

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM GERADOR DE FUNÇÕES MICROCONTROLADO USANDO SÍNTESE DIGITAL DIRETA

J. L. Marin e J. R. A. Kaschny

Instituto Federal da Bahia - Campus Vitória da Conquista
juan.lieber.marin@gmail.com – kaschny@ifba.edu.br

RESUMO

Na presente contribuição é apresentado o projeto e construção de um gerador de funções empregando síntese digital direta (DDS). O propósito geral é desenvolver um gerador de sinais que fosse controlado e alimentado exclusivamente via uma porta USB de um microcomputador. Para isso, empregou-se um microcontrolador ATmega8 onde foi implementado um firmware incorporando um algoritmo DDS, possibilitando a síntese de formas de onda quadrada, senoidal, triangular, dente-de-serra e rampa. Neste projeto a passagem dos parâmetros de controle é efetuada via comunicação serial assíncrona usando uma porta USB e empregando um conversor FT232R. A conversão digital-analógica é feita por uma rede resistiva tipo R2R e a filtragem final efetuada por um filtro passivo tipo LC. Com isso foi possível gerar formas de onda razoavelmente confiáveis com amplitude ajustável de até 5 V pico a pico e frequências que cobrem a faixa de 10 Hz a 30 kHz. Para o controle do gerador foi desenvolvido um aplicativo dedicado, no entanto tal controle pode também ser feito via um terminal de comunicação serial.

Palavras-chave: microcontroladores, instrumentação, síntese digital.

1. INTRODUÇÃO

Há cerca de vinte anos atrás, o desenvolvimento de circuitos microprocessados era demasiadamente dispendioso devido ao alto custo dos componentes eletrônicos necessários, mencionando-se ainda que tais componentes eram raramente encontrados nos mercados locais. Hoje, com a evolução dos microcontroladores, a incrível ampliação do comércio eletrônico e a redução significativa dos preços dos componentes, o desenvolvimento de tais equipamentos se tornou altamente viável, podendo tal tarefa ser efetuada em pequena escala por um custo convidativo. Dessa forma, a construção de instrumentos microcontrolados tornou-se algo possível, atraindo a atenção de vários projetistas independentes. Atualmente a aplicação de microcontroladores na aquisição de dados e no controle de equipamentos e processos é largamente difundida nos meios industriais, acadêmicos e domésticos. Nas áreas relacionadas à pesquisa e ensino, em particular nas atividades típicas de bancada de trabalho ou num laboratório didático, sempre existiu um particular interesse no interfaceamento de um microcomputador com instrumentos de medida. O propósito disto é, entre outros, conferir uma maior praticidade às tarefas de desenvolvimento, manutenção e análise. No tocante ao ensino, é evidente a aplicabilidade desses instrumentos em aulas de laboratório. Sem querer substituir o estudo mais tradicional sobre o funcionamento e operação da instrumentação eletrônica usual, é inegável que o uso de equipamentos informatizados conferem um maior dinamismo às atividades didáticas, simplificando tanto a aquisição quanto a análise de dados. Adicionalmente, podemos acrescentar que desenvolvimento de sistemas microcontrolados é, por si mesmo, uma excelente prática de ensino onde o estudante tem o compromisso tanto de implementar o firmware quanto de materializar o protótipo.

Tendo em mente as considerações acima, apresentamos na presente contribuição o projeto e a construção de um gerador de funções empregando a técnica de síntese digital direta. Em linhas gerais, escrevemos o desenvolvimento de um gerador de sinais controlado e alimentado exclusivamente via uma porta USB de um microcomputador, cujo projeto pode ser facilmente reproduzido.

2. METODOLOGIA DA GERAÇÃO DE SINAL

Para a geração das formas de onda optou-se pelo método denominado síntese digital direta, ou seja, Digital Direct Synthesis - DDS (ANALOG DEVICES, 1999), que é largamente empregado em sintetizadores de frequência. Tal método consiste em enviar amostras de um sinal de forma pré-determinada consultando os endereços às amostras armazenadas em uma tabela. Tais endereços são apontados seqüencialmente por um acumulador formando uma roda de fase. O passo nessa roda é dado pela palavra de ajuste M , que define o tamanho do salto e, portanto a frequência do sinal. Assim, cada vez que uma nova amostra precisa ser enviada, há um novo salto de magnitude constante M . Então, após vários saltos, quando o apontador voltar para sua posição inicial, obtemos um ciclo completo do sinal desejado. Tal situação é ilustrada na figura 1 onde temos um acumulador de 4 bits,

