

# **CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DIGITAL APLICADO EM VÁLVULA BORBOLETA AUTOMOTIVA**

Rodrigo Peralta Moraes Ruiz, Thiago Ragozo Contim e Armando Antonio Maria Laganá

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

E-mails: [rodrigoperaltamoraes@hotmail.com](mailto:rodrigoperaltamoraes@hotmail.com), [thiago@contim.eng.br](mailto:thiago@contim.eng.br), [lagana@lsi.usp.br](mailto:lagana@lsi.usp.br)

## **RESUMO**

Atualmente, o aumento da necessidade de economia e rendimento em motores de combustão interna têm sido os principais alvos das grandes montadoras e sistemistas da área automotiva. No gerenciamento eletrônico de motores, o controle preciso do corpo de borboleta tem fundamental importância para os objetivos citados, uma vez que a mesma é responsável por permitir a passagem de ar para o motor. Neste artigo, foi projetado um controlador para uma válvula borboleta automotiva a partir de um modelo matemático levantado por meio de identificação não paramétrica da mesma, com o intuito final de ser aplicado em uma unidade eletrônica de gerenciamento flex que se encontra em estado de desenvolvimento. Os resultados apresentados denotam que um controle a partir da modelagem citada, isto é, uma identificação “Caixa Preta”, pode ser de grande valia quando se necessita obter o comportamento dinâmico do sistema sem se ater aos detalhes físicos da válvula, tal estratégia economiza tempo e apresenta resultados satisfatórios.

## **INTRODUÇÃO**

Ao longo dos últimos anos, a eletrônica vem gradativamente tomando espaço dentro dos veículos, mais especificamente no tocante ao gerenciamento eletrônico de motores, tanto de passeio quanto de competição e até mesmo de carga. O papel do gerenciamento eletrônico no contexto de desenvolvimento e aplicação de controle nos motores à combustão interna é, sem dúvida, de extrema importância para atingir um equilíbrio satisfatório entre potência, durabilidade e economia [7].

A partir do controle da válvula borboleta, é possível administrar a entrada de ar dentro do cilindro do motor. Um motor de corrente contínua, localizado no corpo de borboleta, é responsável por acionar engrenagens que por sua vez estão conectadas ao “prato” da válvula. Dessa forma, a abertura e o fechamento da válvula são controlados por meio da tensão aplicada aos terminais do motor.

Dentre as diversas técnicas de controle clássico, o controle proporcional, integral e derivativo (PID) é um dos mais utilizados, devido à sua abrangente aplicação. Este artigo trata do desenvolvimento de um controle proporcional, integral (PI), utilizando a teoria de controle digital para possibilitar sua implementação em um hardware microcontrolado, posteriormente, ser incorporado à unidade de gerenciamento flex [2]-[4].

# 1. INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL

## 1.1 O sistema e seus elementos

O sistema de injeção eletrônica de combustível é responsável por controlar da maneira mais precisa possível as variáveis de tempo de injeção, momento de ignição e massa de ar admitida, de modo que o motor atue dentro de especificações de potência, economia e emissões de poluentes [7].

De maneira geral, a unidade de controle do motor, ou como comumente é intitulada “*Engine Control Unit*” (ECU), tenta manter proporção ar/combustível dentro da relação estequiométrica. Para isso, é necessário controlar a quantidade de ar a ser admitida pelo motor. A ECU recebe o sinal do sensor de combustível (Sonda Lambda) e, a partir do mesmo, efetua os cálculos de tempo de injeção. Consequentemente, haverá um valor de massa de ar correspondente a fim de que a mistura atinja a proporção mais próxima possível do ideal [5,7]. O controle preciso de posição da válvula borboleta possibilitará o gerenciamento da admissão de ar no motor à combustão interna, levando-o a trabalhar dentro das especificações requisitadas [8].

## 1.2. Válvula Borboleta

Dentre as grandes mudanças ocorridas nos últimos anos nos componentes de controle em motores automotivos, vale destacar a válvula borboleta eletrônica.

Antes do conceito de controle eletrônico da válvula borboleta, a massa de ar era controlada de acordo com a demanda do condutor, de maneira que o prato da válvula era diretamente conectado ao pedal acelerador, por meio de um cabo de aço. Ao se pisar no acelerador, o cabo de aço acionava o prato da válvula, promovendo sua abertura e possibilitando a passagem de ar. Todavia, com essa configuração, muitas variáveis e condições internas e externas eram ignoradas. Sendo assim, a eficiência da combustão era prejudicada e, de modo geral, o desempenho do motor também [6].

A fim de suplantiar as deficiências causadas pelo antigo sistema, um módulo de controle foi incorporado à borboleta, de forma a determinar o ângulo que melhor contribua com as condições imediatas do motor.

A figura 1 mostra um diagrama do sistema de controle eletrônico da válvula.

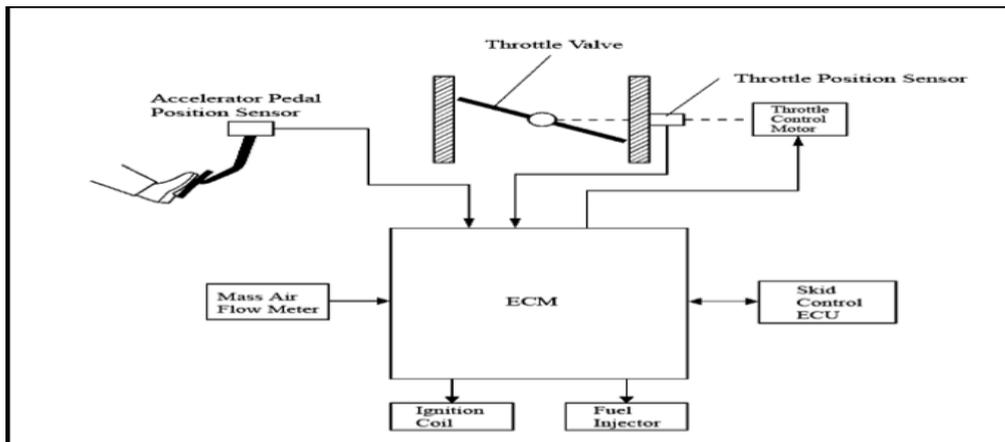


Figura 1- ECU [6].

