nas placas, isto é, ocorre circulação de uma corrente. Inicialmente esta corrente, representada por i , é alta, mas quanto mais cargas vão se acumulando e, portanto, mais tensão desenvolvida entre as placas, estas cargas acumuladas tendem a se opor ao fluxo de novas cargas, até que se chega ao ponto em que a tensão elétrica entre as placas é igual a tensão elétrica fornecida pela fonte, ou $v = E$. Nesta situação cessa o fluxo de corrente.

Se for traçado um gráfico de cargas acumuladas em função da tensão desenvolvidas entre as placas, será obtida uma relação linear. A constante de proporcionalidade que relaciona a carga e a tensão, isto é, a inclinação da reta, é definida como capacitância (C):

$$C = Q / V \quad (1)$$

A unidade de capacitância é coulomb por volt (C/V), que é definida como um farad (F). O farad é uma unidade muito grande para circuitos práticos; portanto, são utilizados valores de capacitâncias expressos em microfarads (μF) ou picofarads (pF).

A unidade farad é assim chamada em homenagem a Michael Faraday, um famoso físico inglês, que em 1837, ocupando o cargo de Diretor da Royal Society de Londres, tornou-se muito interessado em campos eletrostáticos e no efeito de vários materiais

isolantes nestes campos. Ficou famoso por seu trabalho sobre força eletromotriz induzida. Na conclusão deste trabalho tomou um par de esferas concêntricas metálicas, de tamanhos diferentes, carregou a esfera menor com uma carga positiva conhecida e colocou um material dielétrico sobre ela. Cuidadosamente colocou a esfera maior sobre a esfera e uma camada de dois centímetros do material dielétrico. Conectou esta esfera externa a um ponto de terra e sem perturbar a carga induzida separou-a do terra e mediu a carga negativa nela induzida. Faraday concluiu que a carga nas esferas em módulo eram iguais e que havia um deslocamento que chamou de fluxo elétrico.

No circuito do capacitor ligado direto a uma fonte de corrente contínua, podemos determinar a equação de tensão em função do tempo pela seguinte seqüência, já que a corrente é:

$$i = dq / qt \quad (2)$$

então, para o capacitor,

$$i = d Cv / dt \quad (3)$$

que para uma capacitância constante é

$$i = C dv / dt \quad (4)$$

Equação que pode ser reescrita como:

$$dv = i dt / C \quad (5)$$

Integrando tal expressão de $t = -\infty$ a algum instante t e assumindo $v(-\infty) = 0$, tem-se:

$$v(t) = 1/C \int i(t) dt \quad (6)$$

Podemos empregar o capacitor em variadas situações para obter características específicas de desempenho em um circuito. Porém ele também pode deteriorar o comportamento do quando está inerentemente presente na forma de capacitância parasita, que pode ocorrer entre quaisquer duas superfícies do circuito.

O estudo de transientes nos circuitos elétricos

Toda vez que um circuito é modificado de um estado para outro, seja por uma mudança na fonte de energia aplicada ou por uma alteração nos elementos de circuito, há um período de transição, durante o qual as correntes de suas derivações ou as tensões dos elementos variam de seus valores primitivos para outros novos. Esse período é chamado transitório. Após o

transitório ter passado, diz-se que o circuito está em regime permanente (ou estado estacionário). Assim, teremos uma equação diferencial linear que descreverá o circuito e que terá duas partes para sua solução, a função complementar e a solução particular. A função complementar corresponde ao transitório e, a solução particular, ao regime permanente. Isto é proveniente da resolução de uma equação de diferencial de primeira ordem da forma:

$$d x(t) / dt + a x(t) = f(t) \quad (7)$$

Apesar de existir um número de técnicas para se resolver uma equação deste tipo, por exemplo, separação de variáveis, método de fator integrante ou simplesmente tentar adivinhar uma solução empregaremos aqui o procedimento delineado a seguir para se obter uma solução geral que é aplicável aos problemas com circuitos RC e RL que comentaremos neste tópico.

Um teorema fundamental de equações diferenciais afirma que se $x(t) = x_p(t)$ é qualquer solução para a equação anterior e, $x_c(t) = x_c(t)$ é qualquer solução para a equação homogênea:

$$d x(t) / dt + a x(t) = f(t) \quad (8)$$

então:

$$x(t) = x_p(t) + x_c(t) \quad (9)$$

é uma solução para a equação original. O termo $x_p(t)$ é chamado de solução particular ou resposta forçada e, $x_c(t)$ é chamada de solução complementar ou resposta natural.