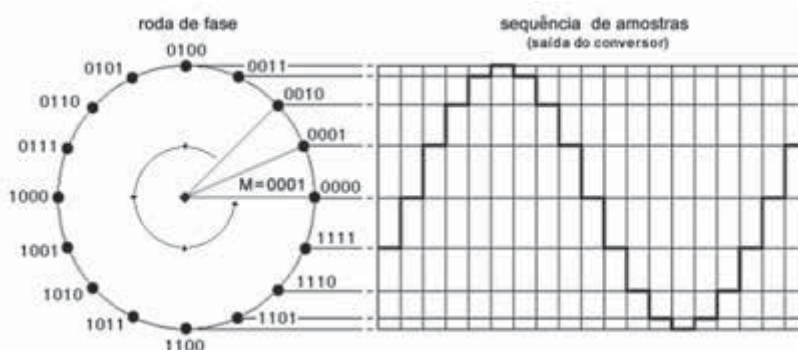


Figura 1 - Ilustração da roda de fase e sua correlação com as amostras de um sinal senoidal.

com $M = 0001$, e amostras correspondendo a um sinal de forma senoidal. A relação entre a palavra de ajuste e a frequência da forma de onda gerada, f , é dada através da expressão:

$$f = \frac{M \times (f_{\text{clk}}/m)}{2^n} \quad (1)$$

onde f_{clk} é a frequência de clock, m o número de ciclos de clock consumidos pelo laço de geração e n o número de bits do acumulador. Sendo assim, uma vez fornecida a frequência desejada, a palavra de ajuste é então calculada e inicia-se o laço de geração. Neste laço o valor de M é somado ao acumulador de fase de n bits, onde os k bits mais significativos compõem o apontador. Ao apontador, é somado o endereço base da tabela de amostras e este passará a apontar para o endereço onde a amostra de x bits encontra-se armazenada. Tal amostra é então movida para o conversor digital-analógico (DAC) e o fluxo de execução transferido para o início do laço. Tal processo é, portanto repetido indefinidamente gerando assim o sinal analógico desejado.

3. CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO

Como mencionado anteriormente, a idéia geral do projeto é desenvolver um gerador de funções que seja controlado e alimentado exclusivamente via uma porta USB de um microcomputador. Para isso, empregamos um microcontrolador ATmega8, de 8 bits, possuindo 8 kbytes de memória flash para armazenamento do programa - firmware, 512 bytes de memória EEPROM para dados estáticos e 1 kbyte de SRAM para armazenamento de variáveis (ATMEL, 2011). Frente a tais limitações de memória, optou-se por incorporar as 5 tabelas de amostras no próprio firmware. Essas tabelas foram elaboradas de maneira a permitir a geração de formas de onda quadrada, senoidal, triangular, dente-de-serra e rampa. Cada tabela é composta por 256 amostras de 8 bits, ou seja, 256 bytes, contendo a amplitude da onda desejada tomada em intervalos de tempo sucessivos. Lembrando do teorema de Nyquist-Shannon (LATHI, 2007) isso corresponderia a uma amostra de tensão de um sinal de 128 Hz, com amplitude de 5 V pico a pico e com um offset de 2.5 V, tomadas a cada 61 μ s. Para desenvolvimento do firmware utilizamos a plataforma de desenvolvimento Bascom - AVR (MCS ELECTRONIC, 2011), sendo o laço de geração escrito em Assembly (SHUNK, 2001). O laço de geração consome um total de 9 ciclos de clock, sendo composto pelas instruções listadas na tabela 1. As linhas de 1 a 5 constituem uma preparação ao início do laço, limpando os registradores R29 e R28, e carregando os 24 bits da palavra de ajuste em R24, R25 e R26. Os conteúdos de tais registradores são somados nas linhas 7, 8 e 9 a R28, R29 e R30, respectivamente. Tais registradores compõem o acumulador de fase de 24 bits. Assim, lembrando que o registrador de endereços indireto de 16 bits, Z, é igual a R31:R30, teremos que R30 representará os 8 bits menos significativos do endereço da tabela de amostras, sendo o offset dado por R31 que por sua vez é carregado previamente. O registrador Z forma assim o apontador mencionado anteriormente sendo o conteúdo do endereço por ele apontado carregado em R0 na linha 10. O conteúdo de R0 é então movido para a porta D de saída na linha 11, onde tal porta corresponde aos pinos 2 (LSB) a 6 e 11 a 13 (MSB) do ATmega8. O estado do primeiro bit da porta B, pino 15 do ATmega8, é então testado para eventualmente interromper a geração do sinal (linha 12). Caso negativo o fluxo de execução é transferido para o início do laço reiniciando o processo. O diagrama esquemático do gerador é mostrado na figura 2. Como podemos observar, utilizamos uma frequência de clock de 7.3728 MHz e um conversor digital-analógico do tipo R2R de 8 bits, que é conectado diretamente aos pinos correspondentes a porta D do microcontrolador. Para melhorar a precisão obtida nessa conversão, usamos neste DAC resistores com tolerância de 1%. Em sua saída obtemos um sinal de tensão entre 0 e 5 V, correspondendo ao sinal gerado com um offset de 2.5 V. Tal offset é bloqueado pelo capacitor de acoplamento. Após isso, o sinal é filtrado por um filtro passa-baixas passivo, com taxa de atenuação de