A válvula é composta por um motor de corrente contínua, que por sua vez está diretamente conectado a engrenagens, também há neste modelo de válvula, duas molas, uma é responsável pela abertura e outra pelo fechamento do prato. Caso não haja o acionamento do motor, a válvula permanece “relaxada” em uma posição denominada “*Limp Home*” que, segundo Thamires (2015,p.30): “[..]*Limp Home* é o ângulo de abertura da válvula borboleta determinado pela mola de retorno acoplada ao corpo da válvula para que o veículo possua o mínimo de entrada de ar necessária para se direcionar a um local seguro em caso de pane[..]”.

Uma vez aplicada uma tensão aos terminais do motor, o deslocamento de seu rotor vence a força das molas, movimentando dessa maneira o prato da válvula.

Neste projeto, a válvula utilizada pertence ao veículo “Volkswagen Polo 1.6 Flex” ano 2006. A figura 2 mostra a foto da válvula borboleta utilizada.

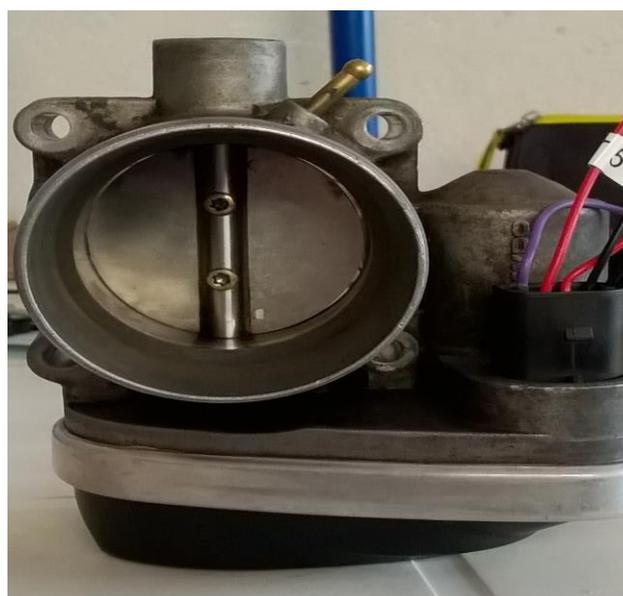


Figura 2- Válvula Borboleta.

### 1.3 O controle

As questões atreladas ao controle da válvula borboleta são frequentemente discutidas e desenvolvidas na literatura devido à sua importância em aplicações industriais.

Projetos de sistemas de controle para a válvula borboleta são sem dúvida cada vez mais crescente no contexto de tecnologias automotivas. O controle de posição, isto é, o ângulo do prato da borboleta em relação à sua posição em repouso, permite administrar quantidade de ar admitida pelo motor. O fluxo de ar, por sua vez, controlará diretamente o torque de saída do motor e, conseqüentemente, sua velocidade, de acordo com a demanda [6].

O controle utilizado neste projeto é denominado como “Proporcional Integral” (PI), no controle proporcional de uma planta em que a função de transferência é configurada originalmente sem um integrador, existe um erro estacionário na resposta para entrada em degrau. Ao se adicionar o controle integral, o sinal de controle atua em função da área sob a curva de erro atuante até aquele momento. Portanto, o controle proporcional tende a estabilizar o sistema, enquanto a ação de controle integral leva o sistema a ter erro estacionário nulo, ou bastante reduzido para vários sinais de entrada [3,4].

O motor de corrente contínua, responsável pelo acionamento do prato da válvula borboleta, trabalha com uma tensão máxima de 12 Volts. De forma similar a um servomecanismo, o motor mantém a válvula em uma determinada posição para um valor de tensão específico.

## 2. CARACTERÍSTICAS DO HARDWARE UTILIZADO

### 2.1 Microcontrolador PIC18F4550

O sistema foi implementado em um microcontrolador PIC18F4550. Esse dispositivo incorpora todos os recursos de comunicação *Universal Serial Bus* (USB) condizentes com as especificações da configuração “USB 2.0”. O módulo suporta tanto comunicações de baixa quanto de alta velocidade, e também incorpora no próprio chip transceptores e reguladores de 3.3V [9].

O presente dispositivo possibilita diferentes maneiras de configurar a frequência de oscilação em comparação com os outros dispositivos da família “PIC18F”. A fim de acomodar os requisitos de operação da comunicação USB, o PIC18F4550 inclui uma nova ramificação de *clock* para prover 48 MHz à operação USB de alta velocidade, de modo que um sistema adicional de *prescalers* e *postscalers* foi incluído para comportar uma larga escala de frequências de oscilação. Sendo assim, o dispositivo permite ao projetista configurar determinados registradores, a fim de obter as frequências desejadas para o microcontrolador trabalhar com a comunicação USB [9]. Dentre os diversos arranjos possíveis para a configuração da frequência de oscilação, o presente projeto teve por opção utilizar o circuito de *Phased Locked Loop* (PLL), que é fornecido especificamente para aplicações com a comunicação USB utilizando cristais de baixa frequência.

O modo PLL é projetado para produzir um valor fixo de 96MHZ de oscilação para uma entrada de referência de 4MHZ. A saída pode então ser dividida e usada, tanto para fornecer a frequência da comunicação USB, quanto para o microcontrolador. Devido ao fato do PLL ter valores fixos de frequência, tanto na saída quanto na entrada, existem oito opções de *prescaler* para configurar a frequência do PLL, há também uma opção de *postscaler* para fornecer ao microcontrolador a frequência desejada. Dessa forma, o circuito de *Phased Locked Loop* permite que o microcontrolador e a comunicação USB usufruam da mesma fonte de oscilação e ainda operem com diferentes velocidades [9].

O kit didático utilizado no projeto é programado/gravado diretamente do computador por meio de um cabo “USB 2.0”. A frequência do oscilador da placa de circuito impresso é de 20MHZ e as configurações necessárias foram efetuadas para que a comunicação USB trabalhasse com 48MHZ. A figura 3 mostra a foto do kit utilizado.



Figura 3- Kit de Desenvolvimento

## 2.2 Sinal PWM

Como já citado neste artigo, a posição do prato da borboleta é controlada por um motor de corrente contínua alimentado com 12 V. Variando-se a tensão no motor, desloca-se de forma proporcional o prato da válvula.

