

## KIT DIDÁTICO CONTROLE MOTOR CC USANDO TÉCNICAS DE CONTROLE DINÂMICO

**Alex de Oliveira Freitas<sup>1</sup>**

**Tiago Romeiro de Jesus<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>IFG/Campus Jataí/Engenharia Elétrica - PIBITI, alexfisicaufg@gmail.com

<sup>2</sup>IFG/Campus Jataí/Coordenação de Indústria, tiagoromeirodejesus@hotmail.com

### **Resumo**

As abstrações das ciências exatas são frequentemente concretizadas com a realização de experimentos práticos e construção de modelos teóricos que levam a simulações computacionais. Os sistemas de controle moderno são densamente constituídos de formalismos poucos praticáveis. Nessa ótica, com este trabalho procurou-se reduzir ou amenizar formalismos ferrenhamente teóricos do controle automático, abordando mais os aspectos práticos que auxiliam na absorção das informações relacionadas. Para tanto, foram feitas algumas simulações com um sistema que tem como atuador um motor de corrente contínua, onde o modelo também englobou um sensor de velocidade/posição (encoder), e ao fim foi projetado um controlador PID para compensação do sistema.

**Palavras-chave:** Motor CC, controle, PID, sensores.

### **INTRODUÇÃO**

O mundo atual não seria o mesmo sem o avanço nas técnicas de controle dos mais diversos processos, tais como o lançamento de foguetes e de ônibus espacial no espaço, peças sendo usinadas automaticamente, veículos sendo pilotados automaticamente, manutenção de temperatura e pressão em processos químicos, e estes sistemas são parte integrante da sociedade moderna (NISE, 2002). As tentativas de controle das atividades humanas remontam de 300 a.C, como a medição do tempo usando um relógio de água, inventada por Ktesibios, que devia manter constante o nível do líquido. Esse controle era feito através de uma bôia, como é usado até hoje em caixas de descarga de vasos sanitários. Atualmente estes controles automáticos são feitos usando computadores, microcontroladores e controladores lógicos programáveis (CLP's), que ficam todo monitorando variáveis e corrigindo seus valores de forma a atingir o ponto desejado (set point).

A teoria de Sistemas de Controle pode ser totalmente teórica, devido ao forte fundamento matemático, ou ter uma abordagem prática, com propósitos específicos, baseada na intuição e prática (DORF & BISHOP, 2009). Devido à vasta gama de disciplinas envolvidas no projeto, como circuitos elétricos, eletrônica, instrumentação e sistemas de controle o mesmo

necessita de um esforço acentuado do estudante na parte bibliográfica. Neste projeto o hardware tem papel fundamental, e requer conhecimentos e habilidades específicas para atingir resultados satisfatórios na confecção de placas de circuitos impressos.

A principal função do kit nesse trabalho é controlar a velocidade de um atuador, usando técnicas clássicas de controle, como proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) ou proporcional-integral-derivativo (PID).

É importante também tratar do que efetivamente será controlado, o atuador em si, os parâmetros inerentes a ele, a dinâmica proposta. Essas características integram um conjunto de informações que configura a planta do sistema no nível de máquinas, ou dos dispositivos atuadores, diretamente no que se pretende com o projeto elaborado.

Para um melhor contato prático com as disciplinas de controle em cursos técnicos e universitários é interessante do ponto de vista didático modelar sistemas de plantas de menor complexidade, onde pode ser facilmente aplicadas as teorias de controle. Um modelo muito utilizado com fim didático é o motor de corrente contínua, graças sua simplicidade de modelagem e o acesso experimental em laboratórios.

Nesta lógica, o projeto em questão visa implementar um controlador analógico na arquitetura PID na configuração de controle para um motor de corrente contínua, onde todo o processo teórico-prático seja evidenciado de forma clara com descrição suficientemente didática, apresentando os resultados de controle de interesse na formação em curso de sistemas de controle.