18 dB/oitava e frequência de corte de 250 kHz. A função desse filtro é suprimir harmônicas de alta frequência, proporcionando algum alisamento no sinal recortado (escada) fornecido na saída do DAC.

A passagem dos parâmetros de controle do gerador, oriundas do microcomputador, é feita via comunicação serial assíncrona usando uma porta USB. Para isso empregamos um conversor integrado USB/UART modelo FT232R (FTDI CHIP, 2011) que é conectado ao microcontrolador via os pinos 15 (TXD) e 16 (RXD). Este conversor é extremamente conveniente, pois os drivers estão disponíveis gratuitamente no site do fabricante, sendo o dispositivo reconhecido pelo sistema operacional como uma porta serial adicional. Outra facilidade proporcionada por tal escolha reside no fato deste integrado ser fornecido na forma de módulo pré-montado pela empresa TATO (TATO, 2011). Isso evita o trabalho adicional da montagem de uma placa de circuito impresso para componentes SMD e possibilita o uso de um protoboard durante as etapas de desenvolvimento.

Tabela 1 - Rotina principal do gerador de sinais. O laço consome um total de 9 ciclos de clock.

1	ldi r29,\$00	'Limpa R29.	
2	ldi r28,\$00	'Limpa R28.	
3	lds r24,{M+0}	'Carrega LSBs de M em R24,	
4	lds r25,{M+1}	'intermediários em R25	
5	lds r26,{M+2}	'e MSBs em R26.	
6	Gerar:	'Início do laço.	
7	add r28, r24	'Soma r24 em R28.	(1 ciclo)
8	adc r29, r25	'Soma r25 c/ carry a R29.	(1 ciclo)
9	adc r30, r26	'Soma r26 c/ carry a R30.	(1 ciclo)
10	ld r0, Z	'Carrega Z em R0.	(2 ciclos)
11	out PortD,r0	'Move r0 para PortD.	(1 ciclo)
12	sbic PinB,1	'Se PinB=1 salta p/ linha 14.	(1 ciclo)
13	rjmp Gerar	'Volta para Gerar:	(2 ciclos)
14	rjmp Inicio	'Finaliza laço e vai para o Inicio:	

Para possibilitar uma maior flexibilidade no uso do gerador foram implementadas duas saídas adicionais, que operam em paralelo com a saída bipolar convencional. Foram acrescentadas uma saída compatível com padrão TTL (0/+5V), via chaveamento utilizando um transistor BC338, e uma saída unipolar cuja tensão varia de 0 até 5V com um offset entre 0 e 2.5V. Isso é devidamente indicado no diagrama esquemático da figura 2. Além do parâmetro frequência e da escolha da forma de onda a ser gerada, o microcontrolador espera também a amplitude que o sinal de saída deve apresentar. Assim a saída de sinal bipolar e unipolar pode variar de 0 a 100%, o que corresponde a faixa de 0 até 5V pico a pico. Salienta-se que devido à limitação imposta pela alimentação via a porta USB, não foi implementado o controle de offset do sinal gerado. Além disso, outra consequência de tal limitação é refletida no offset presente na saída unipolar, que a rigor se torna uma função do parâmetro amplitude. Tais limitações podem ser facilmente contornadas acrescentando circuitos externos com alimentação simétrica independente a oferecida pela porta USB. Contudo isso foge da proposta inicial do presente trabalho. O controle do gerador pode ser feito via um simples terminal serial, por exemplo, o HyperTerminal do Microsoft Windows, ou via o aplicativo dedicado que desenvolvemos. Em ambos os casos, os parâmetros frequência, forma de onda e amplitude são passados seqüencialmente antes do início do laço de geração. Durante a execução desse laço ele pode ser interrompido ao pressionarmos

