

---

## Capítulo 3

---

### AUTOMAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Gutemberg Pereira Dias<sup>(1)</sup>  
Daniel Marçal de Queiros<sup>(2)</sup>  
Evandro Chaturni Mantovani<sup>(3)</sup>

#### 3.1. INTRODUÇÃO

Em 1983, o coordenador do encontro sobre “*Agricultural Electronics - 1983 and Beyonds*”, promovido pela *American Society of Agricultural Engineers*, já prefaciava nos anais do encontro que a grande necessidade para aplicações futuras da eletrônica na agricultura era o desenvolvimento de sensores e transdutores. Dizia também que as mais significativas oportunidades e problemas para serem resolvidos em benefício da agricultura estavam no domínio da eletrônica. Passados 15 anos, observa-se que a eletrônica realmente se tornou um poderoso aliado da mecanização no setor agrícola. Já não é mais possível trabalhar neste setor sem o mínimo de informações sobre conceitos relativos a esta área e suas diversas formas de utilização.

Os países desenvolvidos já se beneficiam a mais tempo das vantagens desta tecnologia, e com a globalização da economia, esta chega de forma agressiva nos países ainda em desenvolvimento. No Brasil, nas universidades e centros de pesquisa, diversos trabalhos já vêm sendo publicados sobre o uso da eletrônica na agricultura. Com o aumento das importações de máquinas agrícolas que usam a eletrônica de forma mais intensa, e com o conceito de agricultura de precisão como ferramenta para aumentar a competitividade e melhorar a autosustentabilidade do setor, torna-se imperioso o domínio desta tecnologia em nosso país.

---

<sup>(1)</sup> Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000, Viçosa, MG. E-Mail: gpdias@mail.ufv.br.

<sup>(2)</sup> Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-000, Viçosa, MG. E-Mail: queiroz@mail.ufv.br.

<sup>(3)</sup> Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo, CEP 35700-970, Sete Lagoas, MG. E-Mail: evandro@cnpmis.embrapa.br.

As possibilidades, e o mercado em potencial, são tão grandes que já existem empresas brasileiras ofertando produtos para o setor, nos quais é expressivo o uso da eletrônica, podendo-se citar, entre os já identificados em feiras comerciais:

- coletores eletrônicos de dados;
- computadores dedicados para monitoramento de dados;
- distribuidores de inseticida granulado, controlado por microprocessador, com motor elétrico acionado por pulsos de largura variável regulando taxa de aplicação.

Visando contribuir na divulgação da agricultura de precisão e, ao mesmo tempo, incentivar os técnicos do setor, ainda não familiarizados com o uso de eletrônica e informática, a se prepararem para esta nova realidade, aqui são abordados, de forma simples, aspectos qualitativos e conceituais de componentes e sistemas usados na automação de processos e no monitoramento de dados na agricultura de precisão.

A visão mais ampla e comum que se pode ter, dos sistemas de monitoração e controle utilizados na agricultura de precisão, é a que se observa na Figura 3.1. Um computador com softwares de manipulação de dados e mapas de aplicação de insumos a taxas variáveis, geograficamente referenciados, uma unidade de controle, onde os dados monitorados são processados inicialmente e os atuadores, responsáveis pela aplicação diferenciada dos insumos.

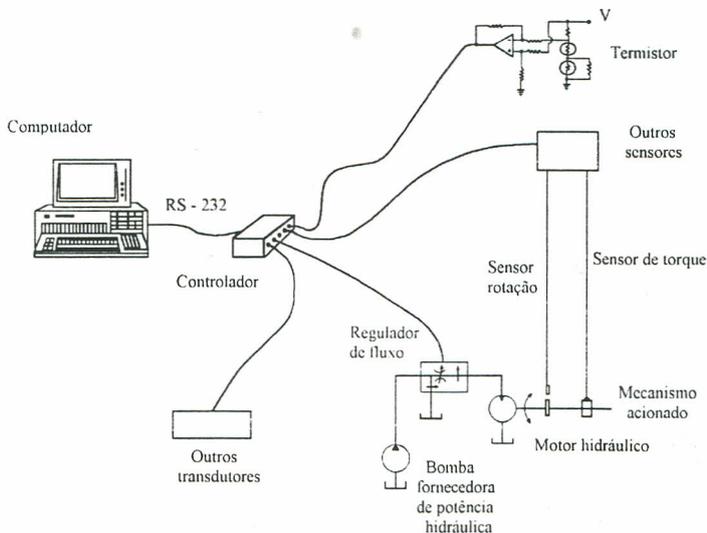


FIGURA 3.1. Visão geral dos componentes utilizados no monitoramento e controle dos processos em agricultura de precisão.

## 3.2. AUTOMAÇÃO

### 3.2.1. Sistemas de Controle Automático

Quando um operador controla o seu trator durante operações de cultivo, ele está realizando um controle manual. No controle automático existe apenas o envolvimento dos diversos subsistemas da máquina, como no caso da semeadora de precisão com dispositivo para variação do número de sementes depositadas por unidade de área. Se houver um aumento na velocidade de deslocamento da semeadora, a quantidade de sementes depositadas no solo será menor se a vazão permanecer constante. Neste caso, o próprio sistema faz as correções necessárias para alterar a vazão e colocar a quantidade preestabelecida. Dessa forma, controle pode ser definido como sendo o processo que visa modificar a ação de subsistemas de tal forma a fazer com que uma variável do sistema atinja um valor desejado, ou valor de referência.

O tipo de controlador mais utilizado em máquinas agrícolas é o baseado na realimentação (“*feedback*”). Realimentação é o processo em que a variável a ser controlada é medida e usada para influenciar o valor da própria variável. Um diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação é apresentado nas Figuras 3.2 e 3.3. Este tipo de controlador é utilizado tanto nos atuadores com movimento rotativo quanto nos atuadores lineares, conforme se observa na capítulo referente às Máquinas e Operações Utilizadas na Agricultura de Precisão.

Em um sistema de realimentação, a variável a ser controlada, como por exemplo o número de sementes por unidade de tempo, é determinada por um sensor, e a informação é realimentada para o processo para influenciar a variável controlada.

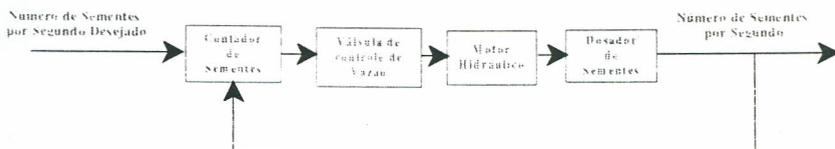


FIGURA 3.2. Diagrama de blocos de um sistema de dosagem de sementes.

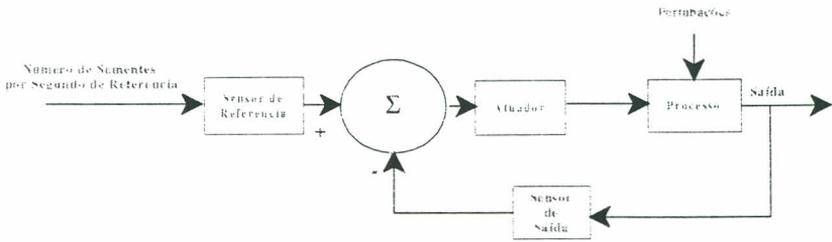


FIGURA 3.3. Diagrama de blocos de um sistema de controle por realimentação.

O componente central é o processo cuja variável de saída necessita ser controlada. As perturbações representam as alterações que o sistema pode sofrer, como por exemplo variações na força de atrito entre sementes e componentes do mecanismo dosador. O atuador é o componente que influencia a variável do processo a ser controlada, representado nesse caso pelo motor hidráulico. O sensor de saída é responsável por medir o resultado final do sistema, nesse caso, o número de sementes por segundo que foi realmente dosado. O resultado fornecido por esse sensor geralmente não está na forma direta do número de sementes dosadas, mas sim na forma de um sinal elétrico. O comparador, representado pelo símbolo  $\Sigma$ , determina o erro, ou seja a diferença entre o valor de referência e o valor de saída. Essa diferença é utilizada pelo atuador no controle do processo.

Uma das formas mais utilizadas na análise dos controladores por realimentação é uso das transformadas de Laplace, as quais tornam possível a conversão das equações diferenciais que regem o sistema em equações algébricas.

Por exemplo, um sistema representado pelo diagrama de blocos na Figura 3.4 tem a função de transferência, ou razão entre o sinal de saída  $Q_0(s)$  e o sinal de entrada  $Q_1(s)$ , representada pela equação 1 (OGATA, 1992). Neste caso, essa função é denominada função de transferência para loop fechado.

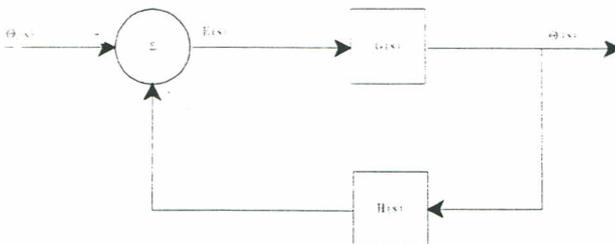


FIGURA 3.4. Diagrama de um sistema de loop fechado usando as funções no domínio  $s$ .

$$\frac{\Theta_0(s)}{\Theta_i(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad \text{eq.3.1}$$

em que:

- $\Theta_0(s)$  - Sinal de saída do sistema no domínio  $s$ ;
- $\Theta_i(s)$  - Sinal de entrada do sistema no domínio  $s$ ;
- $G(s)$  - Função de transferência pelo qual o erro é multiplicado;
- $H(s)$  - Função de transferência do sinal que é realimentado.

Na Figura 3.5 é apresentado o diagrama de blocos de um controlador. Para cada ação de controle, a razão entre o sinal de saída do controlador  $M(s)$  e o sinal de correção, ou também denominado sinal erro  $E(s)$ , é relacionado por uma função de transferência que depende do tipo de controlador utilizado. Um dos tipos de controladores utilizados é o proporcional, sendo a função de transferência dada por:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = G_c(s) = K_p \quad \text{eq.3.2}$$

em que:

- $G_c(s)$  - função de transferência do controlador no domínio  $s$ ;
- $K_p$  - ganho proporcional.

Para um controlador do tipo integral a função de transferência é dada por:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = G_c(s) = \frac{K_i}{s} \quad \text{eq.3.3}$$

em que:

- $K_i$  - ganho integral.

Para um controlador do tipo proporcional-integral a função de transferência é dada por:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{eq.3.4}$$

em que:

- $T_i$  - tempo integral.

Para um controlador do tipo proporcional-derivado a função de transferência é dada por:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = G_c(s) = K_p(1 + T_d s) \quad \text{eq.3.5}$$

em que:

$T_i$  - tempo derivativo.

Para um controlador do tipo proporcional-integral-derivado a função de transferência é dada por:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{eq.3.6}$$

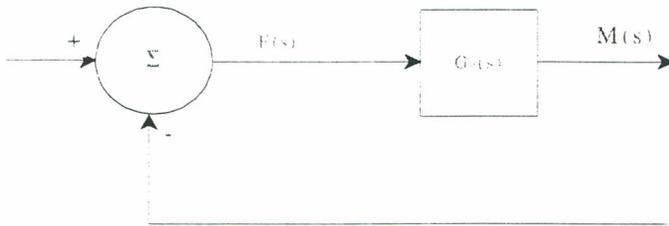


FIGURA 3.5. Diagrama de blocos de um controlador.

