

Módulo Microcontrolado de Interface padrão SDI-12 para aplicações em monitoramento ambiental

Bruno Rente

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/MCTI,
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Urca – Rio de Janeiro – RJ – Brasil
Instituto Nacional de Tecnologia - INT/MCTI Av. Venezuela, 82 – Saúde – Rio de Janeiro – RJ – Brasil
Genildo N. Santos

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/MCTI,
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Urca – Rio de Janeiro – RJ – Brasil e
Instituto Nacional de Tecnologia - INT/MCTI Av. Venezuela, 82 – Saúde – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

Pedro Russano e Geraldo Cernicchiaro

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/MCTI,
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Urca – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

Alexandre Benevento

Instituto Nacional de Tecnologia - INT/MCTI, Av. Venezuela, 82 – Saúde – Rio de Janeiro – RJ – Brasil
(Dated: 26 de Agosto de 2013)

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma interface para controle de dispositivos de aquisição de dados utilizando os protocolos de comunicação SDI-12 e RS-232. O circuito consiste em uma eletrônica embarcada baseada no microcontrolador ATmega 168p. Estes protocolos são padrões de comunicação serial empregados em experimentos para aquisição de dados, em particular para monitoramento ambiental. O padrão SDI-12 é voltado para aplicação de sensores inteligentes. Este protocolo permite que um único canal controle vários periféricos, com distâncias de até 60 metros e apresenta baixo consumo. O sistema funciona como plataforma de desenvolvimento e calibração para sensores inteligentes. É demonstrado a operação e performance do módulo de interface desenvolvido através do controle de uma sonda de monitoramento ambiental multiparamétrica comercial de aplicação na área.

1. INTRODUÇÃO

Dispositivos de monitoramento ambiental de parâmetros físico-químicos possuem aplicações nos mais variados experimentos científicos ou processos industriais. Os parâmetros físicos ambientais, tais como temperatura, pressão, umidade, entre outros, afetam não apenas os experimentos e processos físicos, mas também os equipamentos e sistemas de controle e medida. A resposta de dispositivos sensores e detectores, bem como a eletrônica de condicionamento destes sistemas, pode ser significativamente afetada, ou comprometida, pelas variações de parâmetros do ambiente experimental. Também podemos constatar o crescente interesse em se monitorar, e quantificar, tais parâmetros para compreensão, fiscalização e segurança do próprio meio ambiente, assim como os mecanismos climáticos e ecológicos, no ar, no solo ou na água.

Um dos aspectos mais importantes na automação de processos de monitoramento é a padronização de interfaces e protocolos de comunicação e controle. Como em outras áreas tecnológicas, existe uma tendência por parte dos fabricantes dos sistemas de procurar impor seus próprios padrões e serviços, em contraposição à demanda por parte dos usuários por sistemas mais abertos, de operação e integração amigável com outros sistemas, custos acessíveis e flexibilidade. O padrão SDI-12 atende diversos destes atributos, especificamente para área de monitoramento ambiental, e vem sendo adotado por um número crescente de fabricantes. Neste do-

cumento, apresentamos um dispositivo para interconexão entre o sistema de aquisição de dados e as sondas inteligentes multiparamétricas e multiponto.

Este circuito, cujo diagrama de blocos mostramos na Figura 1, permite controlar dispositivos comerciais, e também funciona como plataforma de desenvolvimento para customizar, neste padrão, sensores e transdutores, facilitando sua integração com outros sistemas e experimentos.

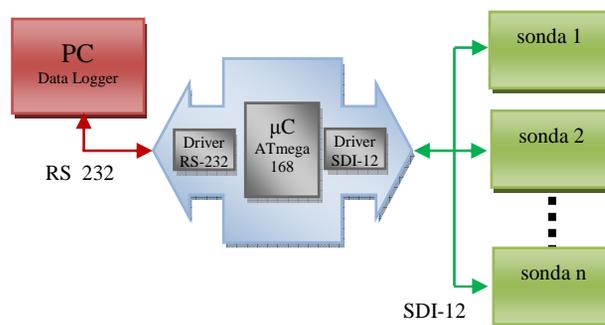


Figura 1: Diagrama de blocos do módulo de interface. O protocolo SDI-12 permite que um dispositivo mestre controle vários periféricos, através do mesmo canal, ou barramento.