qualquer tecla, ou seja, ao enviarmos um caractere qualquer via a porta de comunicação. Em tal situação o fluxo de execução retorna para o início do programa e o gerador fica esperando um novo conjunto de parâmetros.

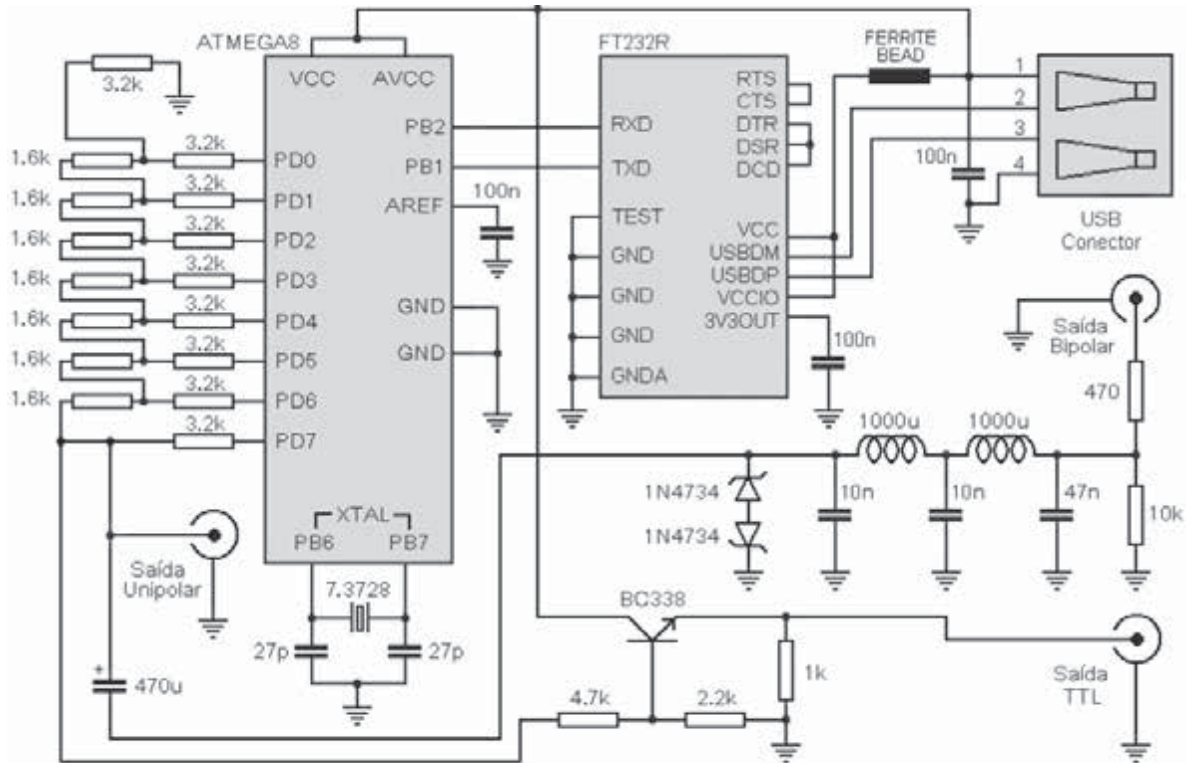


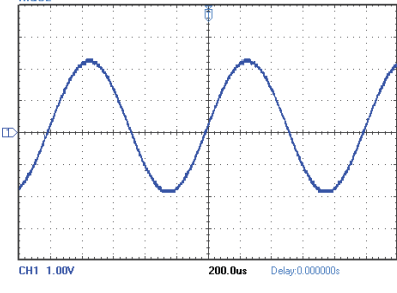
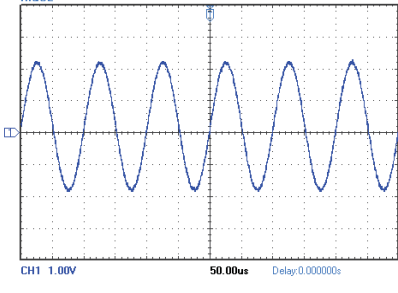
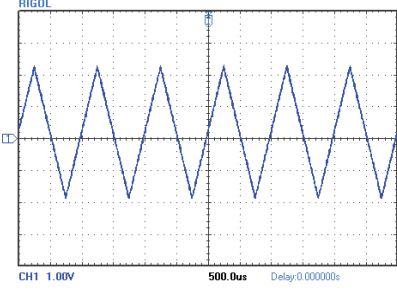
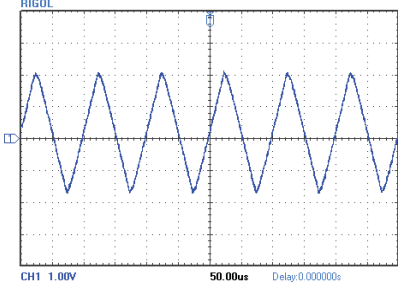
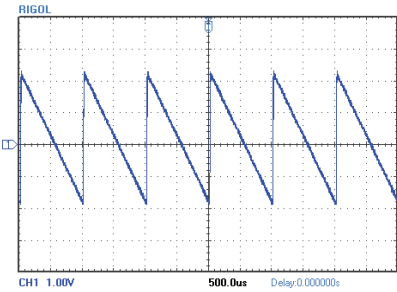
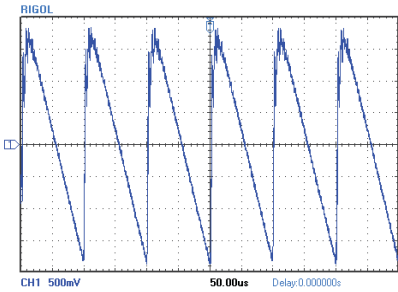
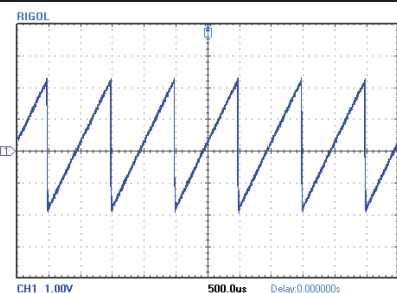
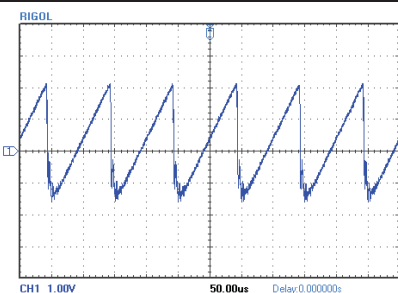
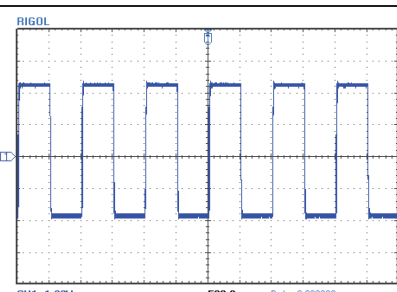
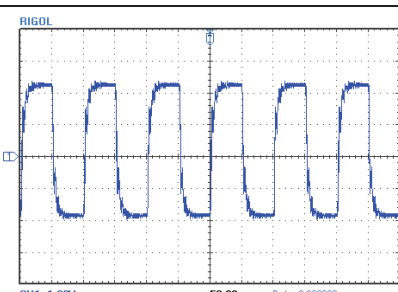
Figura 2 - Diagrama esquemático do gerador de funções usando síntese digital direta.
Todos os resistores são dados em Ohms (Ω) e capacitores dados em Farads (F).

4. RESULTADOS OBTIDOS

Um dos fatores que determina a fidelidade de um gerador de funções digital é o numero de amostras usadas para a geração da forma de onda, devendo o mesmo ser superior ou igual ao dobro da freqüência do sinal de saída. Obviamente isso é obedecido pelo presente gerador até a freqüência de 128 Hz. Contudo, apesar das imprecisões, sinais de forma senoidal e triangular se mostram aceitáveis para freqüências bem superiores. Isso é ilustrado pelos oscilogramas mostrados nas linhas (a) e (b) da tabela 2 para as freqüências de 1 e 10 kHz, tal como indicado. Tais oscilogramas foram obtidos usando um osciloscópio digital com comunicação USB e comandado por um aplicativo específico a partir de um microcomputador.