Para ilustrar a aplicação dos controladores será mostrado como exemplo a utilização de um controlador proporcional e um controlador proporcional integral derivado (PID) em um motor de corrente contínua, com a finalidade de manter sua velocidade angular em um valor pré-determinado. Na Figura 3.6 é apresentado um esquema de motor de corrente contínua, e as duas equações diferenciais capazes de descrever o comportamento dinâmico desse motor, segundo FRANKLIN et al. (1994), são dadas por:

$$J_m \ddot{\theta}_m + b \dot{\theta}_m = K_t i_a + T_L \quad \text{eq.3.7}$$

$$K_e \dot{\theta}_m + L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = v_a \quad \text{eq.3.8}$$

em que:

- $J_m$  - momento de inércia do rotor do motor,  $\text{kg m}^2$ ;
- $\theta_m$  - deslocamento angular do rotor, rad;
- $b$  - coeficiente de atrito,  $\text{N m s}$ ;
- $K_t$  - constante de torque do motor,  $\text{N A}^{-1}$ ;
- $i_a$  - corrente elétrica, A;
- $T_L$  - torque externo aplicado ao eixo do motor,  $\text{m N}$ ;
- $K_e$  - constante de tensão do motor,  $\text{V s}$ ;
- $L_a$  - indutância da armadura, H;
- $R_a$  - resistência elétrica da armadura,  $\Omega$ ;
- $v_a$  - voltagem aplicada na armadura do motor, V
- $t$  - tempo, s.

Aplicando a transformada de Laplace nas equações 3.7 e 3.8 e após algumas transformações algébricas é possível obter a equação 3.9 que representa a função de transferência entre a voltagem de entrada  $V_a(s)$ , o torque aplicado ao eixo do motor pela corrente elétrica  $T_L(s)$  e a velocidade angular do motor

$\dot{\theta}_m(s)$

$$\dot{\theta}_m(s) = \frac{A}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} V_a(s) + \frac{B}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} T_L(s) \quad \text{eq. 3.9}$$

em que:

$$A = \frac{K_t}{bR_a + K_t K_e} \quad \text{eq.3.10}$$

$$B = \frac{1}{bR_a + K_t K_e} \quad \text{eq.3.11}$$

$$\tau_{1,2}^{-1} = \frac{(J_m R_a + bL_a) \pm \sqrt{(J_m R_a + bL_a)^2 - 4J_m L_a (bR_a + K_t K_e)}}{2J_m L_a} \quad \text{eq.3.12}$$

Na Figura 3.7 é apresentado um esquema de um sistema de controle do motor de corrente contínua utilizando o princípio da realimentação, de acordo com a equação 9 para representar o comportamento dinâmico do motor. O controlador pode ser modelado usando-se uma das funções de transferência que são apresentadas nas equações de 3.2 a 3.6.

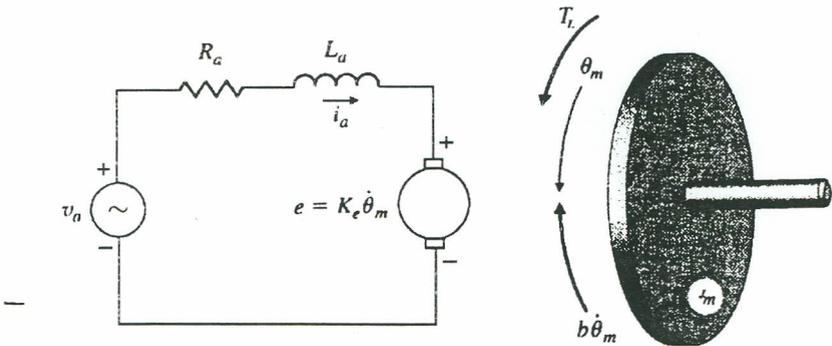


FIGURA 3.6. Esquema mostrando o circuito elétrico de um motor de corrente contínua e o diagrama de corpo livre do seu rotor.

Escolhendo-se um controlador do tipo proporcional, dado pela função de transferência da equação 3.2, um motor que tenha os seguintes parâmetros de funcionamento:  $t_1=1/60$ ;  $t_2=1/600$ ;  $A=10$  e  $B=50$  pode ser modelado utilizando-se o *software SIMULINK*. Na Figura 8 é apresentado o modelo gerado nesse software admitindo-se uma velocidade angular de referência de 100 rad/s (aplicada na forma de função step), uma carga externa aplicada  $T_L$  de  $-0.1$  mN e um ganho proporcional  $K_p$  de  $4$  V rad<sup>-1</sup> s. A variação da velocidade angular com o tempo é apresentada no gráfico da Figura 3.9.

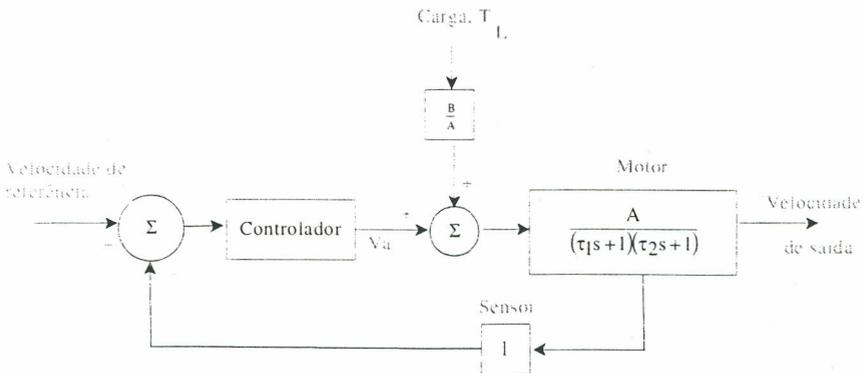


FIGURA 3.7. Diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade angular de um motor de corrente contínua.

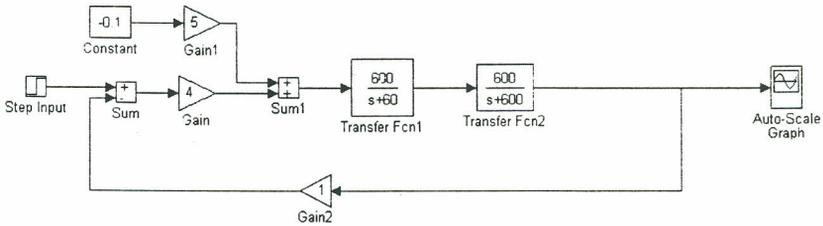


FIGURA 3.8. Diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade angular para o motor de corrente contínua com controlador proporcional com ganho de  $4 \text{ V rad}^{-1} \text{ s}$ .

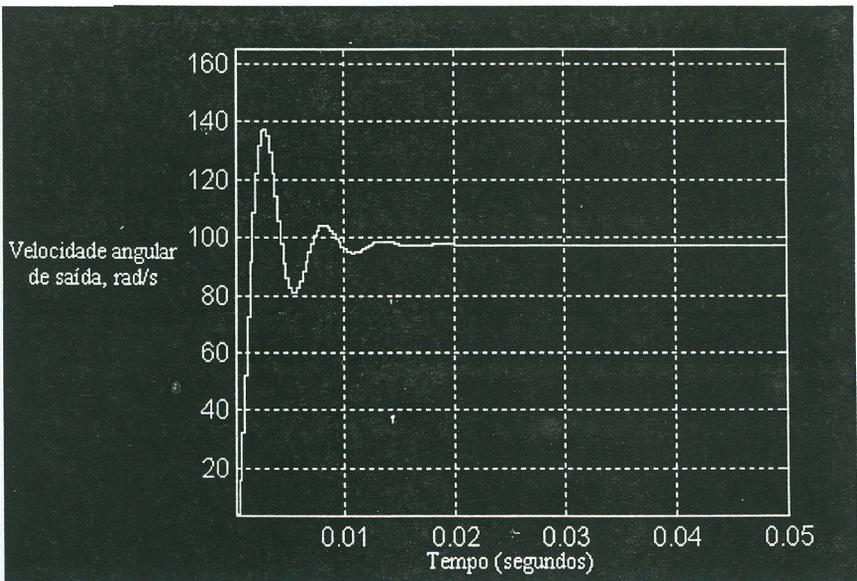


FIGURA 3.9. Velocidade angular de saída do motor de corrente contínua versus tempo, modelado usando um controlador proporcional com ganho de  $4 \text{ V rad}^{-1} \text{ s}$ .

Escolhendo-se um controlador do tipo proporcional integral derivado (PID), dado pela função de transferência da equação 6, um motor que tenha os seguintes parâmetros de funcionamento:  $t_1=1/60$ ;  $t_2=1/600$ ;  $A=10$  e  $B=50$  pode ser modelado utilizando-se o *software SIMULINK* de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 3.10. Admitindo-se uma velocidade angular de referência de  $100 \text{ rad/s}$  (aplicada na forma de função step), uma carga externa aplicada  $T_L$  de  $-0,1 \text{ m N}$ , um ganho proporcional  $K_p$  de  $4 \text{ V rad}^{-1} \text{ s}$ , um tempo

integral de 0,012 s e um tempo derivado de 0,001s obtém-se a variação da velocidade angular do motor com o tempo apresentada na Figura 3.11. Comparando-se o resultado do controlador PID com o controlador proporcional pode-se verificar que o controlador PID apresenta uma menor amplitude de flutuação da velocidade angular que o controlador proporcional. Além disso, ao final de 0,5 segundos a velocidade de saída obtida com o controlador PID está mais próxima do valor de referência do que a obtida com o controlador proporcional. O desempenho desses dois tipos de controladores podem ser melhorados utilizando-se parâmetros mais apropriados para esses controladores.

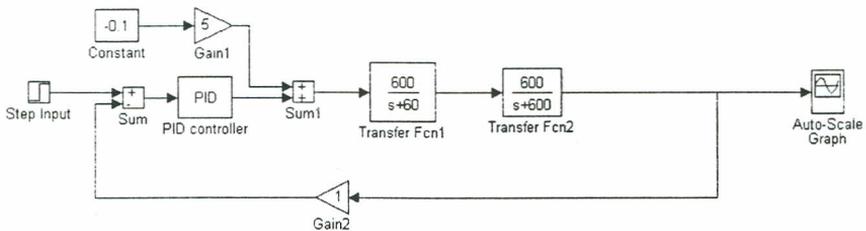


FIGURA 3.10. Diagrama de blocos do sistema de controle de velocidade angular para o motor de corrente contínua utilizando-se um controlador PID com ganho de 4  $\text{V rad}^{-1} \text{s}$ , tempo integral de 0,012 s e tempo derivado de 0,0001 s.