## MATERIAL E MÉTODOS

### I. Modelagem do Motor CC

São inúmeras as aplicações dos motores cc nas operações de servomecanismos, que exigem alta precisão, e são em muitas das vezes de dimensões reduzidas (LIMA, 2008). De modo geral, seu uso é indispensável nos sistemas de controle e automação nas diversas áreas da indústria, pois sua liberdade e viabilidade de controle com relação a dinâmica do processo é uma vantagem que o torna confiável para tal fim.

Lima (2008) cita aplicações atuais dos servomotores (motores cc controlados) em vários âmbitos:

- Sistemas de posicionamento de antena e radares;
- Robôs industriais;
- Impressoras;
- Scanners;
- Câmeras móveis de segurança;
- Válvulas motorizadas de controle.

Nesse contexto, as principais ações dinâmicas do motor cc que interessam a automação, são sua velocidade e posição, e, portanto, o controle do posicionamento e da velocidade dessas máquinas é um fator que exige eficácia e precisão. Os instrumentos de transformação são exemplo de agregação desse tipo de tecnologia de controle com atuadores do tipo motor cc, eles

são empregados na eletrônica para produção de componentes miniaturizados, ou mesmo no ato de composição de placas e circuitos microeletrônicos.

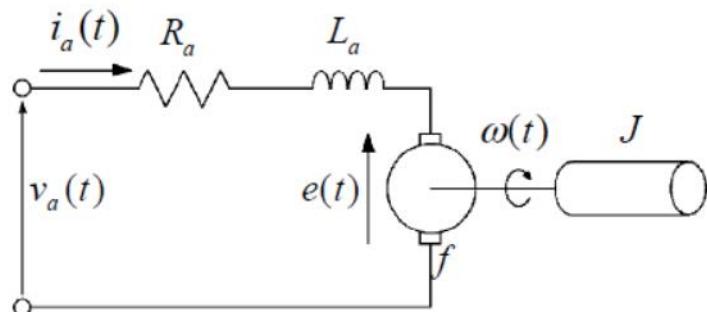
A modelagem do motor cc é baseada em grandezas elétricas, mecânicas e eletromecânicas, é modelado como um sistema de segunda ordem, e neste trabalho será tratada apenas sua zona linear.

Na modelagem do motor de corrente contínua (MCC) define-se como variável de entrada a tensão aplicada no circuito de armadura, que é a parte rotativa, rotor, e as variáveis de saída são as que se deseja controlar, geralmente a velocidade angular e/ou a posição. Serão abordadas no modelo as duas variáveis de saída com vista ao controle dinâmico.

As grandezas elétricas, mecânicas e eletromecânicas que consistem na modelagem da máquina são:

- Resistência de armadura ( $R_a$ );
- Indutância de armadura ( $L_a$ );
- Tensão de armadura ( $v_a(t)$ );
- Corrente de armadura ( $i_a(t)$ );
- Força contra-eletromotriz ( $e(t)$ );
- Momento de inércia da carga ( $J$ );
- Coeficiente de atrito viscoso ( $f$ );
- Velocidade angular do motor ( $\omega(t)$ ).

Essas grandezas são relacionadas esquematicamente de acordo com a Figura 1.



**Figura 1 : Modelo esquemático do MCC (BASÍLIO & MOREIRA, 2001).**

Duas equações principais regem a dinâmica da máquina de corrente contínua, uma de caráter elétrico, Lei de Kirchoff das tensões, e outra de caráter mecânico, Lei de Newton do movimento, são elas respectivamente:

$$v_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e(t), \quad (1)$$

$$t_m(t) - t_c(t) - t_d(t) - f\omega(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (2)$$

o torque desenvolvido pela máquina é representado por  $t_m(t)$ ,  $t_c(t)$  é torque da carga no eixo do motor, e  $t_d(t)$  é dado como um torque de perturbação externo (ou pode ser considerado a soma de todo atrito do motor e da carga, arrasto de rolamento, etc.).

As equações:

$$e(t) = K_g \omega(t) \quad (3)$$

$$t_m(t) = K_m i_a(t) \quad (4)$$

relaciona as grandezas elétricas e mecânicas. Onde  $K_g$  é a constante de força contra-eletromotriz, e  $K_m$  é a constante de torque.