O microcontrolador possui um módulo interno que gera um sinal modulado por largura de pulso, popularmente conhecido como “*Pulse Width Modulation*” (PWM). Pode-se definir um sinal PWM como sendo um sinal de frequência fixa e largura de pulso variável. A largura de pulso, que é denominada como “Ciclo Ativo” ou “Duty Cycle”, é a parte responsável por manter o sinal em nível lógico alto. Embora o sinal PWM seja categorizado como digital, há um valor médio associado a ele, sendo que a variação do ciclo ativo resulta na variação do valor médio do sinal [2]. A figura 4 ilustra as características de um sinal PWM.

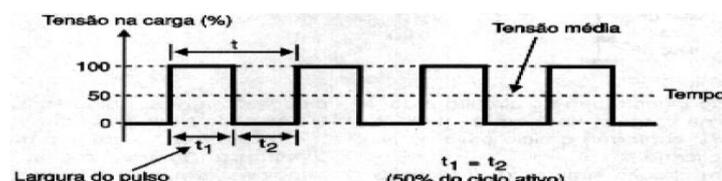


Figura 4- Sinal PWM [11].

A posição da válvula borboleta neste projeto será controlada por meio de um sinal PWM gerado por um módulo interno no microcontrolador já concebido para essa finalidade. O módulo *Capture, Compare, PWM (CCP)* do PIC18F4550 pode ser configurado para fornecer um sinal com frequência fixa e largura de pulso variável. Dessa maneira, o sinal de controle neste projeto será um valor que oscila entre 0 e 100%, sendo esse valor diretamente relacionado com o *duty cycle* do sinal PWM.

### 2.3 Driver de Potência

O chip escolhido para fazer o chaveamento de potência, ou seja, a interface entre a saída do microcontrolador e a entrada do motor da válvula, foi o MC33186. Esse circuito integrado é fabricado pela *Freescale* e é apropriado e certificado para aplicações automotivas. O chip é composto por uma “*ponte H*” que possibilita o controle bidirecional do motor da válvula borboleta eletrônica [10]. A figura 5 mostra o esquema elétrico do circuito integrado.

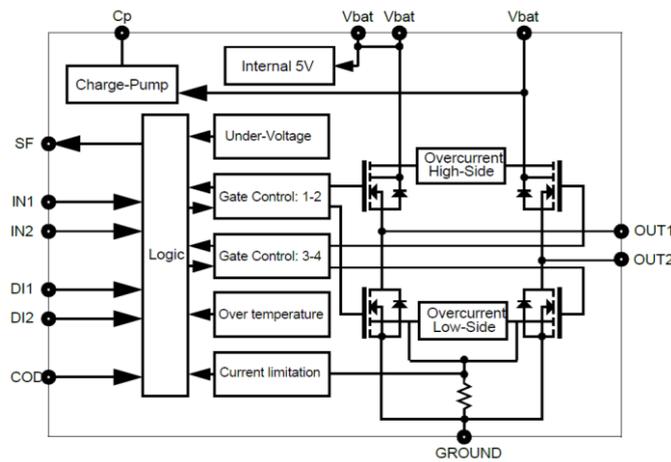


Figura 5- Diagrama Elétrico do driver [10].

A seguir são apresentadas algumas características do driver utilizado:

- Tensão de operação de 5 Volts até 28 Volts;
- Proteção contra transientes de até 40 Volts;
- Resistência de Canal do MOSFET quando ligado de 150 mΩ na temperatura de 25°C;
- Corrente contínua de operação menor ou igual a 5A;
- Proteção contra curto-circuito de 8A;
- Frequência de operação de até 20KHz;
- Proteção de aquecimento excessivo de temperatura;
- Entradas de controle compatíveis com níveis TTL/CMOS;

### 3- DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 O Modelo da Planta.

Para obter o modelo da planta foi realizada uma identificação não paramétrica em malha aberta, aproximando-se um modelo de primeira ordem pelo método de Hägglund para a resposta ao degrau [1]. Uma interface de comunicação serial padrão RS232 foi utilizada para enviar os dados ao computador no formato “.csv”, de maneira que os dados pudessem ser manipulados via Excel e também por meio do software de simulação MATLAB®.

Um sinal do tipo degrau foi aplicado na entrada da planta a fim de obter a resposta da mesma. A resposta ao degrau é um procedimento adequado para caracterizar, de forma preliminar a dinâmica de um processo por meio de interpretações gráficas [1]. Devido a ao fato da válvula borboleta possuir uma dinâmica muito abrupta, a amplitude do degrau de entrada teve de ser baixa para que fosse possível observar o comportamento da saída de forma a aproximar um modelo de primeira ordem para tal resposta. É válido lembrar que o sinal de controle do presente projeto é do tipo PWM, sendo assim, a planta foi submetida a um sinal com ciclo ativo de 12.35% (o que corresponde a um valor médio de aproximadamente 1.5 Volts). O tempo de amostragem estabelecido para a identificação do sistema foi de 10 milissegundos, portanto, a cada intervalo de amostragem o sistema envia ao computador os dados de tempo, ângulo da válvula e porcentagem da saída do sinal PWM. A válvula possui um sensor de posição denominado “*Throttle Position Sensor*” (TPS). O sensor emite uma tensão linearmente proporcional ao ângulo da válvula, sendo que a tensão no sensor varia de 0 V a 5 V e o ângulo da válvula varia de 0° a 90°. Todavia, a válvula utilizada no presente projeto tem a sua posição de repouso em 5.9°. Foi estabelecida a estratégia de levantar inicialmente um modelo para a abertura da válvula e , ficando o controle de descida atribuído a outro controlador independente, que será abordado ademais neste projeto. A figura 6 mostra a resposta da válvula para um degrau de 12.35% na entrada.