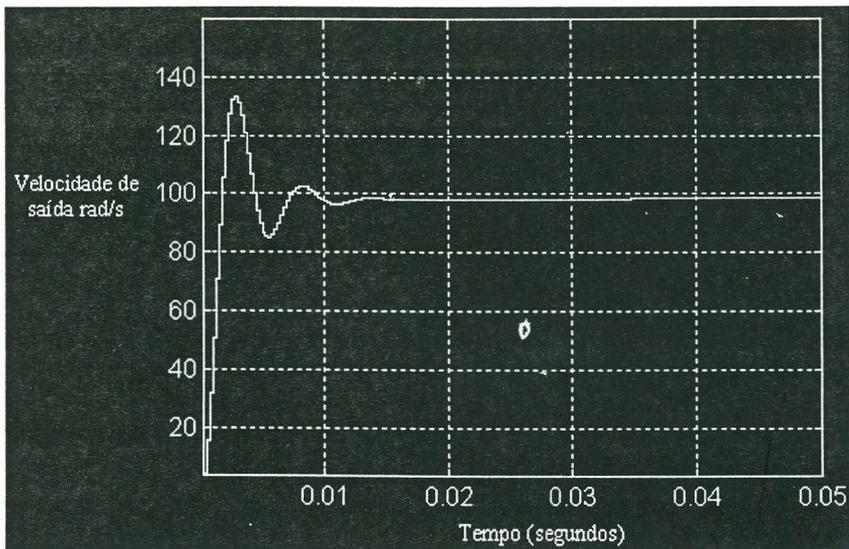


FIGURA 3.11. Gráfico da velocidade angular de saída do motor de corrente contínua versus tempo, modelado usando um controlador PID com ganho de proporcional de 4  $\text{V rad}^{-1} \text{s}$ , tempo integral de 0,012 s e tempo derivado de 0,0001 s.

### 3.2.2. Controladores hidráulicos

Os controladores utilizados em máquinas agrícolas geralmente trabalham por princípios hidráulicos, por isso será apresentado a seguir as funções de transferências de dois tipos de controladores hidráulicos: a) motor hidráulico rotativo controlado por uma servo-válvula e b) motor hidráulico controlado por uma bomba hidráulica de vazão variável.

Na Figura 3.12 é apresentado o esquema de um motor hidráulico rotativo controlado por uma servo-válvula. Assumindo que os orifícios da servo-válvula têm a mesma dimensão e são simétricos, a pressão nas linhas irão variar para cima e para baixo de  $P_s/2$  de um modo total de tal forma que a perda de carga através dos orifícios são idênticas. Dessa forma os coeficientes das válvulas para o fluxo entrando no motor e o fluxo saindo deste são os mesmos, e assumindo um pressão de suprimento constante, MERRIT (1966) obteve as seguintes funções de transferência:

$$\frac{\Delta\theta_m}{\Delta x_v} = \frac{\frac{K_q}{D_m}}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad \text{eq.3.13}$$

$$\frac{\Delta\theta_m}{\Delta T_L} = \frac{-\frac{K_{ce}}{D_m^2} \left( 1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right)}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad \text{eq.3.14}$$

em que:

- $\theta_m$  - posição angular do eixo do motor, rad;
- $x_v$  - deslocamento da válvula em relação a sua posição central, m;
- $K_q$  - ganho de fluxo da válvula,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ;
- $D_m$  - deslocamento volumétrico do motor,  $\text{m}^3 \text{rad}^{-1}$ ;
- $s$  - operador de Laplace,  $\text{s}^{-1}$ ;
- $\omega_h$  - frequência natural do sistema hidráulico sem amortecimento,  $\text{rad s}^{-1}$ ;
- $\delta_h$  - razão de amortecimento hidráulico, adimensional;
- $T_L$  - torque aplicado no eixo do motor, m N;
- $K_{ce}$  - coeficiente total de fluxo e de pressão,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ ;
- $V_t$  - volume total contido nas câmaras de entrada e de saída,  $\text{m}^3$ ;
- $\beta_e$  - módulo efetivo do sistema (incluindo óleo, ar dissolvido no óleo, e deformação das câmaras), Pa.

A frequência natural do sistema hidráulico sem amortecimento é dada por:

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e D_m^2}{V_t J_t}} \quad \text{eq. 3.15}$$

em que:

$J_t$  - momento de inércia total do motor e da carga aplicada ao motor (com referência ao eixo do motor),  $\text{kg m}^2$ .

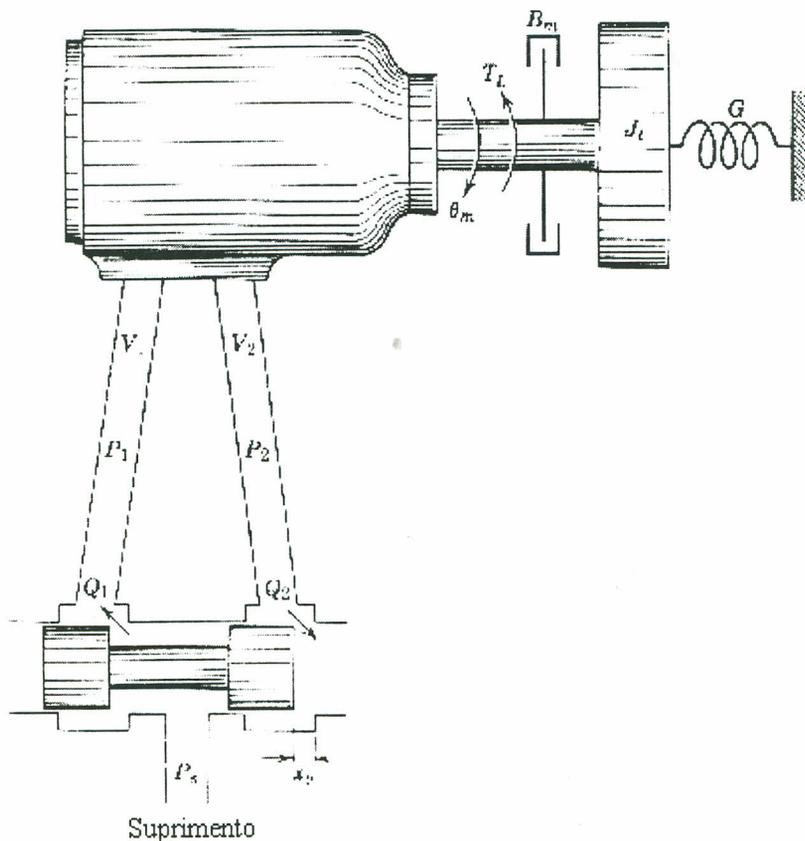


FIGURA 3.12. Esquema de um motor hidráulico com servo-válvula.

A razão de amortecimento hidráulico é dada por:

$$\delta_h = \frac{K_{ce}}{D_m} \sqrt{\frac{\beta_e J_t}{V_t}} + \frac{B_m}{4D_m} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_e J_t}} \quad \text{eq. 3.16}$$

em que:

$B_m$  - coeficiente de amortecimento viscoso (deve incluir o amortecimento interno do motor) da carga, m N s.

O coeficiente total de fluxo e de pressão é dado por:

$$K_{ce} = K_c + C_{im} + \frac{C_{em}}{2} \quad \text{eq. 3.17}$$

em que:

$C_{im}$  - coeficiente de vazamento interno do motor (da linha de entrada para a linha de saída),  $m^3 s^{-1} Pa^{-1}$ ;

$C_{em}$  - coeficiente de vazamento externo do motor (das linhas de entrada e saída para a linha de dreno),  $m^3 s^{-1} Pa^{-1}$ .

A equação 3.13 é a forma usual de uma função de transferência entre uma servo-válvula e um motor hidráulico. A função de transferência contém uma integração implicando que a velocidade angular do motor hidráulico é proporcional à posição da válvula quando esta varia de posição lentamente. O fator  $K_q/D_m$  representa o ganho da válvula dividido pelo deslocamento do motor. A equação 3.14 representa a diminuição da velocidade angular do motor devido a carga aplicada. O máximo ganho ocorre quando a carga aplicada é nula. Quando a carga aplicada é máxima pode-se demonstrar que o ganho é reduzido para 57,7% do ganho sem carga.

A Figura 3.13 apresenta o esquema de um motor hidráulico controlado por uma bomba hidráulica de vazão variável. As funções de transferência que relacionam a posição angular do eixo do motor com o ângulo da alavanca de controle de vazão da bomba e com a carga aplicada são dadas por:

$$\frac{\Delta\theta_m}{\Delta\phi} = \frac{k_p N_p}{D_m} \frac{1}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad \text{eq. 3.18}$$

$$\frac{\Delta\theta_m}{\Delta T_L} = \frac{-\frac{C_t}{D_m^2} \left( 1 + \frac{V_0}{\beta_e C_t} s \right)}{s \left( \frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad \text{eq. 3.19}$$

em que:

- $\phi$  - ângulo da alavanca que controla o deslocamento da bomba, graus;
- $k_p$  - gradiente de deslocamento do controle da bomba,  $\text{m}^3 \text{rad}^{-1} \text{graus}^{-1}$ ;
- $N_p$  - velocidade angular do eixo da bomba,  $\text{rad s}^{-1}$ ;
- $C_t$  - coeficiente de vazamento total,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ ;
- $V_0$  - volume médio da câmara de entrada (inclui um lado da bomba e do motor, a linha de conexão, e volumes associados a válvulas de retenção e de alívio,  $\text{m}^3$ ).

Para o sistema motor hidráulico controlado por uma bomba hidráulica a frequência natural sem amortecimento e o coeficiente de amortecimento hidráulico são dados por:

$$\omega_h = \sqrt{\frac{\beta_e D_m^2}{V_0 J_t}} \quad \text{eq. 3.20}$$

$$\delta_h = \frac{C_t}{2D_m} \sqrt{\frac{\beta_e J_t}{V_0}} + \frac{B_m}{2D_m} \sqrt{\frac{V_0}{\beta_e J_t}} \quad \text{eq. 3.21}$$

O coeficiente de vazamento total é dado por:

$$C_t = C_{ip} + C_{im} + C_{ep} + C_{em} \quad \text{eq. 3.22}$$

em que:

- $C_{ip}$  - coeficiente de vazamento interno da bomba (da linha de entrada para a linha de saída),  $m^3 s^{-1} Pa^{-1}$ ;
- $C_{im}$  - coeficiente de vazamento interno do motor hidráulico,  $m^3 s^{-1} Pa^{-1}$ ;
- $C_{cp}$  - coeficiente de vazamento externo da bomba (da linha de entrada para o dreno),  $m^3 s^{-1} Pa^{-1}$ ;
- $C_{cm}$  - coeficiente de vazamento externo do motor hidráulico,  $m^3 s^{-1} Pa^{-1}$ .

A equação 3.18 representa o ganho do sistema quando não existe carga aplicada ao motor hidráulico e a equação 19 representa a queda na rotação do eixo do motor devido a aplicação de carga.