Substituindo a equação (3) em (1) e (4) em (2), têm-se então as equações do sistema no domínio do tempo:

$$v_a(t) - K_g \omega(t) = Ra i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt}, \quad (5)$$

$$K_m i_a(t) = f \omega(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + t_d(t) + t_c(t). \quad (6)$$

Manipulando as equações (5) e (6), e aplicando a transformada de Laplace considerando que os torques sejam nulos, a função de transferência do motor cc tendo como entrada a tensão aplicada nos terminais da armadura e como saída a velocidade angular no eixo é dada por

$$\frac{\omega(s)}{v_a(s)} = \frac{K_m}{(Ra + L_a s)(Js + f) + K_m K_g} \quad (7)$$

## II. Encoder

O encoder é um transdutor que converte um movimento angular ou linear em uma série de pulsos digitais elétricos. Esses pulsos gerados podem ser usados para determinar velocidade, taxa de aceleração, distância, rotação, posição ou direção.

As principais aplicações dos encoders são:

- em eixos de Máquinas Ferramentas NC e CNC;
- em eixos de Robôs;
- controle de velocidade e posicionamento de motores elétricos;
- posicionamento de antenas parabólicas, telescópios e radares;
- mesas rotativas; e
- medição das grandezas acima mencionadas de forma direta ou indireta.

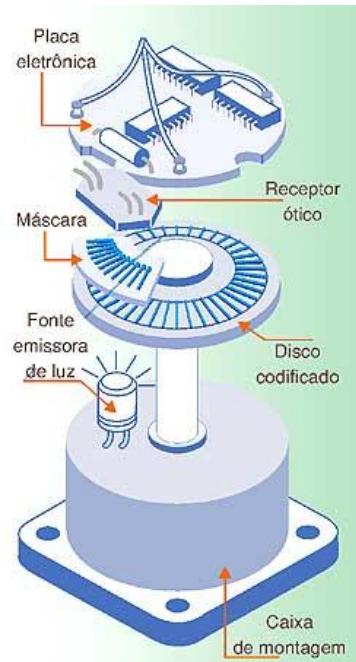
Os encoders podem ser divididos em incrementais e absolutos.

O encoder incremental fornece normalmente dois pulsos quadrados defasados em 90°, que são chamados usualmente de canal A e canal B. A leitura de somente um canal fornece apenas a velocidade, enquanto que a leitura dos dois canais fornece também o sentido do movimento. Um outro sinal chamado de Z ou zero também está disponível e ele dá a posição absoluta "zero" do encoder. Este sinal é um pulso quadrado em que a fase e a largura são as mesmas do canal A.

A resolução do encoder incremental é dada por pulsos/revolução (normalmente chamado de PPR) ou contagens/revolução (CPR), isto é, o encoder gera uma certa quantidade de pulsos elétricos por uma revolução dele próprio (no caso de um encoder rotativo).

O princípio de funcionamento de um encoder absoluto e de um encoder incremental é bastante similar, isto é, ambos utilizam o princípio das janelas transparentes e opacas, com estas interrompendo um feixe de luz e transformando pulsos luminosos em pulsos elétricos.

O encoder absoluto possui um importante diferencial em relação ao encoder incremental: a posição do encoder incremental é dada por pulsos a partir do pulso zero, enquanto a posição do encoder absoluto é determinada pela leitura de um código e este é único para cada posição do seu cursor; consequentemente os encoders absolutos não perdem a real posição no caso de uma eventual queda da tensão de alimentação (até mesmo se deslocados). Quando voltar a energia ao sistema, a posição é atualizada e disponibilizada para o mesmo (graças ao código gravado no disco do encoder) e, com isso, não se precisa ir até a posição zero do encoder para saber a sua localização como é caso do incremental. A Figura (2) ilustra o funcionamento de um encoder rotativo.