No momento, apenas a seguinte situação será considerada: $f(t) = A$ (ou seja, $f(t)$ é uma constante). A solução geral da equação diferencial nesse caso consiste de duas partes que são obtidas resolvendo-se as seguintes equações:

$$dx_p(t) / dt + a x_p(t) = A \quad (10)$$

$$dx_c(t) / dt + a x_c(t) = 0 \quad (11)$$

Uma vez que o lado direito da equação 10 é uma equação $x_p(t)$ deva ser também uma constante. Portanto, assumimos que:

$$x_p(t) = K_1 \quad (12)$$

Substituindo essa constante na Equação 10 temos:

$$K_1 = A / a \quad (13)$$

Examinando a equação 11, notamos que:

$$\frac{d x_c(t) / dt}{x_c(t)} = -a \quad (14)$$

Essa equação é equivalente a:

$$\frac{d [\ln x_c(t)]}{dt} = -a \quad (15)$$

Dessa forma,

$$\ln x_c(t) = -at + c \quad (16)$$

e, portanto,

$$x_c(t) = K_2 e^{-at} \quad (17)$$

Portanto, a solução da equação 9 é:

$$x(t) = x_p(t) + x_c(t) = A / a + K_2 e^{-at} \quad (18)$$

A constante K_2 pode ser determinada se o valor da variável independente $x(t)$ é conhecido em determinado instante de tempo.

Aplicando estes conceitos a circuitos RC com auxílio do teorema de Thévenin, poderemos reduzir circuitos complicados a apenas uma expressão. Tais circuitos possuem constantes de tempo que definem a resposta de circuito.

Em geral, quando a entrada de um circuito RC, que contém um único elemento de armazenagem, uma tensão contínua, a solução da equação diferencial que descreve uma corrente ou tensão desconhecida em qualquer lugar na rede pode ser escrita como

$$x(t) = K_1 + K_2 e^{-t/Tc} \quad (19)$$

Sendo Tc o valor da constante de tempo pode ser encontrado determinando-se a resistência equivalente de Thévenin (R_{th}) nos terminais do elemento de armazenagem, substituindo fontes de tensão por curtos-circuitos e fontes de corrente por circuitos abertos. Então $Tc = R_{th} \cdot C$ para um circuito RC. Esta constante é objeto de interesse nesta pesquisa, pois é medida pelo protótipo montado.

Verifiquemos paulatinamente o procedimento para determinação da resolução do nosso problema. Assumimos uma solução para a variável $x(t)$ da forma $x(t) = K_1 + K_2 e^{-t/Tc}$.

Assumindo que o circuito original tenha chegado ao regime permanente antes que uma chave tenha sido inserida (consequentemente produzindo um novo circuito), desenhe esse circuito anterior com o capacitor substituído por um circuito aberto. Determine a tensão sobre o capacitor [$v_c(0^-)$], antes da mudança da chave.

Assumindo que a energia do elemento de armazenagem não pode mudar em tempo zero, desenhe o circuito, válido somente em $t=0^+$. As chaves estão em suas novas posições e o capacitor é substituído por uma fonte de tensão com um valor $v_c(0^+) = v_c(0^-)$. Resolva para o valor inicial da variável $x(0^+)$.

Assumindo que o regime permanente tenha sido alcançado depois que as chaves tenham sido colocadas, desenhe o circuito equivalente, válido para $t > 5Tc$. Para isso substitua o capacitor por um circuito aberto. Determine o valor de regime permanente da variável:

$$x(t) \Big|_{t > 5Tc} = x(\infty) \quad (20)$$

Uma vez que a constante de tempo para todas as tensões e correntes no circuito será a mesma, ela pode ser obtida reduzindo-se todo o circuito a apenas uma fonte conectada a um resistor e um elemento de armazenagem (capacitor). Isto é conseguido derivando-se o equivalente de Thévenin a partir dos terminais do elemento de armazenagem. Esse circuito equivalente de Thévenin é obtido considerando-se o circuito a partir dos terminais do elemento de armazenagem. A constante de tempo é $Tc = R_{th} \cdot C$ para um circuito RC.