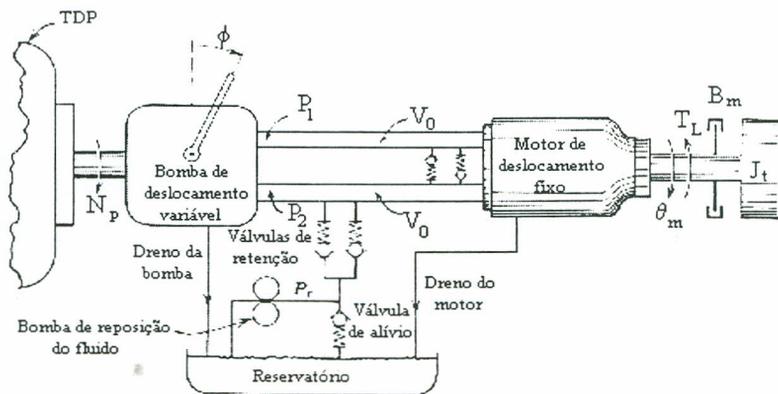


FIGURA 3.13. Esquema de um motor hidráulico controlado por uma bomba hidráulica de vazão variável.

### 3.3. INSTRUMENTAÇÃO

Geralmente as medidas de uma determinada quantidade, ou dos valores de determinada grandeza física, ou variável, envolve o uso de um instrumento de medida. Esse instrumento permite que uma pessoa possa medir o valor de uma grandeza desconhecida, que o ser humano, somente com suas qualificações, não seria capaz de realizar. O instrumento de medida pode portanto ser definido como sendo um invento para a determinação do valor de uma quantidade ou variável.

A abordagem sobre instrumentação em agricultura de precisão que aqui é feita, visa familiarizar o profissional que trabalha em pesquisa mas que não tem uma formação específica na área de instrumentação e eletrônica. O objetivo é adequar o vocabulário técnico e despertar o interesse no conhecimento do assunto, permitindo não só facilitar a aquisição de equipamentos como também facilitar o diálogo com profissionais desta área no caso de condução de projetos em parceria.

Durante a realização de medidas de grandezas físicas são empregados diversos termos que, para facilidade de comunicação entre os envolvidos no processo, pelo menos os principais devem ser de início definidos:

- **sensores** são dispositivos ou componentes de um sistema de medida de grandezas físicas que reagem às mudanças do ambiente. A exemplo, tem-se a variação do valor da resistência elétrica de um fio de constantan de um termômetro elétrico de resistência, ou a variação no valor do comprimento, e conseqüente curvatura, de um termostato de lâminas bimetálicas;

- **transdutores** são dispositivos que convertem um determinado tipo de energia em outro tipo de energia, a exemplo do termopar que converte energia térmica em energia elétrica, ou uma termopilha, ou um fototransistor que transformam energia luminosa em corrente elétrica;

- **instrumento** é um invento para a determinação do valor ou magnitude de uma quantidade ou variável. Pode ser baseado, entre outros, em princípios mecânicos, elétricos, óticos ou eletrônicos, sendo o último princípio o que hoje predomina na construção de instrumentos de medida;

- **exatidão** é o termo que representa o quanto o valor de uma determinada grandeza medida pelo instrumento se aproxima do verdadeiro valor desta grandeza;

- **precisão** é o termo que representa a repetibilidade de uma medida, ou seja, representa o desvio entre medidas sucessivas de uma mesma grandeza, mesmo que ela não seja exata;

- **resolução** é a menor mudança no meio ambiente que causa uma mudança na indicação do instrumento. No caso de um termômetro, se a menor divisão da escala for 1°C a resolução é de 1°C;

- **linearidade** é o máximo desvio encontrado em relação à reta de calibração, geralmente expresso em termos de percentagem em relação ao maior valor que pode ser lido, ou fundo de escala do instrumento;

- **constante de tempo** é o valor correspondente a 63,2% do valor de equilíbrio de uma variável, ou seja, toda vez que se expõe um instrumento à ação de uma grandeza física (ex: aplicação de tensão elétrica aos terminais de um voltímetro)

o sensor/transdutor do instrumento leva algum tempo para alcançar o equilíbrio, ou para levar o indicador do valor à posição correspondente ao valor medido:

- **tempo de resposta** é tempo que o sensor/transdutor leva para entrar em equilíbrio com o valor da grandeza física medida.

### 3.3.1. Sensores e transdutores

Apesar da distinção no modo de funcionamento entre sensores e transdutores, em certos casos fica difícil dizer se o que se tem às mãos é um sensor ou um transdutor. Por uma questão de simplicidade, na seqüência será usado o termo sensor indistintamente para sensores ou transdutores, cabendo a cada um a distinção, nos casos específicos, para citação em textos técnicos.

Os sensores podem ser classificados em ativos (produzem uma tensão de saída sob ação de uma grandeza física) ou passivos (necessitam de uma fonte de alimentação para funcionarem), ou ainda podem ser classificados como sensores analógicos ou digitais. Nos analógicos, o sinal de saída varia de forma contínua, e nos digitais a saída é na forma de pulsos de tensão bem definidos. Os sinais digitais podem ser aplicados diretamente a sistema de aquisição de dados digitais ou a computadores, desde que o nível de tensão seja compatível com a tensão dos componentes do sistema. Os sinais analógicos por sua vez devem primeiro ser convertidos em sinais digitais (conversão analógica/digital ou conversão A/D) antes de serem introduzidos nos sistema de aquisição de dados digitais ou computadores.

### 3.3.2. Condicionamento de sinais

Um dos grandes objetivos do condicionamento de sinais é reduzir o efeito do ruído elétrico que geralmente acompanha a saída dos sensores. Este ruído vem, entre outros, como consequência do funcionamento de motores de combustão com ignição por centelha, do arco voltaico dos aparelhos de solda elétrica, do funcionamento de motores elétricos, lâmpadas fluorescentes e estações de rádio e de TV.

**Amplificação do sinal:** um grande número de sensores usados na agricultura de precisão e em sistemas de controle e aquisição eletrônica de dados têm um valor de saída muito baixo, a exemplo de terminares que têm saída na ordem de mV (ex: cobre/constantan com 39 mV por °C de elevação da temperatura), ou

na melhor das hipóteses em mV (ex: ponte de Weatstone com extensômetros elétricos de resistência com 1 mV por V de alimentação da ponte). Se existir ruído elétrico presente, sua tensão ou corrente podem ter valores que ultrapassem o valor de saída dos próprios sensores, impossibilitando as medidas.

A amplificação do sinal, antes de sua exposição ao ambiente com presença de ruídos elétricos permite aumentar a relação sinal/ruído e com isto diminuir o efeito do ruído. A amplificação destes sinais tem sido feita com a utilização de componentes denominados amplificadores operacionais (Figura 3.14), que têm elevada capacidade de amplificação, simplicidade de projeto e baixo custo. Dependendo da forma de ligação ao sensor, são também capazes de “rejeitar” interferências elétricas de sinais espúrios.

Além disto, como a eletrônica digital tem predominado nos sistemas de aquisição e manuseio de dados eletrônicos, e a tensão dos componentes dos circuitos digitais são predominantemente em níveis de 5V, há a necessidade de amplificação dos níveis analógicos de saídas dos sensores para posterior conversão em sinais digitais.

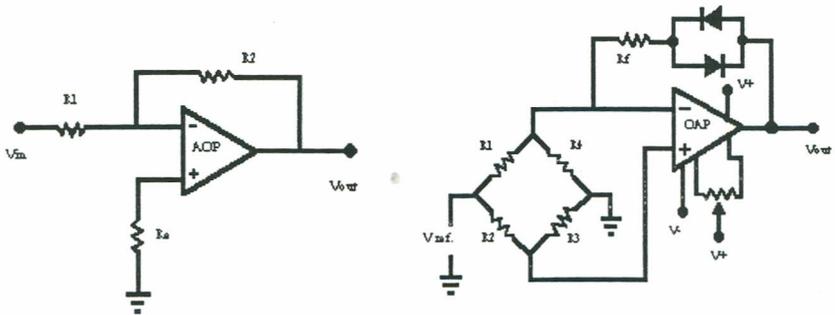


FIGURA 3.14. Exemplos de amplificadores operacionais de baixo custo e elevado ganho.

### Conversão de frequência para tensão e tensão para frequência:

outra forma de se minimizar o efeito do ruído elétrico é a transformação do sinal analógico de saída do sensor em sinal digital, e em seguida transmiti-lo ao sistema de aquisição de dados na forma binária. Como o sinal será transmitido na forma de frequência, o ruído irá interferir na amplitude do sinal mas não na sua frequência, praticamente eliminando o seu efeito. O processo de conversão do sinal em uma frequência proporcional ao valor do sinal medido denomina-se modulação e o processo inverso denomina-se demodulação. É muito comum a transmissão de dados nesta forma, e o dispositivo que executa estas transformações denomina-se MODEM (de MODulador/DEModulador).

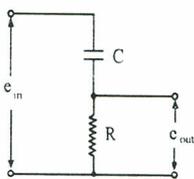
**Filtragem do sinal:** a eliminação do ruído resultante da radiação eletromagnética existente em torno de um sistema de aquisição de dados pode exigir, além dos processos citados anteriormente, blindagem dos condutores e processadores dos sinais e a filtragem do ruído.

A filtragem é utilizada quando o ruído, ou outro tipo de sinal que acompanha o sinal desejado, tem uma frequência diferente da frequência do sinal de interesse.

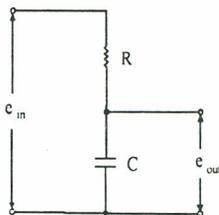
Existem diversos tipos de filtros (filtro ativo, filtro passivo) e que atuam de acordo com o tratamento que se deseja dar ao sinal. Em instrumentação tem sido utilizado o filtro passivo, constituído de resistores e condensadores, pois cumprem bem a função e são compactos. A exemplo, a seguir são discutidos os princípios de funcionamento de dois dos diversos tipos de filtros que são utilizados nos sistemas instrumentados:

- **filtros passa baixo** - na Figura 3.15A tem-se um esquema simplificado de um filtro, passivo, tipo passa baixo. Como o capacitor oferece uma impedância inversamente proporcional à frequência do sinal ( $Z_C = 1/2\pi fC$ ), quanto menor a frequência, maior a impedância, e quanto maior a frequência menor a impedância, limitando a passagem da baixa frequência pelo capacitor, disponibilizando-a portanto no ponto out, mas facilitando a passagem da alta frequência através dele e descarregando-a para o terra. Como ele filtra a alta frequência para o terra e disponibiliza a baixa frequência no ponto out o filtro é denominado filtro passa baixo.

- **filtros passa alto** - na Figura 3.15B tem-se o esquema simplificado do filtro passa alto. Neste caso, a baixa impedância à alta frequência e a alta impedância à baixa frequência faz com que o capacitor permita primordialmente a passagem da alta frequência, daí o nome filtro passa alto.



(B)



(A)

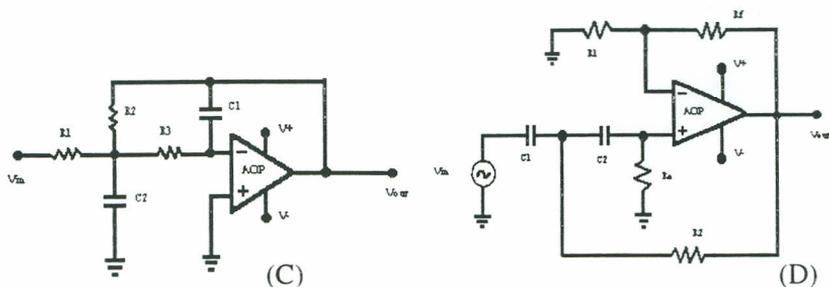


FIGURA 3.15. Circuito de filtro passivo passa baixo (A), passa alto (B), filtro ativo passa baixo e ativo passa alto.