**Figura 2 : Funcionamento de um encoder rotativo.**

### III. Controlador PID

Até então os controladores PID tem sido os mais difundidos em controles de processos industriais, sua popularidade pode ser atribuída parcialmente ao seu desempenho robusto sobre uma grande faixa de condições operacionais (DORF & BISHOP, 2001). Eles detêm sobre sua base elementos que integram vários fatores essenciais em um controle automático, sua simplicidade funcional e o atendimento aos requisitos de projeto o tornam uma opção vantajosa.

Um controlador PID soma as características elementares de cada um individualmente, ou seja, proporcional, corrige proporcionalmente o sinal de saída em comparação com o erro e o sinal desejado através do ajuste de uma constante de ganho, integral, integra o erro em função do tempo fazendo com que a velocidade de correção do sinal impeça o desvio da amplitude do sinal corrigido, e o derivativo, que usa a intensidade do sinal de saída do controlador como referência para a taxa de variação de sinal do erro atuante, impedindo oscilações instáveis do próprio erro.

Enfim, o controlador PID tem por objetivo melhorar a resposta transitória e o erro estacionário de sistemas aproximando o máximo possível a resposta ao sinal de referência.

A função de transferência dada por

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (8)$$

onde,  $K_p$ ,  $T_d$ ,  $T_i$  representam o ganho proporcional, tempo derivativo e tempo integral, respectivamente. Esses parâmetros são ajustados de acordo com as exigências do processo a ser controlado.

### IV. Dispositivos Utilizados

As Figuras (2) e (3) mostram respectivamente o motor e o encoder utilizados para o desenvolvimento do trabalho.



**Figura 3 : Motor de corrente contínua**



**Figura 4 : Encoder rotativo**

As características eletromecânicas do motor são dadas na Tabela 1.

**Tabela 1 : Características eletromecânicas do motor cc .**

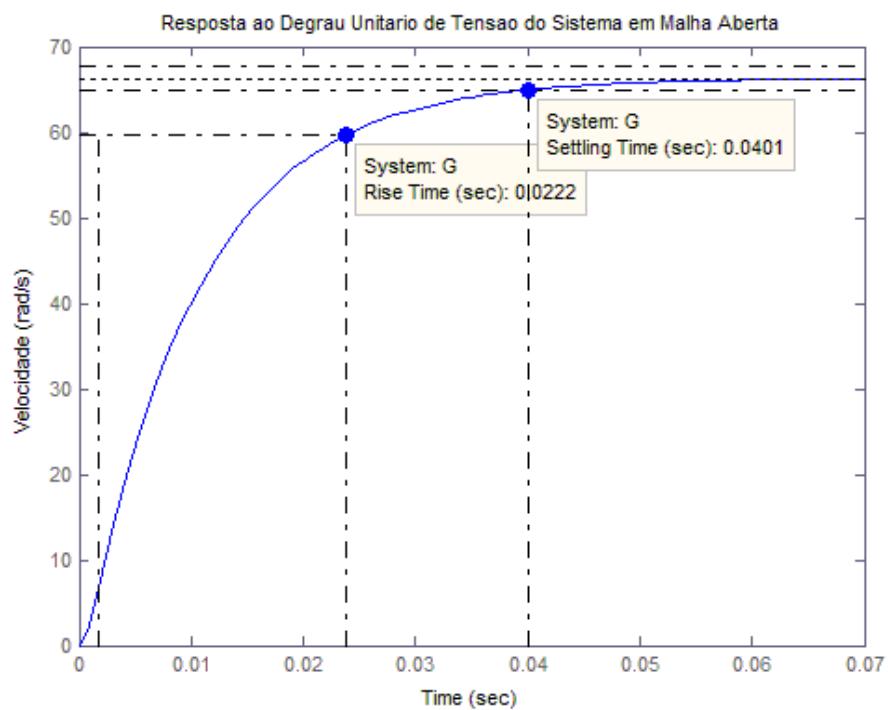
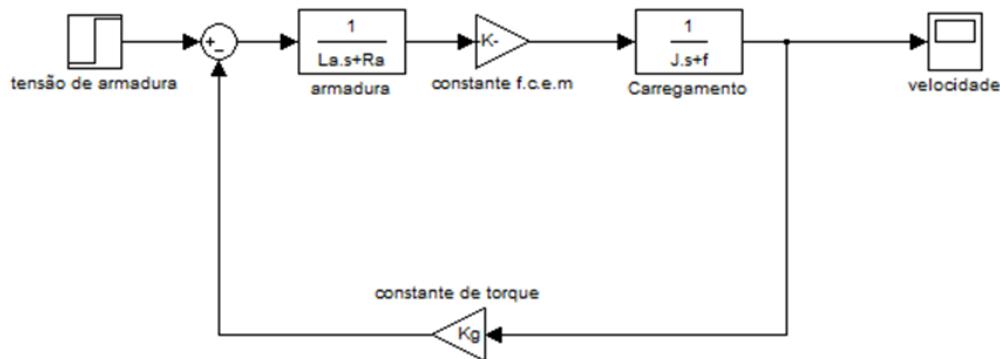
Parâmetro	Valor
Tensão nominal ( $V_a$ )	12 V
Velocidade nominal ( $\omega$ )	555 rad/s
Momento de inércia do rotor ( $J$ )	$1,2 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$
Resistência elétrica de armadura ( $R_a$ )	2,02 Ohms
Indutância elétrica de armadura ( $L_a$ )	1,21 mH
Coeficiente de atrito viscoso ( $f$ )	$6,71 \times 10^{-7} \text{ Nm/ rad/s}$
Constante de força contra eletromotriz ( $K_g$ )	0,015 V/rad/s
Constante de torque ( $K_m$ )	0,015 Nm/ A