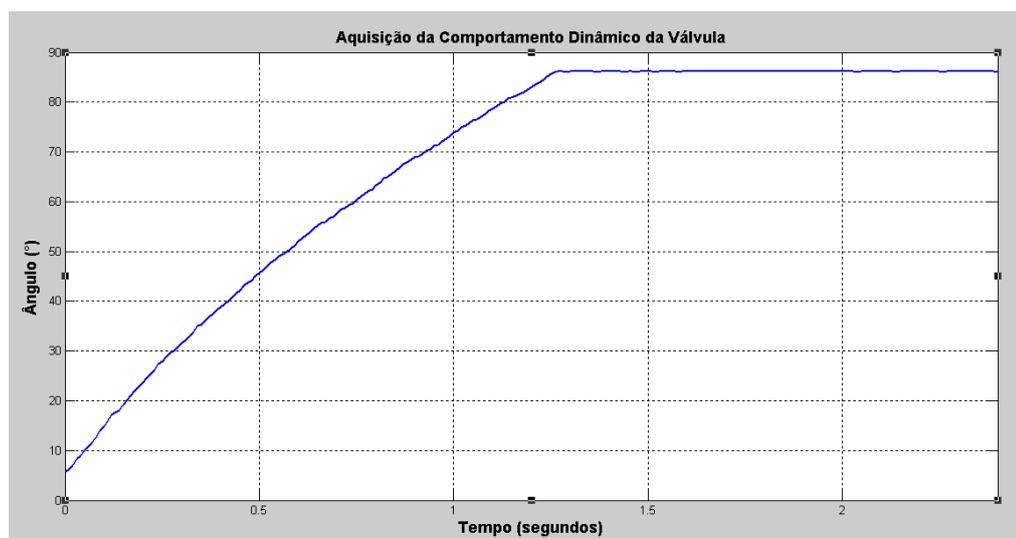


Figura 6- Resposta da válvula para entrada “Degrau”.

Um modelo da dinâmica de um processo, comumente utilizado para aproximações de primeira ordem é mostrado em (1):

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (1)$$

Esse modelo é configurado pelo ganho estático  $K$ , pela constante de tempo  $\tau$  e pelo atraso de transporte  $\theta$  [1]. A partir da resposta ao degrau coletada, os parâmetros foram estimados de modo que  $K$  é obtido dividindo-se o valor final da saída pelo valor da entrada, a unidade de saída do presente projeto é o ângulo da válvula em graus, e a entrada é um valor que varia de 0 a 100% , correspondente ao ciclo ativo do sinal PWM. Sendo assim:

$$K = \frac{86.3^\circ}{12.35\%} \cong 7 \quad (2)$$

$\tau$  é o tempo em segundos que o sistema leva para atingir 63.2% de seu valor final [4]. Como na amostragem não foi possível obter um valor de amostra que correspondesse exatamente a um valor de 63.2%, a constante de tempo foi extraída a partir da amplitude mais próxima possível do valor de 63.2%:

$$\tau = 0.64s \quad (3)$$

O sistema não possui atraso de transporte, portanto esse quesito será desconsiderado. Com os parâmetros estimados obteve-se a seguinte função de transferência em malha aberta:

$$G(s) = \frac{7}{0.64s + 1} \quad (4)$$

Foi desenvolvido um *script* no *software* de simulação matemática MATLAB® para calcular o percentual de compatibilidade do modelo levantado com a curva original. A figura 7 mostra o resultado da primeira comparação:

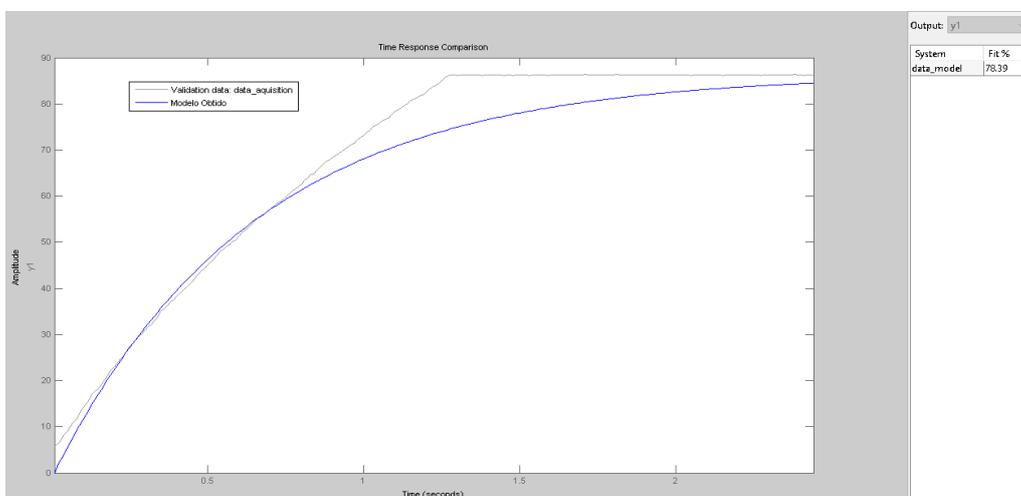


Figura 7- Comparação do modelo obtido com a resposta da planta.

Como é possível observar, o percentual de compatibilidade é de 78.39%, no intuito de aumentar este percentual e consequentemente melhorar a fidelidade do modelo em relação à curva original, o ganho do modelo foi reajustado para um valor de “7.5”, obtendo-se a seguinte função de transferência:

$$\frac{7.5}{0.64s + 1} \quad (5)$$

A figura 8 mostra o resultado da segunda comparação com o ganho reajustado:

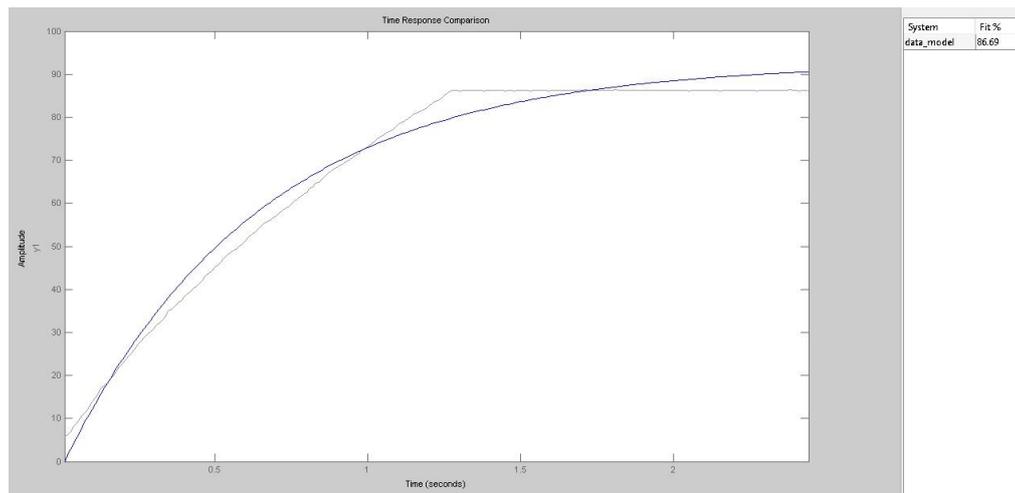


Figura 8- Comparação da resposta do modelo reajustado com a resposta da planta.