**Aterramento** - sempre que um sensor estiver afastado do sistema de aquisição de dados, existirá a chance de dois pontos de aterramento não estarem ao mesmo potencial, e é importante distinguir entre o potencial de aterramento de partes da carcaça metálica do sistema de aquisição de dados e o potencial de aterramento do “terra” propriamente dito. Todos os condutores elétricos usados para aterramento devem ser de baixa impedância, adequados para drenarem qualquer corrente que surja para o ponto de aterramento e ligados todos em um único ponto para evitarem o surgimento de diferenças de potenciais que podem interferir nos sinais monitorados. Além disto, o sistema deve também ser conectado ao “terra” propriamente dito.

### 3.3.3. Sistemas de aquisição de dados por microcomputadores

Existe no mercado nacional e internacional os mais variados modelos de sistemas de aquisição de dados, e a escolha entre o quê adquirir (ou desenvolver) depende, além da disponibilidade de conhecimento sobre o assunto:

- de respaldo financeiro para a aquisição;
- do número de variáveis que serão controladas;
- do quanto “amigável” se deseja a interface com o usuário;
- da confiabilidade esperada do sistema;
- do número de dados amostrados por unidade de tempo;
- da exatidão e precisão desejada nas medidas;
- da existência de uma boa assistência técnica.

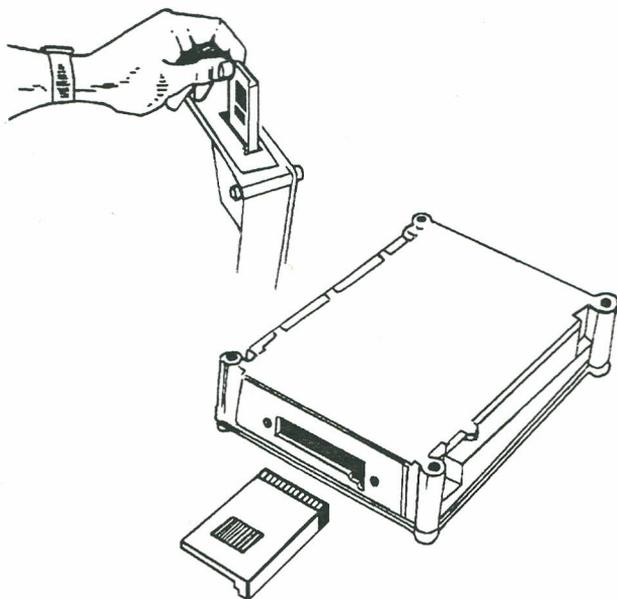
No caso da mecanização agrícola não se deve esquecer também, que apesar do conhecimento que se tem hoje sobre sensores e transdutores, é de se esperar que novos dispositivos de medida surgirão com a evolução, por exemplo

da agricultura de precisão. Os sistemas de aquisição de dados deverão ter flexibilidade para receber diferentes tipos de sensores, manusear sinais elétricos que poderão estar na forma de corrente, tensão ou frequência e fornecer um ou mais tipos de corrente ou tensão para excitação destes dispositivos. Além disto, no caso de regiões subtropicais e tropicais, o calor gerado pelo sistema deve ser baixo para evitar a necessidade de resfriamento no campo, onde geralmente a temperatura ambiente já é alta em certas épocas do ano, e o ar, provavelmente, contém pó, o qual deverá ser filtrado pelo sistema de resfriamento. Como são principalmente para uso em unidades agrícolas móveis, deve também suportar bem, além do calor e poeira, vibrações e umidade, seja da água contida no ar, da resultante de sistemas de irrigação ou da própria chuva. A fonte de energia elétrica para o sistema deve também ser compatível com o sistema elétrico das unidades móveis (geralmente 12 ou 24 Vcc). Com respeito à alimentação elétrica do sistema, esta deve ser independente do circuito elétrico da máquina, evitando com isto o ruído elétrico advindo das escovas do motor de partida, da recarga de baterias, do acionamento de válvulas ou solenóides de sistemas atuadores eletro-hidráulicos.

Diversos tipos de medidas são efetuados em sistemas desenvolvidos para controle por meio de dispositivos eletrônicos, e entre elas pode-se mencionar as medidas de torque, velocidade angular de eixos, temperatura, pressão e taxas de fluxo. Transdutores e sensores elétricos produzem sinais em corrente contínua (DC) ou corrente alternada (AC) que podem ser ou não função linear dos valores da grandeza física medida. Tais sinais podem alimentar conversores analógicos/digitais e daí ir direto para computadores ou serem registrados por qualquer outras das formas disponíveis de registro (registradores gráficos, gravação em fita magnética, e outros).

No caso de máquinas em deslocamento no campo, o registro de dados torna-se um pouco mais complicado em função das vibrações e as dificuldades que os sistemas convencionais de gravação em computador apresentam, já que a manutenção da posição das cabeças gravadoras, seja do drive de disco ou do disco rígido, é mais difícil. A solução adotada na área de agricultura de precisão para registro dos dados foi o uso de *chips* de memória embutidos em cartões e conectados ao circuito do computador. Estas unidades de memória têm sua própria alimentação elétrica por baterias, mantendo os dados enquanto a bateria possuir carga (memória tipo SRAM ou *FLASH*)

Este tipo de cartão de dados foi padronizado pela Associação Internacional de Cartões de Memória para Computadores Pessoais (*Personal Computer Memory Card International Association, PCMCIA*) e está ilustrado na Figura 3.16.



**FIGURA 3.16.** Vista ilustrada de um cartão PCMCIA.

Uma vantagem particular do uso do computador é que em sistemas em regime permanente, diversas grandezas podem ser calculadas em tempo real e exibidas na tela, permitindo não só o acompanhamento mas também a tomada de decisão em relação ao funcionamento do sistema.

No caso de sistemas em regime transiente, onde geralmente a taxa de amostragem é alta, os valores das grandezas podem ser lidos e imediatamente após a coleta de dados se efetuar a análise e exibir, seja na forma gráfico ou na forma de tabelas, os resultados para tomada de decisão.

### **Conversão de dados**

Nos sistemas de controle, aquisição, manipulação e armazenamento de dados, geralmente tem-se dois tipos de tensão que são manuseadas: a tensão analógica e a tensão digital.

Os sensores em sua maioria liberam um sinal elétrico analógico proporcional à grandeza física monitorada, e nos sistema de aquisição de dados de hoje, todos os circuitos manuseiam tensão do tipo digital, daí a razão da necessidade da conversão dos sinais de analógico para digital.

Na lógica digital só existem 0 e 1, ou seja, os números ou palavras são

representados por tensões positivas de, por exemplo, 5V para o dígito 1(um) e 0V para o dígito zero (nos circuitos que usam transistores a lógica é denominada TTL e estes são os valores das tensões características).

Esse tipo de representação dos valores é denominado linguagem binária e qualquer número decimal pode ser representado. Um número decimal se diz na base 10 e um binário na base 2 (Quadro 3.1).

Enquanto na base 10, uma determinada posição em um número (unidade, dezena, centena, etc.) pode ser representada por 10 algarismos (0,1,2,3,4,5,6,7,8,9), na base 2 cada posição só pode ser representada por dois algarismos (0 e 1), e cada posição é denominado **bit**. Na linguagem binária, para se representar números com valores maiores que 1 tem-se portanto que agregar mais bits, e o conjunto de bits que formam um número se chama **byte**. Os dispositivos de aquisição de dados na forma digital trabalham com bytes de 8,16, 32 e 64 bits, ou múltiplos maiores. O maior número que pode ser representado no caso de um byte de 8 bits é:

$$1*2^0+1*2^1+1*2^2+1*2^3+1*2^4+1*2^5+1*2^6+1*2^7=255.$$

**QUADRO 3.1.** Representação de dois números nas duas bases, decimal e binária.

Número	Base 10	Base 2
37	$30 + 7 =$ $3*10^1 + 7*10^0$	$32 + 4 + 1 =$ $1*2^5 + 0*2^4 + 0*2^3 + 1*2^2 + 0*2^1 +$ $1*2^0 =$ 100101
1998	$1000 + 900 + 90 + 8 =$ $1*10^3 + 9*10^2 + 9*10^1 +$ $8*10^0$	$1024 + 512 + 256 + 128 + 64 + 8 + 4 + 2 =$ $1*2^{10} + 1*2^9 + 1*2^8 + 1*2^7 + 1*2^6 + 0*2^5 +$ $0*2^4 + 1*2^3 + 1*2^2 + 1*2^1 + 0*2^0 =$ 11111001110

**Conversão de dado analógico para digital:** ao se fazer a conversão de um sinal analógico para digital, o maior valor assumido pelo valor analógico dividido pelo maior valor digital dará o menor valor que pode ser convertido, ou seja, dará o valor da resolução do sistema. Por exemplo, ao se converter um sinal analógico que vai de 0 a 5V para digital, por um conversor analógico/digital de 8 bits, o menor valor capaz de ser medido pelo conversor será 19,6mV (5V ou 5.000mV dividido por 255, que é igual a 19,6mV). No caso de um conversor de 12 bits terá uma resolução de  $5.000/4.095=1.22mV$ , logo quanto maior o número de bits de um conversor analógico/digital, maior a precisão do conversor. Um

conversor de 16 bits será capaz de medir valores tão pequenos quanto 76mV. Observe que, apesar de ser um valor muito pequeno, no caso de terminares metálicos, tipo cobre/constantan por exemplo ( $39\text{mV}/^\circ\text{C}$ ), a resolução do conversor ainda é baixa para pequenas variações na temperatura, e a amplificação do sinal do termopar ainda se faz necessária.

Na aquisição de dados, o sistema de leitura leva sempre algum tempo desde o sinal é colocada na entrada do conversor até que o processo de conversão se complete. Se a grandeza física medida varia continuamente, caso dos fenômenos rápidos, ao se completar a medida fica difícil dizer em qual momento o valor foi realmente captado. Para tentar minimizar o problema um circuito capta de forma rápida o sinal a ser medido e conserva o valor até que o processo de leitura se complete (circuito *sample-and-hold*). Em sua forma mais simples, este circuito pode ser pensado como sendo um interruptor na entrada do sistema de conversão ligado a um capacitor. O interruptor se fecha, permite que o capacitor adquira uma carga elétrica proporcional à tensão do sinal e imediatamente se abre conservando o valor da tensão medida (Figura 3.17A). Esta idéia pode ser implementada por componentes eletrônicos, onde o sinal é captado pelo capacitor, e após a leitura, a carga é descarregada para o terra pelo fechamento de um microrelé eletromecânico ou pelo chaveamento de um transistor (Figura 3.17B).