Para aquelas formas de onda que apresentam alguma descontinuidade, ou melhor, transições abruptas, tal como sinais de forma dente-de-serra, rampa e quadrada, a situação é menos animadora. Como podemos observar nas linhas (c), (d) e (e) da tabela 2, a saída bipolar em 1 kHz se mantém apenas razoável. Contudo, em 10 kHz elas já apresentam deformações significativas, em parte devido ao efeito do capacitor de desacoplamento e do filtro passa baixas. Nesses casos a saída unipolar se mostra mais fiel para formas de onda dente-de-serra e rampa. Para o caso específico de sinais de onda quadrada a saída TTL é sem duvida a de melhor qualidade.

Tabela 2 - Amostra das formas de onda obtidas na saída bipolar. Formas de onda (a) Senoidal, (b) Triangular, (c) Dente-de-serra, (d) Rampa e (e) Quadrada, para frequências de 1 e 10 kHz.

	1 kHz	10 kHz
a		
b		
c		
d		
e		

Analisando os resultados de forma global, podemos dizer que a faixa útil de aplicação deste gerador situa-se de 10 Hz até 30 kHz. Acima desta faixa de frequências os sinais gerados se mostram demasiadamente distorcidos para qualquer finalidade prática. Adicionalmente, podemos afirmar que em todos os casos analisados a precisão da frequência gerada, relativamente à frequência especificada, se mostrou bastante alta ficando os desvios em uma faixa de mais ou menos 1 Hz. Para uma boa parte das aplicações usuais de baixas frequências o uso deste gerador se mostra bem satisfatório. Em particular, para a análise de circuitos de áudio o sinal senoidal gerado é suficiente para determinarmos, por exemplo, a curva de resposta em frequência de um amplificador. Contudo, para a determinação confiável de sua distorção harmônica total o sinal aqui gerado é inaceitável devido à presença de inúmeras harmônicas de alta frequência.

Finalizando, é interessante mencionar que comparações com geradores comerciais similares, ou seja, geradores digitais de funções tipicamente encontrados nas bancadas de trabalho, alguns dos quais de marcas bem conhecidas, se mostraram altamente animadoras. Constatamos, com uma certa surpresa, que tais instrumentos comerciais usualmente apresentam os mesmos problemas aqui detectados.

5. CONCLUSÕES

Em resumo, apresentamos uma descrição completa do projeto e construção de um gerador de funções USB microcontrolado empregando DDS. Apesar das limitações apresentadas o protótipo mostrou resultados animadores, podendo ser empregado em diversas situações práticas. O presente gerador pode gerar sinais de formas de onda quadrada, senoidal, triangular, dente-de-serra e rampa na faixa de frequência entre 10 Hz e 30 kHz com amplitude máxima de 5 V pico a pico. Além do fato de ser um gerador portátil, o projeto apresentando inclui saídas de sinal bipolar, unipolar e TTL. A evidente adição de circuitos com alimentação externa pode vir a contornar muitas das limitações detectadas, implementando também alguns recursos adicionais interessantes. Comparações com geradores comerciais demonstram que o desempenho do presente protótipo está dentro do aceitável para usos corriqueiros.

REFERÊNCIAS

ANALOG DEVICES. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis, Analog Devices Inc, 1999. Disponível em: <<http://www.analog.com>>. Acesso em 10 set 2011.

ATMEL. 8-bit AVR with 8K Bytes In-System Programmable Flash – ATMEGA8 / ATMEGA8L Disponível em: <<http://www.atmel.com>>. Acesso em 10 set 2011.

FTDI CHIP. FT232R USB UART I.C. Disponível em: <<http://www.ftdichip.com>>. Acesso em 10 set 2011.

LATHI, B.P. Sinais e Sistemas Lineares. Editora Bookman, 2007.

MCS ELECTRONICS. Bascom AVR Compiler. Disponível em: <<http://www.mcselec.com>>. Acesso em 10 set 2011.

SHUNK, L.M. e LUPPI A. Microcontroladores AVR – Teoria e Aplicações Práticas. Editora Érica, 2001.

TATO. TATO Equipamentos Eletrônicos. Disponível em: <<http://www.tato.ind.br>>. Acesso em 10 set. 2011.