Como o gráfico denota, o valor de compatibilidade aumentou para 86.69%, foi optada a utilização do modelo de (5) como modelo base para a síntese do controlador.

### 3.2 Projeto do Controlador e Simulação no MATLAB®.

Inicialmente foi projetado um controlador a partir dos seguintes requisitos de desempenho:

- $\zeta = 0.9 \Rightarrow Mp = 0.15\%$
- Tempo de subida de 200 milissegundos.

Esses requisitos foram alterados posteriormente para atender às demandas do projeto.

O projeto foi realizado pelo lugar geométrico das raízes. A partir dos requisitos de desempenho, obtém-se os seguintes polos desejados em malha fechada:

$$s_{0,1} = \sigma \pm j\omega = -27.77 \pm j13.45 \quad (6)$$

O controlador será implementado como sendo proporcional, integral, como mostrado em (7)

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s} \quad (7)$$

Desenvolvendo a equação obtemos o controlador na forma de um compensador de atraso de fase, conforme a equação (8).

$$C(s) = K \frac{(s+a)}{s} \quad (8)$$

O polo do controlador foi alocado na origem do plano “s” adicionando dessa maneira um fator integrador ao sistema, o zero do controlador foi obtido como sendo um décimo da parte real do polo desejado, o ganho do controlador foi calculado pela restrição de módulo.

- Polo = 0.
- Zero =  $\sigma \frac{1}{10} = -2.77$ .
- Ganho=K=  $\frac{1}{|C(s_0)||G(s_0)|} = 2.57$

. A equação (9) mostra o controlador projetado no plano “s”.

$$C(s) = 2.57 \frac{(s + 2.77)}{s} \quad (9)$$

A figura 9 mostra a simulação da resposta da planta para o controlador contínuo.

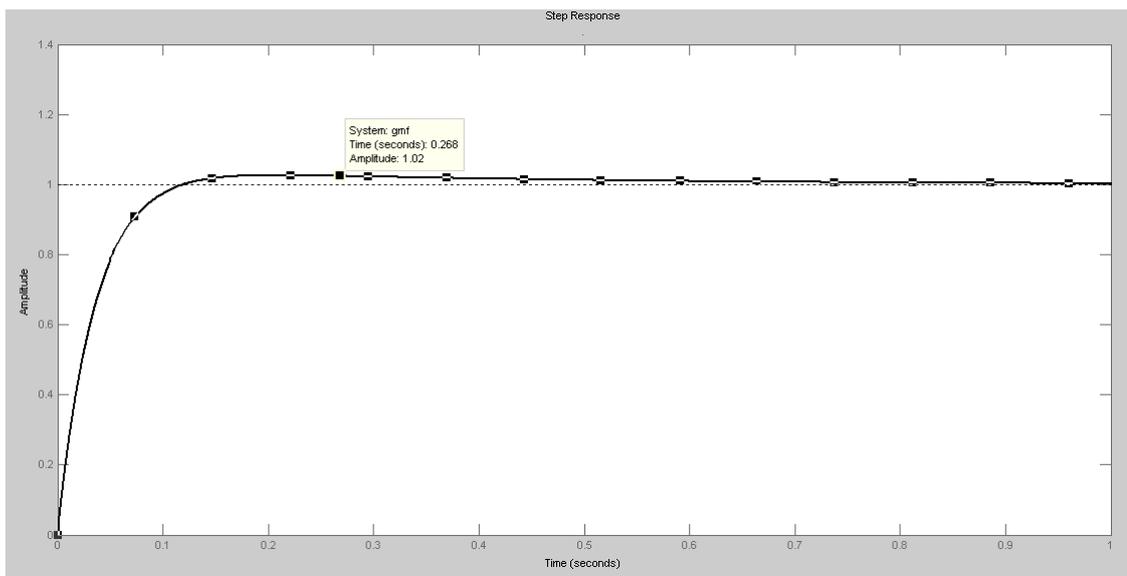


Figura 9- Simulação da planta com o controlador contínuo

O controlador foi discretizado pelo método de “Tustin”, pois tal método é o que melhor aproxima a parcela integrativa [3]. O período de amostragem utilizado foi de 10 milissegundos, valor sessenta e quatro vezes menor do que a constante de tempo do sistema. O controlador é mostrado em (10).

$$C(z) = 2.53 \frac{(z - 0.9727)}{z - 1} \quad (10)$$

A figura 10 mostra a simulação da resposta da planta com o controlador discretizado.