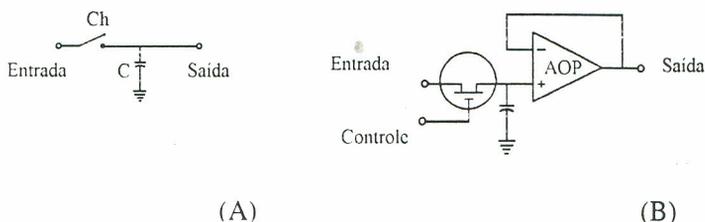


FIGURA 3.17. Circuito *sample-and-hold* idealizado e implementado por componentes eletrônicos discretos.

**Conversão de dado digital para analógico:** na aplicação de insumos a taxas variáveis, a unidade de controle recebe a informação sobre a quantidade a ser aplicada da unidade central e comanda os atuadores para obter a vazão desejada do insumo. Diversos atuadores têm um ação tipo analógica, ou seja, atuam de forma contínua como por exemplo na peça que regula a abertura para passagem de adubo orgânico na traseira de uma carreta distribuidora. No caso de motores elétricos que atuam em válvulas controladoras do fluxo de óleo para motores hidráulicos (os quais controlam por exemplo o mecanismo dosador da vazão de sementes em semeadoras), ou em válvulas solenóides que controlam a vazão

em bicos pulverizadores, geralmente há um circuito eletrônico de potência que comanda tais dispositivos. Para atuar nestes componentes eletrônicos, geralmente uma tensão é aplicada de forma contínua na base dos transistores do circuito. A conversão do sinal de controle na forma digital da unidade de controle, ou computador, se faz necessária nesta hora. O conversor digital/analgico realiza então esta operação. A conversão obedece os mesmos princípios da conversão analógico/digital no que diz respeito à resolução do sistema: ao se dividir a tensão analógica máxima de controle pelo número de bits máximo do conversor se tem o menor valor de tensão que pode ser obtido para se aplicar à base do transistor, ou seja, a atuação não é verdadeiramente contínua, mas por pequenas passos (*steps*) na variável de controle. Por exemplo, se a tensão de controle da base de um transistor que controla o atuador de abertura da porta de vazão de um distribuidor de calcário variar de 0 a 5V, e o conversor digital/analgico for de 8 bits, a tensão de controle na base do transistor variará de valores de 19,6mV. Caso a abertura total da porta de saída seja de 150mm, as aberturas variarão de  $150/255=0,588$ mm que corresponde à variação da tensão aplicado na base do transistor controlador.

**Taxa de amostragem:** o número de dados coletados por unidade de tempo, ou a taxa de amostragem, ou a frequência de amostragem, é importante principalmente por dois motivos: se baixa demais pode ser pouco precisa ou não permitir reproduzir com fidelidade a curva de resposta do fenômeno, conforme se observa na Figura 3.18, e, se rápida demais, resultará numa quantidade excessiva de dados para manuseio e armazenamento. No gráfico se ilustra um sinal contendo uma frequência menor, de 1 Hz, na qual está embutida uma frequência maior de 10 Hz (Figura 18.A). Na Figura 18.B se representa uma taxa de amostragem de 2 Hz, na 18.C de 10 Hz e na 18.D de 20 Hz, onde se observa que na medida que se aumenta a taxa de amostragem mais fidedigna fica a representação do sinal.

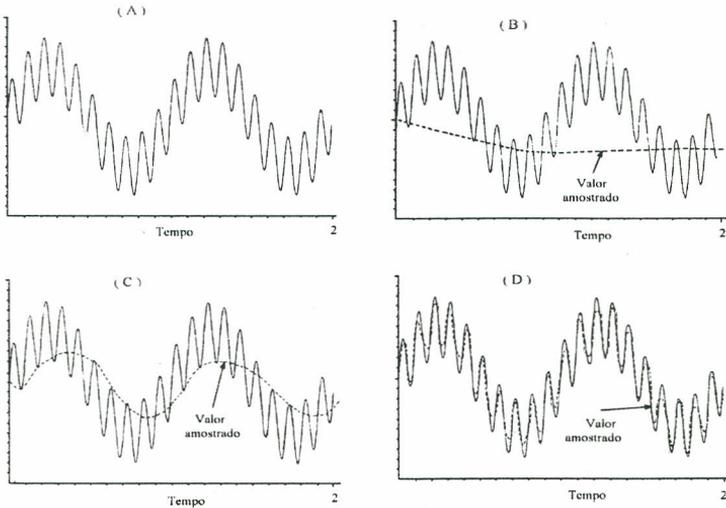


FIGURA 3.18. Representação da evolução de um sinal contínuo e o efeito da taxa de amostragem na representação do seu verdadeiro valor.

A representação de um sinal contínuo, na forma digital, depende portanto da taxa de amostragem.

O teorema de Nyquist (LEIGH, 1985) estabelece que são necessários pelo menos dois pontos ao longo do período de determinado sinal para que ele possa ser representado de forma correta, ou seja, a frequência de amostragem deve ser pelo menos duas vezes a frequência de ocorrência do fenômeno. Franklin e Powell, citados por KOECHER e SUMMERS (1987) recomendam como regra prática, que a taxa de amostragem seja de 6 a 10 vezes a maior frequência existente no sinal a ser monitorado. Segundo os autores citados, no caso de equipamentos agrícolas como subsoladores, arados de aiveca, escarificadores do solo e implementos equipados com discos, a frequência de variação dos sinais de saída se situam entre 2 e 10 Hz. Portanto, para estes equipamentos, a frequência de amostragem deve ser de pelo menos 12 a 60 Hz.

### 3.3.4. Transmissão de dados

#### Métodos de comunicação

As duas principais formas de comunicação são a serial e a paralela, ou seja, os bits que representam os dados são transmitidos um após o outro, no caso da comunicação serial, ou simultaneamente, como no caso da comunicação paralela. Obviamente a comunicação serial levará mais tempo que a paralela para transferir dados de um ponto A para um ponto B, por outro lado, necessita de menor número de cabos ou fios para a transmissão e, por ser mais imune à ação de ruídos elétricos, geralmente é preferida, principalmente quando a distância de transmissão é grande. A taxa de transmissão de dados, ou a velocidade com que eles podem ser transmitidos, é denominada Baud e representa o número de bits transmitidos por unidade de tempo no caso da transmissão serial ou o número de bytes no caso da transmissão paralela. Os valores da taxa de transmissão têm crescido com o aumento da velocidade de processamento dos microprocessadores, sendo as taxas conhecidas até pouco tempo de 110, 300, 1.200, 2.400, 4.800, 9.600 e 19.200 Bs.

**Transmissão paralela:** uma interface para comunicação paralela está ilustrada na Figura 3.19A, e consta geralmente de várias linhas de dados (usualmente oito para acomodar todos os dados alfanuméricos que se deseja transmitir), uma conexão de aterramento entre os corpos físicos dos aparelhos, e pelo menos uma linha de controle ou de comando. Por exemplo, o dispositivo A pode mandar o número 7 para o dispositivo B colocando o dado em linguagem binária nas oito linhas de dados (ou energizando as linhas que devam ter o bit 1 e mantendo aterrada ou não energizando as linhas que devam ter o bit 0). O número 7 em linguagem binária será representado por 00000111 ou linhas  $A_0$ ,  $A_1$  e  $A_2$  energizadas e as demais linhas não energizadas ou aterradas ou tensão zero. Para indicar ao dispositivo B que o dado está pronto ou disponível para ser lido, a palavra READY será enviado pela linha de comando ao dispositivo B. Por outro lado, o dispositivo B pode ler o dado e em seguida sinalizar ao dispositivo A que a operação já foi executada e que ele está pronto para receber um novo dado.

Na transmissão paralela a distância entre os dois dispositivos em comunicação é limitada. Para se evitar interferências, mesmo com o uso de cabos apropriados, a comunicação fica restrita a mais ou menos um metro de distância.

**Transmissão serial:** o segundo método de comunicação é o serial (Figura 3.19B), o qual requer menor número de fios que a comunicação paralela. Para evitar interferência e erros nos dados transmitidos, os bits de valor 1 são

transformados em pulsos de tensão na faixa de  $-5$  a  $-15V_{DC}$  e os bits de valor 0 são transformados em pulsos na faixa de  $5$  a  $15V_{DC}$ . A transformação acontece tanto na saída do dispositivo A quanto na chegada do dispositivo B, já que as tensões dos sinais em sistemas de aquisição de dados são  $5V$  para o bit 1 e  $0V$  para o bit 0. Estes valores mais os sinais que controlam o fluxo de dados são padronizados e recebem o nome de interface padrão RS-232, com a qual se consegue realizar comunicações de dados, em baixa e média taxa de transmissão, a distâncias de até  $15m$ .

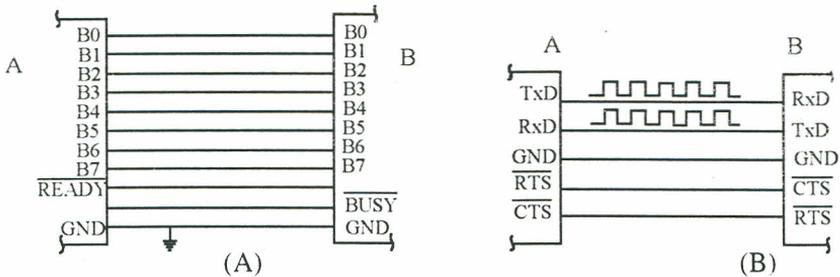


FIGURA 3.19. Interface paralela (A) e serial (B), com aterramento e controles.

No caso de maiores distâncias de transmissão, os dados podem ser usados para modular um sinal de maior frequência, podendo ser transmitido via rádio ou pelas linhas de telefone, a qualquer distância. No ponto de recepção dos sinais há a demodulação e os dados são recuperados em sua forma original. Dois tipos de lógica podem ser utilizados nos componentes eletrônicos do sistema de processamento de dados, a negativa ou a positiva, ou seja, um comando enviado a um sistema pode ser atuante sendo o sinal enviado positivo ( $5V$  na família TTL) ou negativo ( $0V$ ). A lógica negativa é preferencialmente usada nos comandos atuantes sobre os circuitos (comandos que sinalizam que os dados estão prontos para serem enviados, ou para liberar os dados ou para iniciar a conversão analógico/digital, etc) porque qualquer pino de entrada de qualquer circuito integrado, se não estiver conectado a nada, assume o valor positivo ( $5V$ ). Assim, se num circuito integrado, uma trilha na placa de circuito impresso, ou um cabo de comunicação acidentalmente falha ou se rompe, o sistema pára de enviar sinais pois faltará o comando em lógica negativa, já que a entrada do circuito integrado (CI) assumirá o valor positivo, e o sistema só reinicializará quando for re-estabelecida a comunicação ou corrigido o problema.

### Códigos de transmissão

Existem diversos códigos de comunicação, o morse, o Baudot, o código de comunicação decimal codificado em binário estendido (*Extended Binary Coded Decimal Interchange Code* ou EBCDIC) e o código padrão americano para comunicação de informações (*American Standard Code for Information Interchange* ou ASCII). O código ASCII é o mais utilizado em computadores (MILES, 1986) e em sistemas de controle e manuseio de dados em agricultura de precisão. Neste código, cada símbolo alfanumérico ou gráfico é representado por um número decimal, cuja codificação em binário exige no máximo 8 bits, como apresentado parcialmente na Tabela 3.1.