Como mostra a Figura 2, o dispositivo criado pretende ser um conversor de dados entre dispositivos dentro de uma rede, realizando a integração desses dispositivos ao modelo OSI (*Open System Interconnection*, do inglês, Interconexão entre Sistemas Abertos). Esse modelo foi proposto pela Organização Internacional de Padrões (do inglês, ISO) e tem como objetivo, propor, em escala crescente de abstração, a integração de sistemas como os descritos neste trabalho [1].

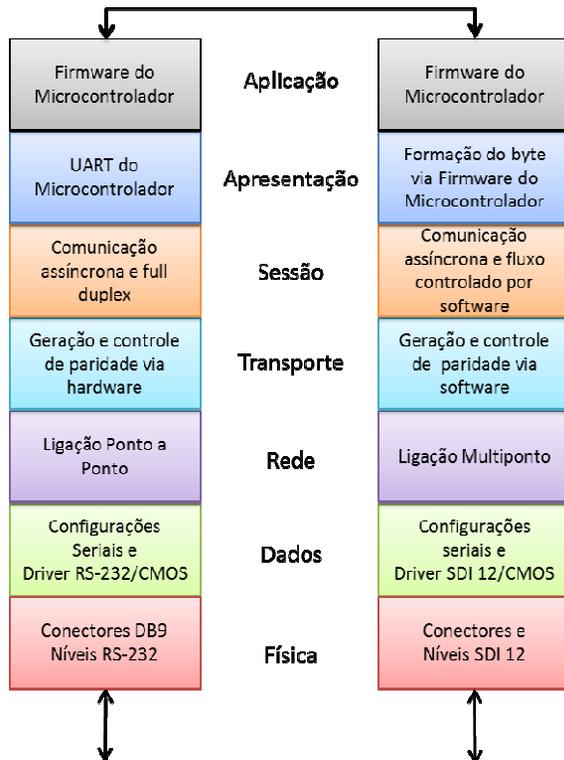


Figura 2: Correspondência do sistema de conversão ao modelo OSI

O barramento padrão SDI-12, acrônimo de "*Serial Data Interface at 1200 Baud*", é um protocolo de comunicação serial assíncrono, codificado em ASCII, desenvolvido para interconectar sistemas de aquisição de dados com sensores inteligentes [2]. Estes experimentos frequentemente são realizados em lugares remotos e requerem um registrador ou dispositivo de aquisição e/ou transmissão dos dados (*Data Logger*).

Os principais atributos que justificam a utilização desse protocolo de comunicação são: o baixo consumo, compartilhamento do mesmo canal de comunicação entre diversas sondas, transmissão por distâncias da ordem de 60 metros e a flexibilidade de se introduzir um novo sensor, ou parâmetro, sem alterar a arquitetura do experimento [3]. O potencial e as características deste padrão justificam não apenas a sua utilização e, principalmente, o domínio da técnica como plataforma para desenvolvimento de sensores inteligentes compatíveis.

2. PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Em sistemas digitais a troca de mensagens entre periféricos é codificada em subunidades, denominadas bits (*BI*nary *digi*T). Um conjunto de 8 bits, reunidos como uma única unidade, são denominados de byte. Em muitas situações, não é exequível transferir simultaneamente os bits de uma mensagem que se queira transmitir por longas distâncias. Estes são codificados para serem transmitidos sequencialmente através de um canal, tal como: ondas de radiofrequência, luz (fibra óptica e infravermelho) ou sinais elétricos através de um fio. No receptor, os bits individuais são reagrupados para recompor a mensagem original. Este método de comunicação é denominado de transmissão serial.