Utilizando-se dos resultados podemos avaliar as constantes da equação inicial como:

$$x(0+) = K_1 + K_2 \quad (21)$$

$$x(\infty) = K_1 \quad (22)$$

e, portanto $K_1 = x(\infty)$, $K_2 = x(0+) - x(\infty)$ e desse modo a solução é

$$x(t) = x(\infty) + [x(0+) - x(\infty)] e^{-t/\tau_c} \quad (23)$$

Esta solução se aplica somente a um circuito de primeira ordem com fontes DC constantes. Para outros tipos de fontes de tensão e corrente e corrente aplica-se o método da Transformada de Laplace. O processo aparentemente é mais simples, o grau de dificuldade está no domínio de técnicas de cálculo e álgebra. A Transformada de Laplace baseia-se em operar em função de uma variável, que é um número complexo, denominada de s .

Após montarmos uma equação de malha de tensão do circuito em estudo, onde tenhamos os valores em função da corrente e como variável o tempo, transformamos esta equação para parâmetros de Transformada de Laplace. Alguns tipos de transformada de Laplace são dadas na tabela ao lado.

Vejam, por exemplo um circuito elétrico RC série com um resistor de 1.000 Ω e um capacitor com 50m F. Inicialmente o capacitor está com uma carga inicial de 2,5 mC. O circuito é então conectado a uma fonte de tensão contínua de 100 V.

$f(t)$ – variável tempo	$F(s)$ – variável complexa
1	$1/s$
e^{-at}	$1 / s + a$
df / dt	$sF(s) - f(0+)$
$\int i(t) dt$	$F(s) / s$

Após montarmos uma equação de malha de tensão do circuito em estudo, onde tenhamos os valores em função da corrente e como variável o tempo, transformamos esta equação para parâmetros de Transformada de Laplace. Portanto a equação em função do tempo será:

$$Ri(t) + 1/C [Q_0 + \int i(t) dt] = V \quad (24)$$

ou

$$1.000i(t) + 1 / 50 \cdot 10^{-6} [(-2,5 \cdot 10^{-3}) + \int i(t) dt] = 100 \quad (25)$$

Q_0 é de polaridade oposta à carga que a fonte depositará. Tomando a transformada de Laplace dos termos na equação anterior, obtemos a equação no domínio de s .

$$1.000I(s) - 2,5 \cdot 10^{-3} / 50 \cdot 10^{-6} s + I(s) / 50 \cdot 10^{-6} s = 100 / s \quad (26)$$

ou

$$I(s) = 0,015 / (s + 20) \quad (27)$$

A função tempo é, então, obtida tomando-se a transformada inversa de Laplace desta função:

$$i(t) = 0,015 e^{-20 t} \quad (28)$$

A constante de tempo é obtida pelo inverso do número 20. Significa que temos uma constante de tempo de 0,05 s. Sendo que manualmente um valor impossível de medir.

Atividades aplicadas em laboratório

A experiência desenvolvida com os alunos dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação, compreendia as seguintes etapas:

- analisar circuito elétrico estabelecendo a constante de tempo;
- montar os circuitos elétricos somente se a constante de tempo encontrada for acima de 5 segundos;
- após montado o circuito iniciar os testes da seguinte forma: fazer dez medidas, iniciando-as assim que o circuito for ligado e acompanhando pelo voltímetro ligado ao capacitor, que o cronômetro deve ser desligado quando atingir o valor desejado (63,21% do valor da fonte);
- após efetuadas as medidas desprezar aquelas que apresentarem um valor fora do desvio padrão e proceder cálculo final de média.

Este procedimento era válido somente para fins didáticos, pois os erros chegavam a dez por cento, devido principalmente ao fato de trabalharmos com pequenos valores de tempo (unidades de segundo), a medida depender da acuidade física visual de quem está executando a medida e dos valores dos componentes. Os valores dos componentes são muito restritos, tem que ser altos, com baixas correntes e baixas de tensões.

Como no exemplo do anterior onde tivemos uma constante de tempo de tempo de 0,05 s. Impossível de medir por este método. Indicando a necessidade de um instrumento que providenciasse essa medida.

Desenvolvimento realizado

O sensor de nível de tensão é um circuito que tem a função de detectar uma tensão pré-ajustada e comandar o cronômetro. Este circuito é composto por um circuito amplificador operacional que opera como comparador em alto ganho. Assim que o nível do componente em teste chegar ou aproximar-se do ajustado o amplificador fornece nível zero na saída, que aciona o desligamento do cronômetro.

O valor pré-ajustado de tensão de referência é dado por um divisor de tensão, com um trimpot (resistor variável) e um resistor ligados na fonte de

tensão elétrica contínua que alimenta todo circuito. O circuito que inicia o cronômetro é o mesmo que atua o circuito elétrico em teste e o sensor de nível de tensão.