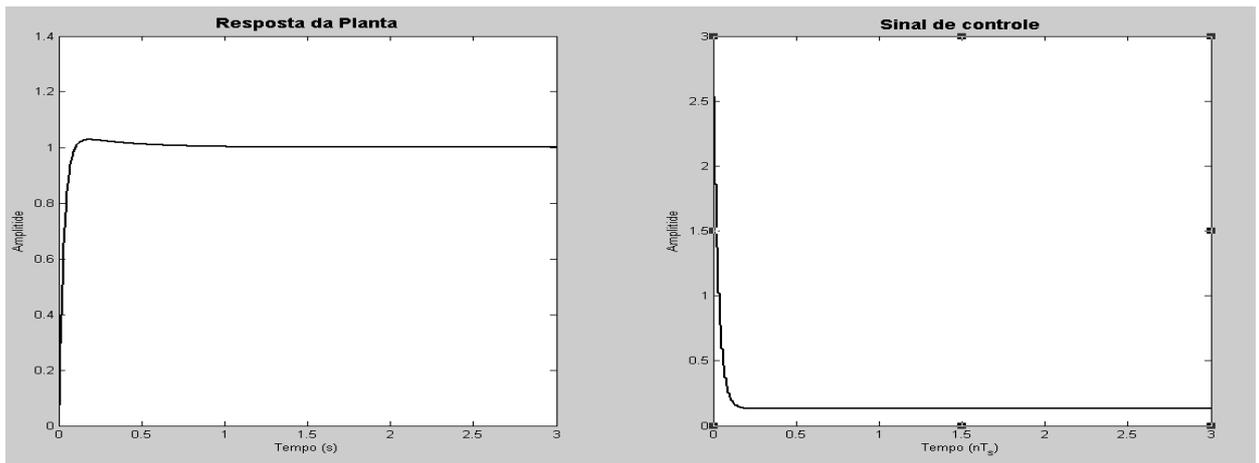


Figura 10- Simulação da planta com o controlador discreto

### 3.3 Implementação no *Hardware* Microcontrolado

A figura 11 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle implementado no microcontrolador PIC18F4550. Os blocos sinalizados em laranja fazem parte da própria arquitetura do microcontrolador. A partir do valor de *setpoint*, o algoritmo calcula o erro e atua no sinal PWM, variando seu ciclo ativo. O sinal passa pelo driver de potência para ser amplificado, possibilitando o acionamento do motor. O sensor de posição da válvula fornece uma tensão que varia de 0 V a 5 V, correspondendo linearmente ao ângulo da borboleta. A tensão passa pelo conversor Analógico/Digital do microcontrolador para que os dados possam ser processados. O controlador foi implementado no PIC18F4550 na forma de equação de diferenças. Inicialmente o controlador foi utilizado com a forma e os valores apresentados em (10), isto é, sem realizar nenhum tipo de ajuste. O valor de 50° é estabelecido como *setpoint* para a aquisição inicial.

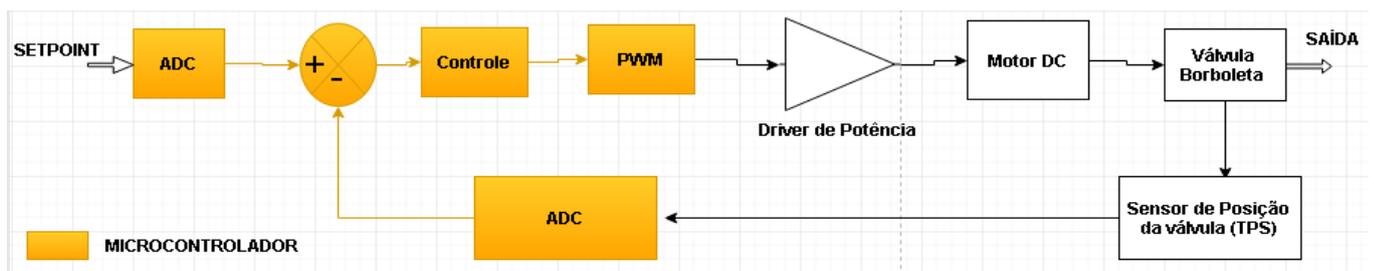


Figura 11- Diagrama de blocos do sistema de controle.

Ao se discretizar o controlador, é possível obter a equação de diferenças do mesmo e com isso, implementar a equação no *firmware* de controle, em (11) é mostrada a equação de diferenças:

$$u[n] = 2.53e[n] - 2.46e[n - 1] + u[n - 1] \quad (11)$$

Aonde “ $e[n]$ ” é o erro da  $n$ ésima amostra e “ $u[n]$ ” é a atuação de controle da  $n$ ésima amostra.

A figura 12 mostra a resposta da planta com o controlador projetado para um *setpoint* de  $50^\circ$ .

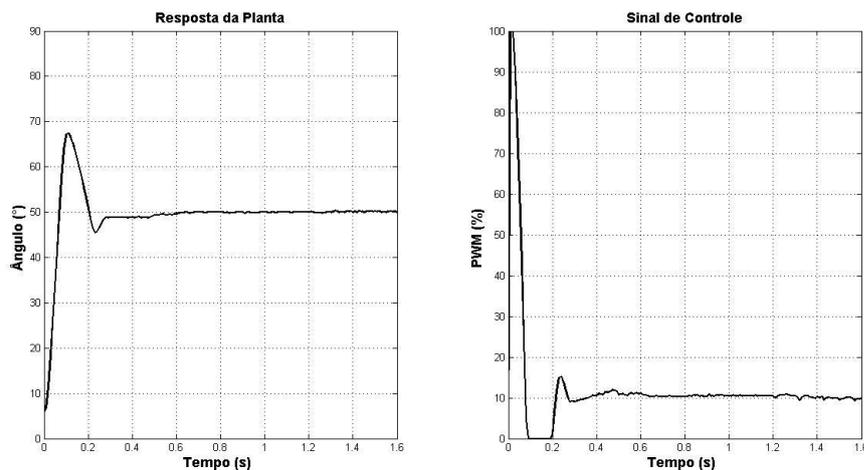


Figura 12- Primeira resposta da planta.

Como é possível observar, o sistema apresenta um tempo de subida de aproximadamente 70 milissegundos, entretanto, o *overshoot* ultrapassa o valor de 30% para o *setpoint* estabelecido, sendo assim, é necessário realizar alguns ajustes no compensador, o primeiro ajuste foi a alocação o zero do controlador mais próximo da origem no plano “ $z$ ” em 0.9827, com isso um polo mais lento é adicionado em malha fechada, diminuindo consequentemente o sobressinal. A resposta para o controlador ajustado é mostrada na figura 13.

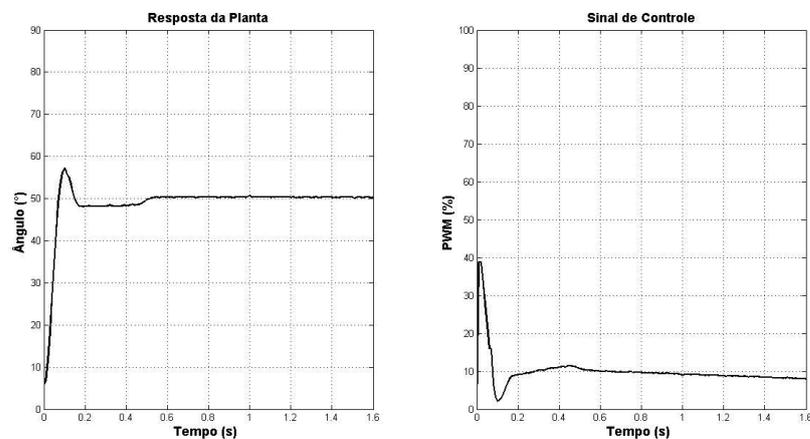


Figura 13- Resposta do sistema com o controlador ajustado.

É notória a melhora da resposta do sistema para o compensador ajustado, um segundo ajuste ainda foi realizado no intuito de obter um comportamento mais estável da saída na resposta transitória, o ganho do controlador foi reajustado para “K=0.5”, a fim de diminuir o sobressinal, contudo, ao diminuir-se o ganho, o sistema fica mais lento, posto isto, o zero do controlador foi reajustado para “z=0.92” para que um polo mais rápido seja adicionado ao sistema em malha fechada, compensando consequentemente a redução do ganho. A Figura 14 mostra a resposta do compensador reajustado.