A ação de serialização e paralelização de dados para comunicação é tão frequente, que existe um circuito eletrônico específico para executar esta função por hardware. Este circuito é chamado de UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). Uma UART pode se tratar de um dispositivo discreto, ou estar incorporado como função de um sistema mais complexo, como um microcontrolador. O termo universal indica a capacidade de se programar o formato dos dados ou a taxa de transmissão.

Em telecomunicações, o termo **protocolo** é definido como um conjunto de regras que caracterizam não apenas as conexões do ponto de vista físico, elétrico e mecânico, como também o formato, a sincronização, a frequência, a sequência, o endereçamento, a detecção de erros e falhas na transmissão e recepção de informação entre sistemas digitais [4]. Neste documento apresentamos a interconexão entre dois diferentes padrões: o protocolo RS-232 e o protocolo SDI-12.

A. Padrão RS-232

O protocolo de comunicação RS-232 é bastante difundido e, até recentemente, era padrão na maioria dos computadores e periféricos digitais disponíveis no mercado. RS é uma abreviação para "*Recommended Standard*", e se utiliza a denominação RS-232, quando se faz referências à interface de comunicação, e o termo EIA232 quando se faz referências à norma estabelecida pela "*Electronic Industries Association*" (EIA) [5]. O protocolo apresenta controle de erro, taxas de transferência de informação ajustável e comunicação serial assíncrona, e tem o formato da palavra ilustrado na Figura 3, conforme configuração adotada neste trabalho.

Este padrão é concebido para troca de informações ponto a ponto (entre dois dispositivos), por exemplo um computador e um periférico. O equipamento que faz o processamento dos sinais é chamado DTE (*Data Terminal Equipment*). O equipamento que faz a conexão é denominado de DCE (*Data Circuit-terminating Equipment*). São exemplos de DCE, modems, mouses e impressoras. A velocidade, ou taxa, de transmissão (*baud rate*), tem que ser configurada, igualmente, no transmissor e no receptor. Valores típicos são 110, 300, 1200, 2400, 4800, 9600 e 19200 bits/s. O limite recomendado para distância máxima entre os dispositivos é de 15 metros. O padrão admite conectores de 9 (DB9), ou 25 (DB25), pinos. Conforme podemos observar na Tabela 1, existe uma conexão para o canal de transmissão dos dados (Tx), recepção dos dados (Rx), uma referência elétrica (terra) e 4 conexões

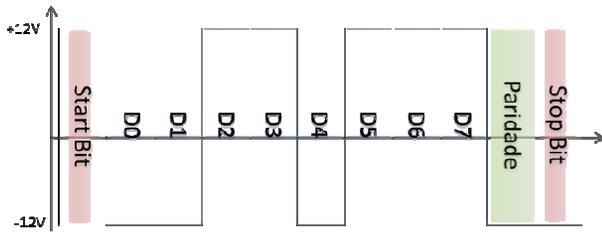


Figura 3: Formato típico de uma palavra de dados transmitidos no padrão RS-232: 1 start bit, 8 bits de dados (D0 a D7), 1 bit de paridade e 1 stop bit. O intervalo de tempo de cada bit no gráfico, corresponde ao inverso do baudrate em segundos. No caso da configuração 9600 bps, este intervalo é aproximadamente 104 μ s.

de sinais para regular o processo pelo qual os dois dispositivos reconhecem e estabelecem a comunicação (*handshake*). No cabo de conexão elétrica entre o DCE e DTE, temos que levar em consideração uma inversão de pinos no conector, de modo a compatibilizar sinais de entrada e saída. Por exemplo, o sinal de Tx de um equipamento é conectado ao sinal de Rx, do outro. Devido a baixa taxa de transmissão e volume de dados envolvidos nesta aplicação, podemos optar por um modo simplificado de operação, que dispensa o uso dos sinais de *handshake*.