O maior problema neste estudo foi de encontrar a melhor combinação de componentes para que houvesse o desempenho no menor tempo possível. Para que medidas de precisão com constantes de tempo pequenas não fossem afetadas.

O atuador é a parte do circuito que dá início ao processo de contagem de tempo e alimentação do circuito em teste, inicialmente pensou-se em uma chave imune a ruídos, um relé associado com componentes que o liberem de ruídos ou mesmo uma chave eletrônica de rápida conexão e imune a ruídos.

Como a maior preocupação era com a velocidade e com a imunidade a ruídos. Decidiu-se utilizar o mesmo componente de contagem de tempo como acionador do circuito de teste.

O cronômetro que inicialmente foi utilizado um contador digital elementar, passou a não ter confiabilidade devido a precisão do sinal de clock utilizado. Passou-se a utilizar o microcontrolador AT80C2051 operando com um sinal de clock de 12MHz.

Uma vez já iniciados os trabalhos, o circuito sensor de nível de tensão foi elaborado a partir de um componente de larga utilização no mercado e de baixo

custo, como o LM741, porém a sua qualidade no tocante a ruídos intrínsecos fez com que desistisse dele e utilizasse o LM358, um amplificador operacional de baixo custo imune a ruídos e com mesmas características que o LM741. O cronômetro foi desenvolvido a partir de circuitos integrados com contadores e portas lógicas comuns, porém apresentou-se muito grande e trabalhoso na sua construção, embora de baixo custo.

O primeiro protótipo foi desenvolvido com o LM741, o cronômetro foi elaborado e serviu até o quinto protótipo. A diferença entre os protótipos seguintes foi o relógio de controle, que no primeiro foi elaborado a partir de um circuito oscilador com componentes simples, como capacitor, resistor e transistor. O segundo protótipo já utilizou o LM358, porém os resultados obtidos apresentavam um desvio padrão muito elevado para um mesmo circuito RC. O start da contagem partia de uma chave que ao mesmo tempo liberava a tensão ao circuito e o início da contagem.

O terceiro protótipo já utilizava um cristal para um oscilador estabilizado, porém necessitava um incremento ao circuito de divisores de frequência para a operação correta do cronômetro. Mesmo assim observou-se um erro significativo, principalmente para pequenos valores de constante de tempo de carga do capacitor.

O quarto e o quinto protótipos tiveram alteração na polarização do circuito sensor de forma a buscar uma melhor resposta na detecção do ponto dos 63,21% da tensão máxima aplicada ao circuito RC. Nestes protótipos os resultados obtidos apresentavam erros estimados em 10%, colocando em dúvida a qualidade do relógio, mesmo os protótipos que utilizaram um relógio estável apresentaram medidas diversas diferentes para o mesmo circuito. Erro este atribuído também ao tempo de retardo da resposta dos componentes, variação térmica e problemas de mau contato no circuito. Para constantes de tempo grandes, em torno de 10 segundos os erros eram muito pequenos.

Por fim a utilização de um microcontrolador que recebe um sinal do sensor para dar finalização ao cronômetro ficou como solução para esta pesquisa. A utilização do AT89C2051, que é uma versão simplificada do processador 8051 faz com que o custo total do projeto se reduza devido a redução de grande quantidade de componentes, com isto também houve a redução do erro das medidas. A utilização de um clock de 12MHz garante uma precisão até a casa dos micro segundos, como utilizaremos a leitura menor em deci segundos (0,01 s) este já será um fator de despreocupação neste projeto. Com relação ao sensor e todo o circuito utilizou-se uma tensão de 5 volts para isto será empregado uma fonte interna ao

circuito com regulador de tensão. A conexão do sensor de nível de tensão com o microcontrolador teve quatro opções: direto, transistor, porta lógica ou outro amplificador operacional. Colocando o sensor de nível de tensão direto ao microcontrolador apresentou resultados muito bons e reduziu o número de componentes. Uma vez resolvida a problemática do cronômetro consegui me certificar da qualidade do sensor, quero dizer que poderia ter que buscar outro componente para obter melhores resultados. O microcontrolador é acionado por um pequena chave do tipo push-botton, para que libere alimentação ao circuito em teste e contagem de tempo. Quando a contagem de tempo cessa, o capacitor é descarregado, pelo microcontrolador, com uma resistência muito baixa.