TABELA 3.1. Exemplos de representação alfanumérica em código ASCII.

Símbolo	Decimal	Binário	Símbolo	Decimal	Binário
0	48	00110000	a	97	01100001
1	49	00110001	b	98	01100010
2	50	00110010	c	99	01100011
3	51	00110011	d	100	01100100
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
9	54	00110110	z	122	01111010
+	43	00101011	A	65	01000001
-	45	00101101	B	66	01000010
>	62	00111110	.	.	.
,	44	00101100	.	.	.
/	47	00101111	Z	90	01011010
etc			etc		

O cartão formato PCMCIA adotado em agricultura de precisão usa o formato ASCII para armazenamento dos dados, sendo esses armazenados em matrizes, onde as linhas são separados por vírgulas.

**Radio Telemetria:** em muitas situações há a necessidade de se efetuar a medida de determinadas grandezas físicas que, devido às condições do local, ou de funcionamento de uma máquina, ou do tipo de objeto ou animal monitorado, apresentam uma série de dificuldades para seu registro. Por exemplo, em locais de difícil acesso na estrutura de uma máquina em movimento, ou a medida de uma variável de interesse biológico em um animal no pasto (por exemplo a medida do aumento de temperatura corporal para se identificar o cio em vacas). O termo telemetria pode ser definido como sendo o processo de leitura de determinada grandeza em um ponto e a transmissão para outro ponto onde os

valores serão exibidos ou registrados. Apesar da transmissão poder ser feita por meio de condutores metálicos, meios óticos, entre outros, na maioria dos casos na mecanização, o interesse é pela transmissão sem conexão física entre os dois pontos, mais especificamente a transmissão por ondas eletromagnéticas, ou ondas de rádio, ou rádio telemetria. A rádio telemetria não resolve naturalmente todos os problemas de aquisição e transmissão de dados, e, de fato, até cria alguns novos problemas. Apesar do uso de fios permitir uma aquisição de dados de forma mais fácil, de menor custo e mais confiável, a maior vantagem da rádio telemetria é exatamente a inexistência dos fios, que em muitos casos podem restringir a movimentação da máquina.

No caso específico do uso da rádio telemetria na agricultura, o esquema básico dos componentes do sistema pode ser observado na Figura 3.20. Um transdutor/sensor produz um sinal elétrico proporcional à grandeza física de interesse, se necessário, o sinal é amplificado, filtrado e usado para modificar a forma de uma onda eletromagnética que é transmitida pela antena do rádio. A onda eletromagnética modificada pelo sinal é denominada onda portadora, pois é responsável pelo “transporte” do sinal. A antena do receptor capta a onda portadora modificada, um circuito apropriado a amplifica e em seguida seleciona ou separa ou “detecta” o sinal. O sinal é então amplificado e reproduzido para visualização e/ou gravação.

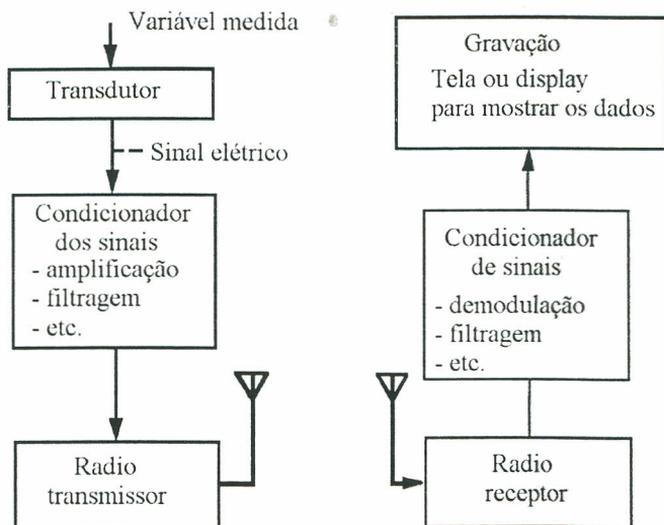


FIGURA 3.20. Blocos básicos de um sistema de rádio telemetria.

A modificação do formato da onda eletromagnética que transporta o sinal desejado é denominada modulação, e os tipos mais comuns de modulação são a modulação em amplitude (Figura 3.21A) e modulação em frequência (Figura 3.21B). Na transmissão de sinais digitais são três as formas mais comuns de modulação. A modulação por modificação da amplitude (*amplitude-shift keying* ou ASK, Figura 3.21C), onde a portadora representa o dígito 1 quando é emitida e o dígito 0 quando não é emitida, a modulação por modificação da frequência (*frequency-shift keying* ou FSK, Figura 3.21D), onde o dígito 1 é transmitido a uma frequência maior que o dígito 0 e a modulação por mudança de fase (*phase-shift keying* ou PSK, Figura 3.21E), onde a frequência da portadora é sempre a mesma, mas muda de fase bruscamente quando passa do dígito 1 para o dígito 0. No caso de sinais digitais a mudança de fase é de  $180^\circ$ , denominada *binary phase-shift keying* ou BPSK. A modulação tipo BPSK é a utilizada na transmissão de sinais do sistema de posicionamento global (GPS).

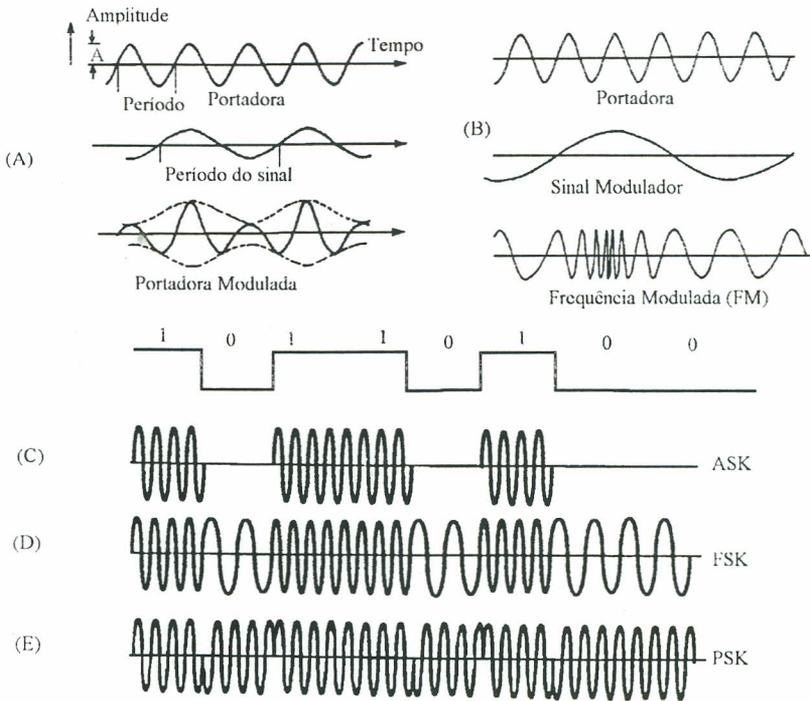


FIGURA 3.21. Modulação em amplitude (A) e em frequência (B), geralmente para sinais analógicos, e modulação em amplitude (C), em frequência (D) e por fase (E) para transmissão de sinais digitais.

A modulação em frequência é mais fácil de ser implementada, de menor custo e tem a mesma probabilidade de erro que as outras formas de modulação, daí sua maior utilização na rádio telemetria.

A onda de rádio portadora do sinal deve ser, preferencialmente, de frequência elevada, pois as ondas eletromagnéticas de baixa frequência perdem muita potência ao se propagar, apesar de acompanharem bem o relevo terrestre e não dependerem do alinhamento visual entre as antenas transmissoras e receptoras. A onda portadora de alta frequência exige pouca energia, mas tem um comportamento muito semelhante ao da luz visível, exigindo que não haja obstáculos entre as antenas (Figura 3.22).



FIGURA 3.22. Comportamento da onda de baixa frequência (A) e da alta frequência (B).

No caso da agricultura de precisão, principalmente no caso do uso do GPS diferencial, a distância que o sinal transmitido alcança depende frequência da onda portadora, da potência do transmissor, do tipo de antena e seu posicionamento espacial. A antena deve ser posicionada o mais alto possível e, preferencialmente, sem a existência de obstáculos físicos (árvores, construções, etc.) entre a antena transmissora e a antena receptora..

### Sistema de Posicionamento Global

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é um sistema de rádio-navegação formado por um conjunto de 24 satélites e estações de monitoramento em terra que possibilita a obtenção de posicionamento durante 24 horas por dia, em qualquer condição climática, em todo o globo terrestre (LEICK, 1995). Este sistema vem sendo aplicado na localização de máquinas agrícolas, aviões, carros, barcos e outros veículos.

Para permitir a obtenção da posição em todo o globo, um esquema de órbitas foi projetado de tal forma que pelo menos quatro satélites estejam sempre visíveis pelas antenas dos receptores. Os satélites desenvolvem uma órbita de 12 horas inclinada de  $55^\circ$  em relação ao plano equatorial (HOFMANN-WELLENHOF et al., 1994).

O posicionamento por meio de GPS é obtido determinando-se as distâncias do ponto em que se deseja conhecer a posição até três satélites, por meio do princípio de triangulação. A distância entre cada satélite visível e o ponto em que se deseja obter a posição é determinado medindo-se o tempo que o sinal leva para sair do satélite e atingir o aparelho receptor, e multiplicando-se pela velocidade com que o sinal se desloca, que é igual à velocidade da luz (que no vácuo é de 300.000 km/s). Considerando que a órbita dos satélites é de aproximadamente 20.000 km acima da superfície da terra, se um satélite estiver localizado diretamente acima do aparelho receptor, o tempo que o sinal leva para sair do satélite e atingir o receptor é de aproximadamente 65 centésimos de segundo. Isso significa que o sistema precisa de relógios muito precisos.

A determinação do tempo que o sinal leva desde que sai do satélite até que seja captado pelo aparelho receptor é feita gerando-se no aparelho receptor o mesmo tipo de sinal emitido pelo satélite. A diferença de sincronismo entre os dois sinais oferece a medida do tempo que o sinal levou para se deslocar do satélite até o receptor. O sinal que é emitido em cada satélite é codificado de tal forma que o aparelho receptor consegue identificar os sinais dos diferentes satélites.

Os osciladores a bordo dos satélites geram uma frequência fundamental  $f_0 = 10,23$  MHz e os sinais são transmitidos em duas frequências portadoras. A frequência portadora da banda denominada L1 é de 1575,42 MHz (ou seja, 154 vezes a frequência fundamental). Esse sinal contém informações relativas ao estado da mensagem (órbita do satélite, correção de seu relógio, etc) e o código para determinação do intervalo de tempo entre o satélite e o aparelho receptor. A frequência portadora da banda denominada L2 é de 1227,60 MHz (ou seja, 120 vezes a frequência fundamental) e é utilizada para aplicação militares de maior precisão.