Sinal	Descrição	DTE	Dir	DCE
DCD	Data Carrier Detect	1	<	1
<i>RxD</i>	<i>Receive Data</i>	2	<	3
<i>TxD</i>	<i>Transmit Data</i>	3	>	2
DTR	Data Terminal Ready	4	>	4
<i>Gnd</i>	<i>Ground</i>	5	-	5
DSR	Data Set Ready	6	<	6
RTS	Request to Send	7	>	7
CTS	Clear to Send	8	<	8
RI	Ring Indicator	9	<	9

Tabela I: Tabela com sinais RS232 correspondentes aos pinos dos conectores do padrão DB9. Em itálico indicamos os pinos utilizados na interface simplificada como DCE

B. Padrão SDI-12

O SDI-12 consiste em um protocolo de comunicação serial assíncrono codificado em ASCII (acrônimo para *American Standard Code for Information Interchange*, ou "Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação"). Cada elemento do código ASCII consiste em 7 bits que representam um caractere, ou comando, de texto e um oitavo bit que pode servir para checar erro, ou a consistência da transmissão da informação (bit de paridade). Este padrão opera em uma taxa fixa de transferência de dados, *baud rate* de 1200. Uma

de suas características mais importantes é o fato de permitir a conexão a partir de um ponto central de até, no máximo, 62 endereços periféricos. Esse número corresponde aos endereços possíveis dentro do padrão SDI-12, codificados em um caractere alfanumérico, ou seja, de 0 a 9 (48 até 57 decimal), de "A" a "Z" (65 até 90 decimal) e de "a" a "z" (97 até 122 decimal) [3]. Deste modo é possível interligar um dispositivo mestre, de aquisição de dados, com vários periféricos, como sensores inteligentes que compartilham o mesmo meio físico, ou barramento, de comunicação. Cada sensor deve ter um endereço único, o que viabiliza a inclusão/exclusão de sensores sem grandes alterações do arranjo experimental.

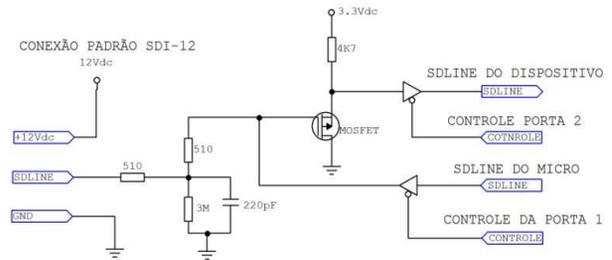


Figura 4: Circuito condicionamento de nível, ou *driver*, do padrão SDI-12

O SDI-12 opera com uma única linha de dados (SDI-Line), uma linha de referencia (terra) e uma linha de alimentação (12 volts) para os periféricos, limitada pelo cabeamento utilizado e pela potência do regulador (7812 encapsulamento TO220) representados no circuito da Figura 4. Por estas linhas são realizadas as transações entre as sondas e o dispositivo mestre de controle. A linha de dados é bidirecional, opera em *three-state*, e em lógica negativa. O estado binário *baixo* (*low*, *false* ou 0) corresponde a uma tensão de 3,5 a 5,5 volts e o estado *alto* (*high*, *true* ou 1) a -0,5 a 1,0 volts. Essa faixa de trabalho, no caso deste circuito, não é a mesma do microcontrolador (3,3V) que irá receber os dados, sendo então necessária a inclusão de um MOSFET para a compatibilização destes sinais. O intervalo entre estes dois estados é definido como estado de transição.

O protocolo SDI-12 apresenta um conjunto de comandos fundamentais padrão, conforme a Tabela 2, que normatizam a utilização de sensores de medida. O protocolo possui ainda caracteres especiais que são incluídos em alguns comandos como é o caso do caractere "*Spacing*" e "*Marking*" que consistem em apenas selecionar o estado da linha, para *baixo* e *alto*, respectivamente. Na Figura 5, mostramos as especificações de tempo e controle para o barramento SDI-12.