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com as informações obtidas do motor e com o modelo que foi descrito, a função de transferência da máquina é dada por

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{v_a(s)} = \frac{0,015}{1,452 \times 10^{-9} s^2 + 2,424 \times 10^{-6} s + 2,263 \times 10^{-4}} \quad (9)$$

Para representar e simular o sistema foi utilizado o software Matlab, e também o Simulink. A Figura 5 mostra o diagrama de blocos do motor, e a Figura 6 apresenta sua resposta ao degrau unitário.

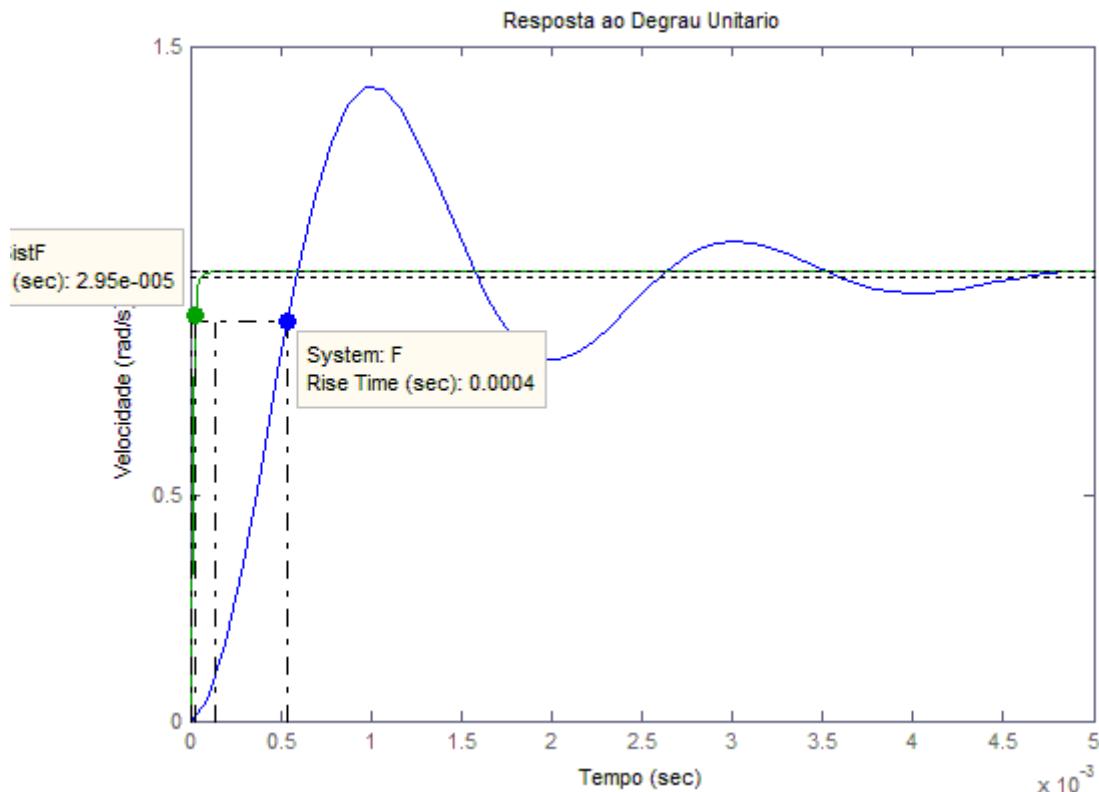


**Figura 6 – Comportamento do motor a malha aberta.**

Para controlar a velocidade foi feita realimentação do motor. A simulação apresentou a dinâmica do sistema com e sem controlador.