Existem dois tipos de codificação de sinal, sendo o primeiro denominado C/A (Aquisição Grosseira), o qual modula a banda L1. O código é repetido a cada 1023 bits e é modulado a 1,023 MHz (ou seja, um décimo da frequência fundamental). O código C/A é a base para aplicações civis de GPS. O segundo tipo de código é chamado código P (preciso). Este é repetido a cada sete dias e modula as bandas L1 e L2 a 10,23 MHz (que é idêntico ao valor da frequência fundamental). Esse código é destinado a aplicações militares. A mensagem de navegação que contém as informações a respeito da órbita do satélite é emitida a uma frequência de 50 Hz (ou seja, a frequência fundamental dividida por 204.600). O sistema de modulação de sinal utilizado pelo GPS é o denominado sistema de mudança de fase binário com mudanças de fase de 0 e 180°, ou BPSK.

A determinação do tempo que o sinal de rádio leva do satélite até o receptor é crítico na determinação da posição, um erro de um milésimo de segundo representa um erro de 300 km na determinação da posição, por isso os relógios instalados nos satélites são relógios atômicos. Colocar relógios atômicos nos aparelhos receptores significaria aumentar o custo destes para valores que tornaria inviável a aplicação do GPS. Para contornar esse problema, os aparelhos receptores trabalham com relógio menos preciso mas que captam o sinal de um quarto satélite para corrigir o erro do relógio do aparelho receptor, pois considerando-se que os relógios dos satélites são altamente precisos, o erro na determinação do tempo que o sinal leva para sair do satélite para chegar ao aparelho receptor seria o mesmo para todos os satélites.

Para que o GPS funcione é necessário saber a posição exata dos satélites. Para isso, os satélites foram colocados em uma órbita em uma altitude (em torno de 20.000 km) de tal forma que os efeitos de arraste devido à atmosfera terrestre pudessem ser minimizados. Com isso, a órbita desses satélites podem ser calculadas com precisão. Os aparelhos receptores têm gravado em suas memórias as informações referentes às órbitas de todos os satélites. Estações terrestres fazem o monitoramento dessas órbitas e as correções dessas órbitas são transmitidas para os satélites que as retransmitem para os aparelhos receptores através do que foi denominado acima mensagem de navegação.

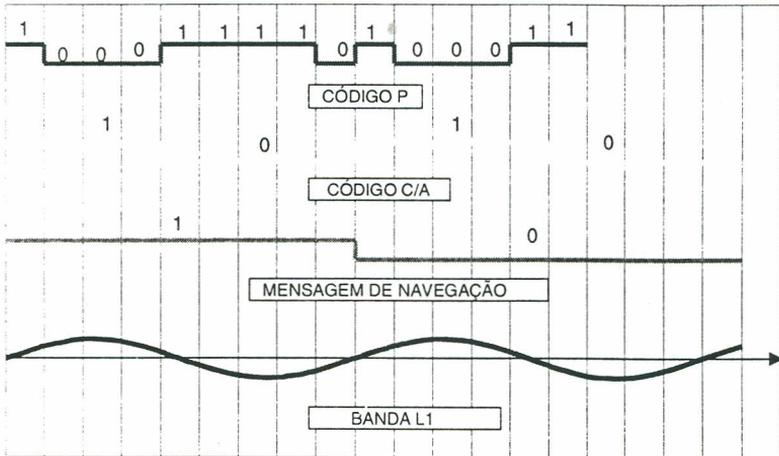


FIGURA 3.23. Esquema dos sinais transmitidos pelos satélites de GPS.

Existem várias fontes de erros na determinação da posição quando se utiliza o GPS. A primeira fonte de erro é que a velocidade da luz não é exatamente constante quando ela atravessa a atmosfera (figura 3.24), as partículas com carga elétrica da ionosfera e o vapor d'água contido na troposfera faz com que a velocidade da luz seja levemente reduzida. A ionosfera cobre a região entre aproximadamente 50 e 1500 km acima da superfície da terra. Ondas portadoras com frequência inferior a 30 MHz são refletidas pela ionosfera e somente frequências mais elevadas conseguem penetrar. A troposfera, camada situada da superfície da terra até a altitude de 50 km, tem a propriedade de causar a refração das ondas. Para frequências inferiores a 30 GHz a troposfera essencialmente se comporta como um meio não dispersivo, isto é, a refração é independente da frequência do sinal transmitido através dela. Esses efeitos da ionosfera e troposfera podem ser compensados pelo próprio aparelho receptor.

Um segundo tipo de erro que pode ocorrer quando se utiliza um GPS é o denominado erro de multicaminhos (*"multipath error"*). Esse erro é devido a reflexão do sinal quando ele encontra diferentes obstáculos próximos a superfície da terra, tais como montanhas, prédios, e outros. Os aparelhos receptores mais sofisticados são capazes de filtrar esses sinais que foram refletidos.

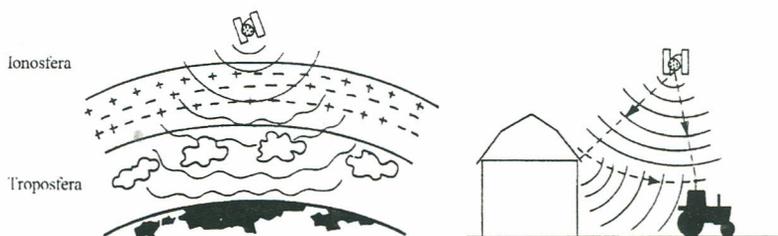


FIGURA 3.24. Erros advindos da ação da atmosfera e da reflexão sobre o sinal.

Um terceiro tipo de erro pode estar associado ao próprio funcionamento dos satélites, com por exemplo erro na determinação do tempo pelos relógios e erros de posição dos satélites. Esses tipos de erros devem ser corrigidos pelas estações em terra a intervalos de tempo pré-determinados.

Uma quarta fonte de erro pode ser a posição que cada satélite ocupa no horizonte durante a determinação do ponto no qual se encontra o GPS receptor. Quando dois satélites que estão muito próximos são utilizados na determinação da posição uma margem de erro maior pode ocorrer. Um bom aparelho receptor é capaz de escolher os satélites capazes de fornecer uma determinação mais exata da posição.

Outra fonte de erro são os ruídos que o sistema de defesa americano incluem no sinal por motivos de segurança. Os aparelhos receptores para fins militares têm a capacidade de remover esses ruídos e assim fornecerem o posicionamento mais exato.

Os sistemas GPS podem ser classificados em dois grupos: o Serviço de Posicionamento Preciso (PPS) que tem uma precisão de 22 metros de exatidão na horizontal, 27,7 metros de exatidão na vertical e 100 nanossegundos de exatidão do tempo e o Serviço de Posicionamento Padrão (SPS) que tem uma exatidão de 100 metros na horizontal, 156 metros na vertical e 340 nanossegundos na exatidão do tempo. Para aplicações civis é utilizado o SPS.

Para reduzir os erros do sistema GPS foi criado o Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS). O DGPS trabalha com um aparelho receptor extra, fixo, localizado em um ponto de coordenadas conhecidas, e com isso pode-se determinar o erro de posicionamento obtido pelo GPS. Esse erro pode ser utilizado para corrigir o posicionamento de outros aparelhos receptores que estejam em um raio de 200 km ao redor da base fixa. Existem diversas forma de se realizar essa correção, e uma delas é através de um pós-processamento: os dados de posicionamento e as correções são obtidos e depois corrigidos por meio do uso de um software específico. Existe, também, a correção em tempo real em que os dados de posição são obtidos e instantaneamente corrigidos. Para isso o sinal de correção da estação fixa precisa ser transmitido diretamente para os aparelhos receptores. Existe ainda a possibilidade desses dados serem transmitidos para um satélite geo-estacionário e então retransmitido para os aparelhos receptores. Em regiões perto do litoral existe ainda a possibilidade de se adquirir os dados de correção transmitido por rádio pela Marinha.

### 3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme pode-se observar, a automação e a instrumentação andam par e passo com o que há de mais atual em mecanização agrícola. Um ponto importante a questionar é que esses temas geralmente não fazem parte do curriculum dos cursos de graduação que têm disciplinas relacionadas com máquinas agrícolas, sendo geralmente só abordados nos cursos de pós-graduação. Diante da importância que o tema apresenta, seria recomendável que as instituições de ensino superior que têm cursos de Engenharia Agrícola e Agronomia comesçassem a incluir disciplinas relacionadas com a instrumentação e controle das máquinas agrícolas. Além da formação de pessoal de nível

superior, os operadores de máquinas, os gerentes de patrulha mecanizada e os responsáveis pelo setor de manutenção precisam receber treinamento nesta área para que possam tirar o máximo proveito dessas tecnologias no setor agrícola.

Na área da pesquisa, há a necessidade de se continuar o desenvolvimento de sensores, principalmente, aqueles para trabalharem em tempo real, visando o fornecimento de informações para os sistemas de controle utilizados na agricultura de precisão. Outro ponto importante seria a padronização dos processos ou “protocolos” de comunicação entre os sistema de controle, o que independentemente de seus fabricantes permitiria o desenvolvimento de *kits* para a checagem e calibração nas máquinas. Considerando o baixo nível da mão-de-obra utilizada no meio rural, sistemas que possam detectar e corrigir possíveis falhas nos sensores e controladores tornam-se importantes para evitar erros na dosagem de aplicação dos insumos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAE. *Agricultural Electronics - 1983 and Beyond*. Publication 9-84. 1983.798p.
- FRANKLIN, G.F.; POWELL, J.D.; EMAMI-NAEINI, A. *Feedback control of dynamic systems*. 3ª ed. Editora Addison-Wesley Publishing Company. New York, 1994. 778p.
- HELFRICK,A.D. & COOPER,W.D. *Modern electronic instrumentation and measurement techniques*. Prentice-Hall. Editions. New Jersey. 1990. 446p.
- HOFMANN-WELLENHOF,B.; LICHTENEGGER,H. & COLLINS, J. *GPS theory and practice*. 3ª ed. Editora Springer-Verlag, New York. 1994. 355p.
- LEICK, A. *GPS satellite surveing*. 2ª ed. Editora John Wiley & Sons. New York. 1995. 560p.
- LEIGH,J.R. *Applied Digital Control*. Prentice-Hall. London. 1985. 408p.
- MERRITT, H. E. *Hydraulic control systems*. 1ª ed. Editora John Wiley & Sons. New York. 1966. 358p.
- MILES,G.E. *Data Transfer: Basic Concepts*. Computers and Electronics in Agriculture. 1:219-231. 1986.
- OGATA,K. *System dynamics*. 2ª ed. Editora Prentice Hall. New Jersey.1992. 712p.
- SCOTT,T,N.R & ANESHANSLEY,D.J. Radio Telemetry. In:\_\_\_ *Instrumentation and Measurement for Environmental Sciences*. Capítulo 12. 19p. 1991.

ZAMBALDE,A.L. *Sistema computadorizado para aquisição e análise de dados agrometeorológicos*. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Itajubá MG. (Tese de mestrado). 1991.144p.

ZAMBALDE,A.L. & DEL PINO,M.A. **Coletor de dados como ferramenta de apoio à pesquisa em engenharia agrícola: um estudo de caso**. In\_\_ : XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campinas. *Anais*. 1994. 8p.