A comunicação realizada no barramento SDI-12 é multiplexada no tempo. Isto significa que na mesma linha o sentido de transmissão e recepção de dados é alternado. Na Figura 5 apresentamos o diagrama com as especificações de tempo para acesso ao barramento SDI-12. O sinal de *Break* corresponde a um nível lógico alto por 12 ms e é seguido de um sinal de *Marking*, correspondente a um nível lógico baixo durante pelo menos 8,33 ms, ambos enviados pelo dispositivo mestre (*Data Recorder*). Em seguida o *Data Recorder* (dispositivo mestre) envia o comando desejado. Após o envio do comando, o *Data Recorder* espera a resposta do sensor (dispositivo escravo), que precisa acontecer em até 15

Nome	Comando	Resposta
Atividade de Dispositivo	a!	a\r\n
Ativar dispositivo do endereço 0	aX1!	a\r\n
Realizar uma medida com o dispositivo 0	aD0!	a" valores medidos" \r\n

Tabela II: Exemplos de comandos SDI-12 utilizados por dispositivos que funcionam a partir do protocolo. O "a" representa o endereço do dispositivo que se deseja realizar a transação

ms. Essa resposta é precedida de um outro sinal de *Marking*, desta vez enviado pelo sensor (dispositivo escravo).



Figura 5: Diagrama da ordem de eventos para acesso ao barramento SDI-12

3. MICROCONTROLADORES E ELETRÔNICA EMBARCADA

Microcontroladores são componentes eletrônicos (circuitos integrados - CI), que incorporam as funções de CPU (do inglês, Unidade Central de Processamento), memórias (Flash e RAM - *Random Access Memory*) e módulos configuráveis de interfaces em um único componente de baixo custo [6]. Esses dispositivos permitem o projeto de circuitos inteligentes, programáveis em linguagem de alto nível, para aplicações dedicadas. Em contraposição aos computadores de uso genérico, também baseados em microprocessadores, os sistemas eletrônicos embarcados apresentam uma programação dedicada aos dispositivos, ou sistemas que as controlam. Se caracterizam por realizarem tarefas e requisitos, pré-definidos visando otimização de recursos, tamanho, consumo de energia e custos.

Neste circuito, é utilizado o microcontrolador ATmega 168p, de baixo custo e alto desempenho, fabricado pela AT-MEL [7]. Essa família é definida por sua tecnologia, capacidade de processamento, armazenamento, tipo de encapsulamento e conjunto de periféricos. Este dispositivo possui encapsulamento de 28 pinos. Devido a restrição do número de pinos, alguns sinais lógicos, ou funcionalidades, são configurados por software, de maneira excludente.

Na Figura 6, mostramos um diagrama das funcionalidades associadas aos pinos do componente. Em verde são mostrados os "ports", ou seja, registradores responsáveis por sinais digitais de entrada/saída (I/O). Em azul claro, identificamos os conversores analógico-digitais (ADC0 a ADC5), em laranja os sinais da comunicação I²C, entre outros. Por exemplo, o pino 3 do CI pode ser configurado para ser um sinal digital, de um *port* de entrada/saída (I/O) ou o sinal de transmissão de dados Tx da UART.

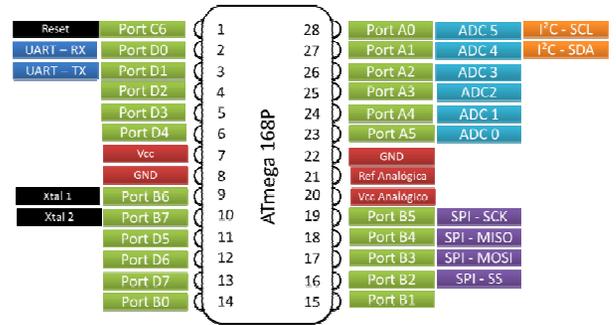


Figura 6: Diagrama de pinagem e funcionalidades do microcontrolador ATmega 168P

A placa eletrônica que efetua a conversão entre os protocolos SDI-12 e RS-232 foi projetada no software de desenvolvimento de layouts de placas de circuito impresso – EAGLE – e executada em um sistema fresador próprio para a fabricação de protótipos e é mostrada na Figura 7.