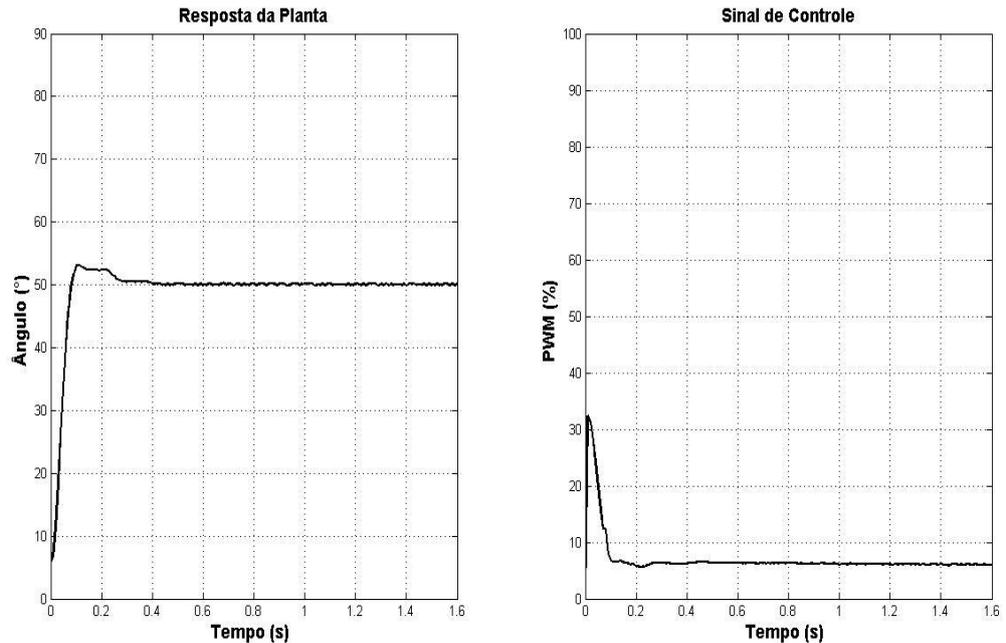


Figura 14- Resposta do sistema para o controlador reajustado

O controlador final é mostrado em (12):

$$C(z) = 0.5 \frac{(z - 0.92)}{z - 1} \quad (12)$$

O controlador foi passado para a forma “PID Posicional”, para que a parcela integrativa e proporcional ficassem explícitas, conforme as equações a seguir.

$$u_i[n] = u_i[n - 1] + \frac{KpTs}{2T_i}(e[n] + e[n - 1]) \quad (13)$$

$$u_p[n] = Kpe[n] \quad (14)$$

$$u[n] = u_p[n] + u_i[n] \quad (15)$$

Onde “ $u_i[n]$ ” é a parcela integrativa da  $n$ ésima iteração, “ $u_p[n]$ ” a parcela proporcional da  $n$ ésima iteração e “ $u_i[n-1]$ ” a parcela integrativa da iteração anterior.

A figura 15 ilustra a resposta da planta para uma referência de 60 graus.

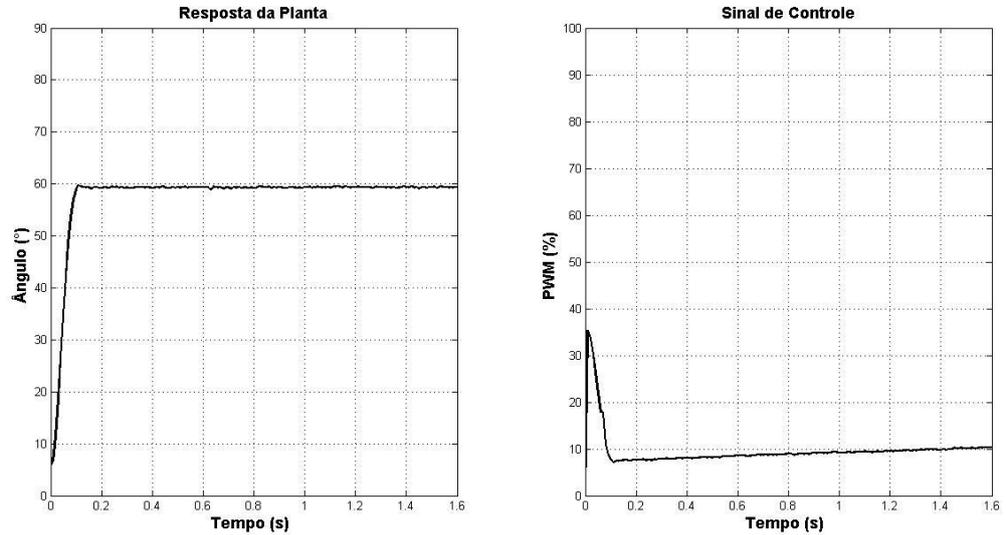


Figura 15- Resposta do sistema para um *setpoint* de 60 graus.

A Figura 16 ilustra a resposta da planta para uma referência de 45 graus.

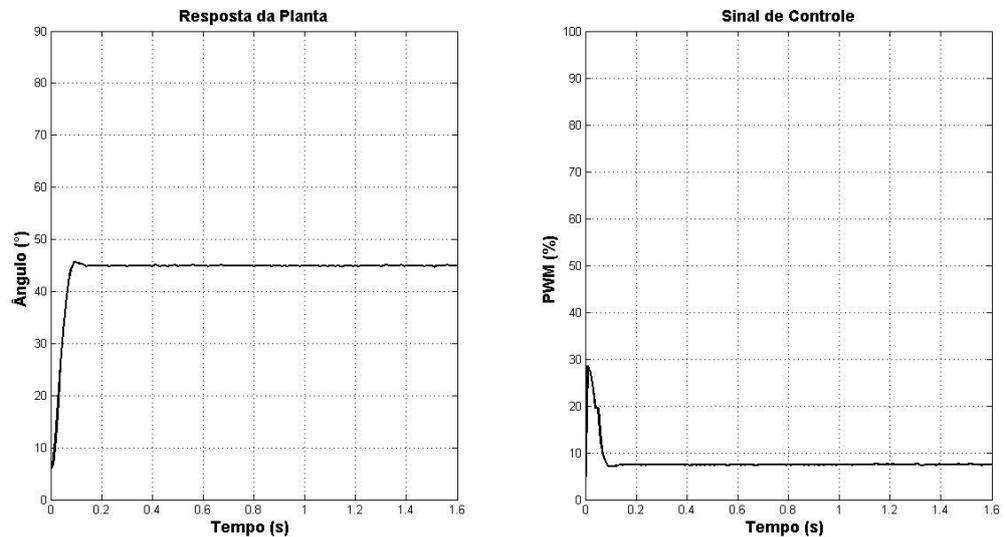


Figura 16- Resposta da planta para um *Setpoint* de 45 graus.