A determinação da qualidade e medição de erro baseia-se na escolha de diferentes circuitos RC. Escolhe-se capacitores e resistores mede-se a resistência e a capacitância, calcula-se a constante de tempo de carga dos capacitores e mede através do aparato desenvolvido em horários diferentes, não em seqüência. São efetuadas dez medidas para cada circuito RC, calcula-se a média aritmética simples, a variância e o desvio padrão e observação dos resultados. A meta desejada em primeiro momento é de 1% de desvio padrão. Porém notou-se que, principalmente, para constantes

de tempo em dezenas de segundos este erro é muito maior na faixa de 2 a 3%, enquanto para constantes de tempo menores que três segundos o erro é muito próximo de zero.

Entrei em contato com fabricantes de capacitores e apenas um deles me retornou com a explicação de que capacitores comerciais apresentam variações até cem vezes maiores daquelas em capacitores quase teóricos, fabricados para testes e para equipamentos especiais, além de apresentarem resistência interna, havendo uma circulação de corrente parasita, o que explica os erros obtidos.

O circuito foi utilizado por alunos pela primeira vez no primeiro semestre de 2003 e apresentou resultados didáticos muito bons. Além de medirem a constante de tempo de carga dos capacitores eles acompanhavam medindo a tensão elétrica sobre os capacitores e podiam assim compreender melhor o desempenho de uma curva de carga de capacitores e suas aplicações.

Com relação aos custos enfim o último protótipo ficou em torno de R\$ 30,00.

Conclusão

Um dispositivo para medir o tempo de carga de capacitores é o que se pretendia inicialmente com esta pesquisa. Posteriormente percebeu-se que era uma excelente ferramenta didática onde o aluno saiu da abstração teórica de equações diferenciais e integrais de variáveis complexas para um resultado visível, variável e que comprova a teoria. Inicialmente o protótipo tinha uma série de componentes que comprometiam os resultados e elevava os custos, mas com prudência foi reduzido o número de componentes simplificando o circuito e obtendo resultados excelentes.

Esta pesquisa teve o objetivo principal de gerar um produto para dentro da própria instituição, mas que poderá ser comercializado para outras faculdades e com certas adaptações poderá ter outras aplicações e comercializações. A viabilidade desta pesquisa se fez através da utilização de materiais, equipamentos e mão de obra especializada existentes dentro da própria Universidade Tuiuti do Paraná.

Referências bibliográficas

- BARROS, A. J. da S. (2000). *Fundamentos de metodologia*. 2ªed. Ampliada. São Paulo: Makron Books.
- BARTKOWIAK, R. (1995); *Circuitos elétricos*. São Paulo: Makron Books.
- BASTOS, J. P. A. (1989). *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. Florianópolis: Editora da UFSC.
- BOGART, T. F. JR. (1995). *Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*. Vol; I, II. São Paulo: Makron Books.
- CAPUANO, F. G. e IODETA, I. (1999). *Elementos de Eletrônica Digital*. 26ª Edição. São Paulo: Editora Érica.
- CLOSE, C. M. (1975). *Circuitos lineares*. Vol. 1 e 2, São Paulo: LTC/Edusp.
- DURNEY, C. H. (1985). *Circuitos elétricos: teoria e aplicações em engenharia*. Rio de Janeiro: Campus.
- EDMINISTER, J. A. (1980). *Eletromagnetismo*. São Paulo: Mc Graw Hill.
- _____. (1985). *Circuitos Elétricos*. São Paulo: McGraw Hill.
- HAYT, JR. e WILLIAM, H. (1978). *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC.
- IRWIM, J. D. (2000). *Análise de circuitos para Engenharia*. São Paulo: Makron Books.
- MILLMAN, J. e HALKIAS, C. C. (1995). *Eletrônica*. Vol; I, II, São Paulo: McGraw Hill.
- REITZ, J. R., MILFORD, F. J., CHRISTY, R.W. (1982). *Fundamentos da Teoria Eletromagnética*. Rio de Janeiro: Campus.
- ROMANOWITZ, H. A. (1971). *Introduction to electric circuits*. New York: Ed.Wiley Toppan.
- SEDRÁ, A. S., SMITH, K. C. (1985). *Microeletrônica*. São Paulo: Ed. Makron Books, 4ª Edição.
- VIDAL, P. (1995). *Aplicações Práticas do Microcontrolador 8051*. 7ª Edição. São Paulo: Ed. Érica.
- ZELENOVSKY e MENDONÇA (1997). *PC – Um Guia Prático de Hardware e Interfaceamento*. Rio de Janeiro: Ed. Interciência.