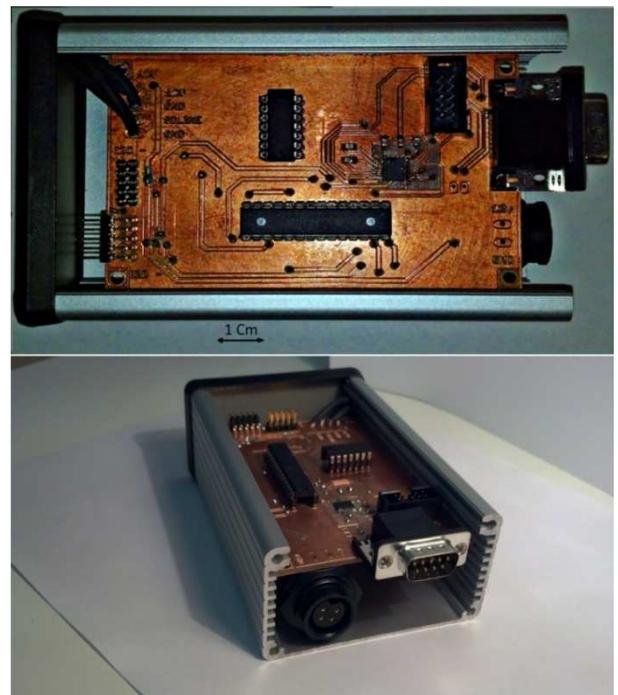


Figura 7: Módulo conversor RS232 para SDI-12

4. CIRCUITO DE CONTROLE E CONFIGURAÇÃO

Conforme mostra o esquemático apresentado no Anexo A, o circuito de controle é baseado no microcontrolador ATmega 168p, e nos circuitos de condicionamento de nível de sinal, padrão RS232 e SDI-12. O microcontrolador realiza a conversão do protocolo RS232 para o protocolo SDI-12 em operações de escrita e leitura bidirecionais.

O ATmega 168p possui uma interface configurável de UART, compatível com o protocolo RS232, que codifica e

decodifica os sinais recebidos por esses dois terminais em caracteres ASCII. Este canal foi configurado para um *baudrate* de 9600 bps. O controle de fluxo e o controle de paridade foram desabilitados.

O microcontrolador opera com níveis de tensão elétrica CMOS. Para converter os níveis de tensão CMOS (0 e 3,5 volt) do microcontrolador, em níveis de tensão RS-232 (+/- 12 volt) utilizamos o componente MAX3223 (da Maxim). O MAX3223 é um circuito integrado que inclui dois pares transmissor/receptor (*dual driver/receiver*) e supre internamente os níveis de tensão compatíveis com a norma TIA/EIA-232-F a partir de uma única tensão de alimentação de 5 volts (Vcc). Os pinos 2 e 3 do microcontrolador foram configurados como as linhas de comunicação RX e TX, respectivamente, da UART associados ao protocolo RS232 como DCE.

Para multiplexar e demultiplexar as informações que trafegam pela linha de dados SDI_LINE do barramento SDI-12 (sinais SDI_TX e SDI_RX), são utilizadas quatro sinais de I/O (PB0 a PB3, correspondendo aos pinos 14 ao 17 respectivamente), o transistor MOSFET (canal N FDD3682) Q1 e o CI 74LS125. O 74LS125 consiste em 4 portas lógicas de *buffers tri-state*. Estas portas permitem conectar e desconectar saídas digitais a uma mesma linha comum (barramentos). Quando desabilitado, pelo pino de controle (*enable EN*) conectado ao sinal de IO do microcontrolador, a saída do buffer apresenta alta impedância e se desconecta virtualmente do barramento. Deste modo, um dos pinos IO do microcontrolador está configurado para ler (pino 16, entrada do *port* de IO PB2) o sinal condicionado pelo transistor Q1, que é responsável por compatibilizar o nível do sinal que chega do sensor (0 a 5V) com o nível de trabalho do microcontrolador (0 a 3,3V). Outro pino é configurado para escrever (pino 15, saída do *port* PB1) no barramento SDI-12, e os outros sinais para habilitar a direção do tráfego (pinos 14 e 17, respectivamente sinais saídas de *port* PB0 e PB3). A multiplexação da linha de comunicação serial (pino 3 do conector SDI-12) e os níveis lógico de sinal e de tempo (*baudrate*) são implementados por software simulando uma UART.