A Figura 7 ilustra a resposta em malha fechada do motor sem compensação (em azul), e compensado com o controlador PID (em verde), excitado por degrau unitário. O controlador

atuou reduzindo a velocidade da resposta (tempo de subida) de  $40 \times 10^{-5}$  s para  $2,95 \times 10^{-5}$  s, corrigiu o erro estacionário de 0,985 para 1, e eliminando totalmente o sobressinal.

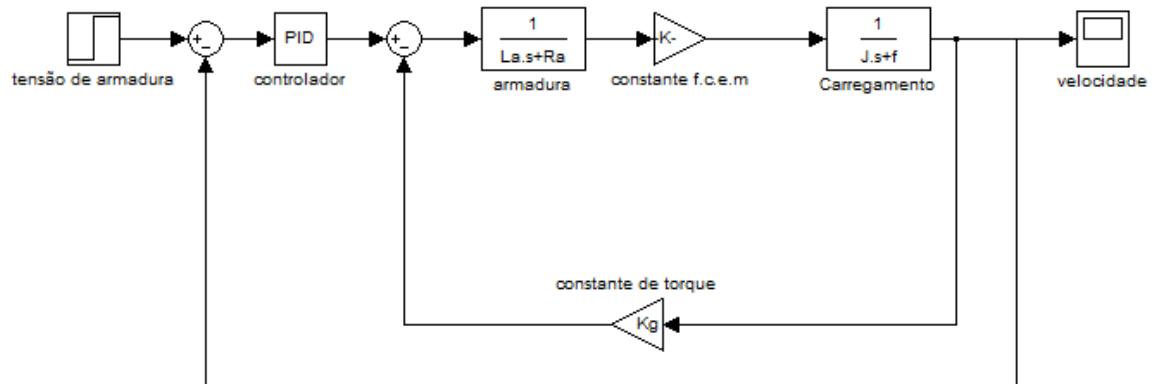


**Figura 7 – Comportamento a malha fechada excitada pelo impulso unitário.**

O controlador foi sintonizado pelo primeiro método de Ziegler-Nichols, e os ganhos obtidos foram:  $K_p = 10,3$ ;  $T_i = 0,00288$ ;  $T_d = 0,00072$ . Assim, a função de transferência do controlador ficou da seguinte forma:

$$G(s)_C = 0,007416 \frac{(s + 694,4)^2}{s}. \quad (10)$$

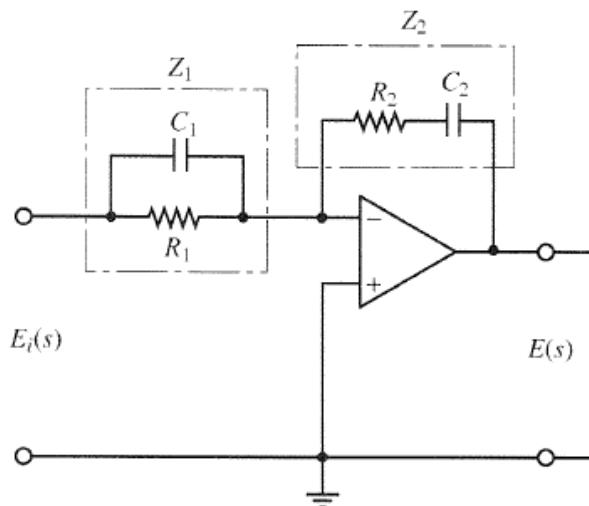
Com isso, o sistema fica no modelado conforme o diagrama de blocos da Figura (8).



**Figura 8 – Diagrama de blocos do motor compensado por um PID.**

Uma vez realizada a parte teórica, dando seguimento ao trabalho, implementou-se o circuito eletrônico analógico.

O circuito é composto por dois resistores, dois capacitores e um amplificador operacional como mostra a Figura 9.



**Figura 9 – Diagrama esquemático do controlador PID (OGATA, 2003).**

Com os ganhos já calculados, os valores das impedâncias são obtidos comparando a função de transferência do controlador com a equação das malhas da Figura 9. Ao igualar as funções do controlador, o sistema terá quatro variáveis e três equações, torna-se necessário selecionar arbitrariamente um valor comercial para um dos componentes, e os outros são calculados de acordo com este.

Escolhendo  $C_2 = 0,1 \mu\text{F}$ , os demais são encontrados, sendo  $R_1 = 3 \Omega$ ,  $R_2 = 30 \text{k}\Omega$  e  $C_1 = 0,25 \mu\text{F}$ .

Com o desenvolvimento até aqui, as placas foram facilmente construídas.

## CONCLUSÃO

A estrutura de um trabalho de controle quando abordado pelo lado prático é dependente em grande parte da disponibilidade de equipamentos e recursos apropriados. O propósito inicial deste trabalho seria de empregar práticas didáticas com elementos menos abstratos, no entanto, a transição de unidades no Campus Jataí do IFG, falhas na infraestrutura na nova unidade (Flamboyant), comprometeu em parte o desenvolvimento previsto anteriormente. No entanto, o trabalho teve seu segmento com as simulações e com o dimensionamento e projeto do controlador como era de se esperar.

Dada forma em que foi rotulado os métodos e teorias estudadas desde a descrição do sistema ao dimensionamento do controlador, se referindo ao “kit didático”, é imaturo dizer que seja especificamente uma placa de circuito impresso que pode ser energizada, mais que isso, toda a composição de informações aqui relatadas configura também o kit, objeto desse projeto. Com este relatório é possível elaborar sem dificuldades roteiros de aulas práticas em nos laboratórios de ensino.

Diante desse contexto conclui-se que houve um aproveitamento regular do que foi proposto.

## REFERÊNCIAS

- BASÍLIO, J. C.; MOREIRA, M. V. **Experimentos para Estimação de Parâmetros de Motores de Corrente Contínua.** Rio de Janeiro, RJ. 2001. Artigo apresentado ao Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE). Disponível em: <http://www.dee.ufrj.br/controleAutomatico/artigos/cobenge2001.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2013.
- DORF, R. C.; BISHOP, Roberth H. **Sistemas de Controle Moderno.** 8º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- DORF, R. C.; BISHOP, Roberth H. **Sistemas de Controle Moderno.** 11º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- LIMA, Fábio R. G. **Análise Comparativa de Estratégias de Controle Modernas Aplicadas no Controle de Velocidade de um Servomotor.** São Caetano do Sul, SP: 2008. 193 p. Disponível em: <<http://www.maua.br/arquivos/.../h/ebe11695998b21d3125b6c7bf62785d2>>. Acesso em: 27 abr. 2013.
- NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle.** 3º ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno.** 4º ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.