O sincronismo de multiplexação e demultiplexação segue o esquema de tempo apresentado na Figura 5, onde os sinais marcados como comandos referenciam os dados transmitidos ao sensor e os sinais marcados como resposta referenciam os dados recebidos do sensor. Em uma operação de escrita, o pino PB3 é levado ao nível *alto* e o pino PB0 é levado ao nível *baixo* enquanto que os dados são transmitidos pelo pino PB1. Em uma operação de leitura o pino PB0 é levado ao nível *alto* e o pino PB3 a nível *baixo*, os dados são recebidos pelo pino PB2. A lógica representativa do padrão SDI-12 é reversa e, por este motivo, o transistor Q1 opera em modo seguidor de emissor, invertendo o nível lógico do sinal. O sinal de dados é revertido para a lógica direta.

5. PROGRAMAÇÃO

Para gravação do software no microcontrolador foi utilizada a placa STK500. Esta placa é uma plataforma de desenvolvimento que, além de programar os dispositivos AVR, realiza alguns testes didáticos e pode fazer a depuração do

programa criado.

O programa Atmel Studio é utilizado, em sua versão 6.0, para compilar os programas e bibliotecas criados, assim como para fazer a interface de programação com a placa STK500 via uma porta serial (COM) do computador.

O programa executado pelo microcontrolador controla as linhas lógicas do circuito e converte os dados entre os dois protocolos. Como descrito acima, o ATmega 168p possui uma UART, configurável por *firmware*, que foi utilizado para interfacear no padrão RS-232. Para o padrão SDI-12, as funções para codificação (serialização) e decodificação (paralelização e serialização) dos caracteres, é implementada por programação, em linguagem C. Basicamente, o sistema consiste em um ciclo que verifica se existe uma mensagem em ASCII no canal RS-232, para ser formatada, decodificada (por uma tabela interna de comandos) e enviada como comando para os periféricos conectados no canal SDI-12, ou se existe uma resposta dos periféricos neste canal pra ser formatada e enviada para a central via RS-232, como é mostrado no fluxograma da Figura 8.

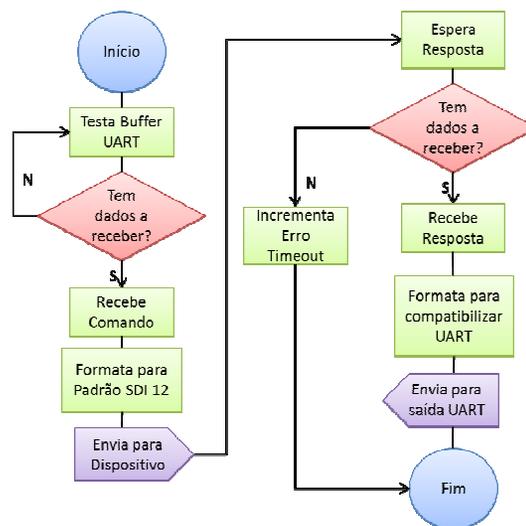


Figura 8: Fluxograma da rotina de operação do módulo de interface

Quando um comando de controle chega na interface via o canal RS-232, por exemplo, o comando “0!” (que serve para verificar se o sensor do endereço 0x0 está ativo), é serializado, sendo inserido os sinais de break e marking, necessários para a comunicação. Por outro lado o periférico endereçado enviará uma resposta padrão do comando “0!”, conforme Tabela 2 que consiste no próprio endereço e os caracteres *carriage return* (CR) e *line feed* (LF) via o canal SDI-12. Essa resposta indica que o sensor endereçado está ativo. Esse sinal convertido é então retransmitido via UART para o canal RS232.

Ainda deve ser observado que dois comandos SDI-12 consecutivos devem ser separados por um “marking”, como descrito na Figura 5.

6. APLICAÇÕES E RESULTADOS

Nos testes do módulo de interface, além deste, foram utilizados um computador pessoal e uma sonda multiparamétrica Quanta da Hydrolab.

Um software de terminal compatível com as portas de comunicação serial do computador foi utilizado para enviar os comandos para o conversor.

Os comandos SDI-12 utilizados para o teste foram "0X1!" e "0D0!", obtendo as respostas no formato apresentado na Tabela 3:

Comando	Resposta
0X1!	0<CR><LF>
0D0!	0+24.69+6.10+4.420+2.35+999.9<CR><LF>

Tabela III: Comandos para teste com a sonda SDI-12 e suas respectivas respostas

Ambas as respostas estão de acordo com o que é informado pelo manual do fabricante do equipamento [2].

Foi realizado um teste de aquisição com diversas concentrações de NaCl, gerando o gráfico da Figura 9.

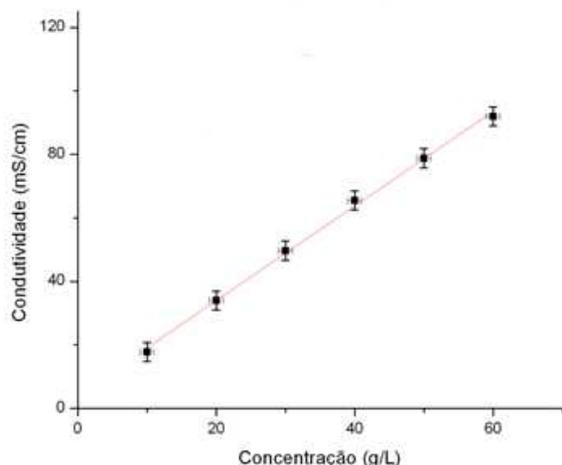


Figura 9: Curva obtida, para demonstração do funcionamento do módulo de interface e calibração da sonda Quanta, da medida de condutividade específica da água em função da variação da concentração de cloreto de sódio

7. CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um circuito de interface de controle de dispositivos protocolo de comunicação padrão SDI-12. Esta interface permite conectar, via protocolo RS-232, sondas inteligentes, muito usadas em monitoramento ambiental, a um computador pessoal, um *data logger*, ou através de um rádio modem, a uma central de controle. Para verificar a funcionalidade do módulo foram realizados testes de monitoramento e calibração, com uma sonda multiparamétrica comercial. Os resultados experimentais obtidos, demonstram o controle da sonda e a eficácia do sistema.

Apresentou-se de maneira didática, uma discussão acerca dos fundamentos básicos para compreensão de protocolos de comunicação seriais.

- [1] ISO ISO 7498: *Basic Reference Model for Open Systems Interconnection*, ISO, 1983.
- [2] Hydrolab, *Quanta Water Monitoring System Operating Manual Rev C*, Loveland: Hydrolab, 2002.
- [3] SDI-12 Support Group, *SDI-12: A Serial-Digital Interface Standard for Microprocessor Based Sensors*, River Heights, 2013.
- [4] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks 2ª*, Amsterdam: Prentice-Hall, 1989.

- [5] T. Fleming, "3V Systems Spur Evolution of the RS-232 Standard," *Microprocessors and Microsystems*, pp. 173-177, Abril 1994.
- [6] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*, New York: Cambridge University Press, 1989.
- [7] ATMEL. "8-bit Atmel Microcontroller with 4/8/16K Bytes In-System Programmable Flash ATmega48/V ATmega88/V ATmega168/V" Atmel Corporation. Revisão Maio 2011.