Como é possível observar, os resultados estão dentro das especificações estabelecidas para a resposta transitória.

A válvula ainda possui a necessidade de ser controlada abaixo da posição *limhome*, no entanto, o curso do prato desde a posição de repouso até o fechamento completo é

muito curto, tornando inviável a aquisição para levantamento de um modelo matemático, portanto, optou-se por aplicar ao curso de descida da válvula o próprio controlador obtido para atuar na subida da mesma, realizando-se ajustes empíricos após a implementação para que uma resposta satisfatória fosse obtida pois, a mola que controla a descida da válvula possui características físicas diferentes da mola que controla a subida da mesma.

A figura 17 denota a resposta da planta para uma referência de 3 graus.

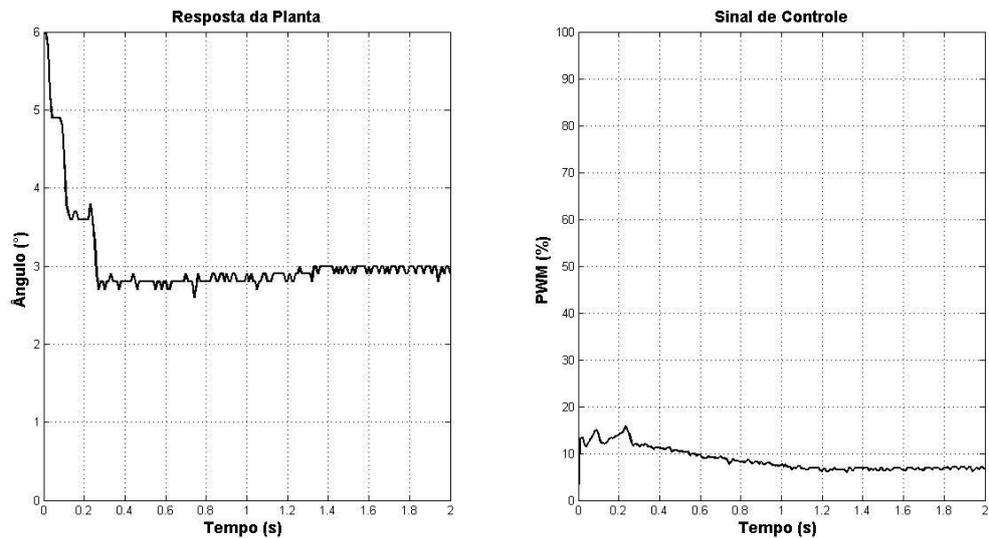


Figura 17- Resposta da planta para um *setpoint* de 3 graus.

A figura 18 mostra a resposta da planta para uma referência de 2 graus.

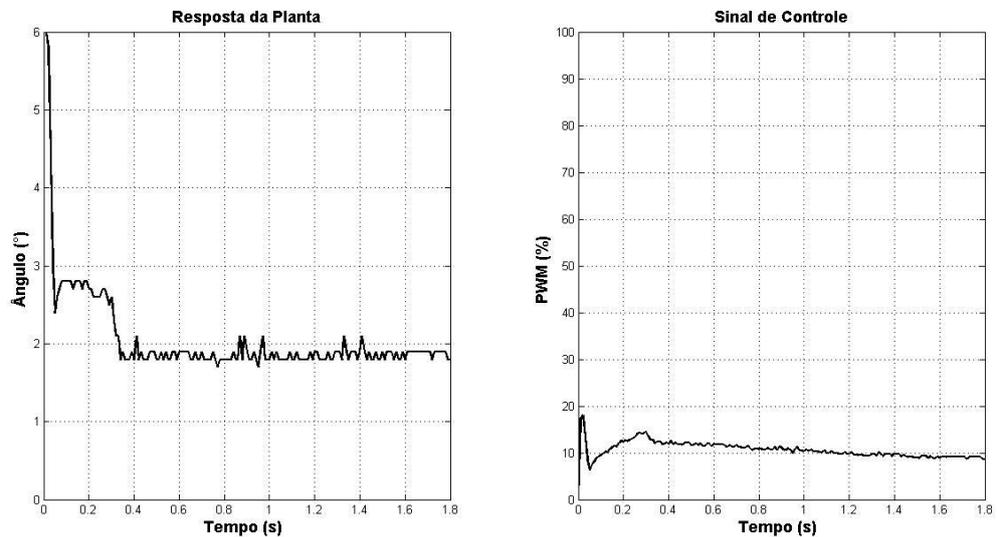


Figura 18- Resposta da planta para um “*Setpoint*” de 2 graus.

O compensador obtido para controlar a válvula abaixo da posição *limhome* é:

$$u_p[n] = Kp e[n] \Rightarrow Kp = 3.5 \therefore u_p[n] = 3.5e[n] \quad (16)$$

$$u_I[n] = u_I[n-1] + \frac{KpTs}{2T_I}(e[n] + e[n-1]) \Rightarrow T_I = 10.3 \therefore u_I[n-1] + 0.18(e[n] + e[n-1]) \quad (17)$$

$$u[n] = u_p[n] + u_I[n] \quad (18)$$

O sinal PWM que atua no controle abaixo da posição de repouso tem a sua polaridade invertida se comparado ao sinal que atua no controle de subida, posto isto, a inversão de polaridade do sinal de controle é um evento que ocorrerá ocasionalmente quando se deseja migrar de um estado abaixo da posição *limphome* para outro estado acima desta posição, ou vice-versa. Contudo, a válvula pode sofrer danos irreversíveis caso o sinal seja invertido e o prato se choque com a força contrária da mola ao passar pela posição de repouso. Para isto, dentro do *firmware* de controle foi estabelecida uma máquina de estados, onde são levados em conta o ângulo atual da válvula e o valor de *setpoint* requerido.

A figura 19 ilustra o fluxograma da máquina de estados.

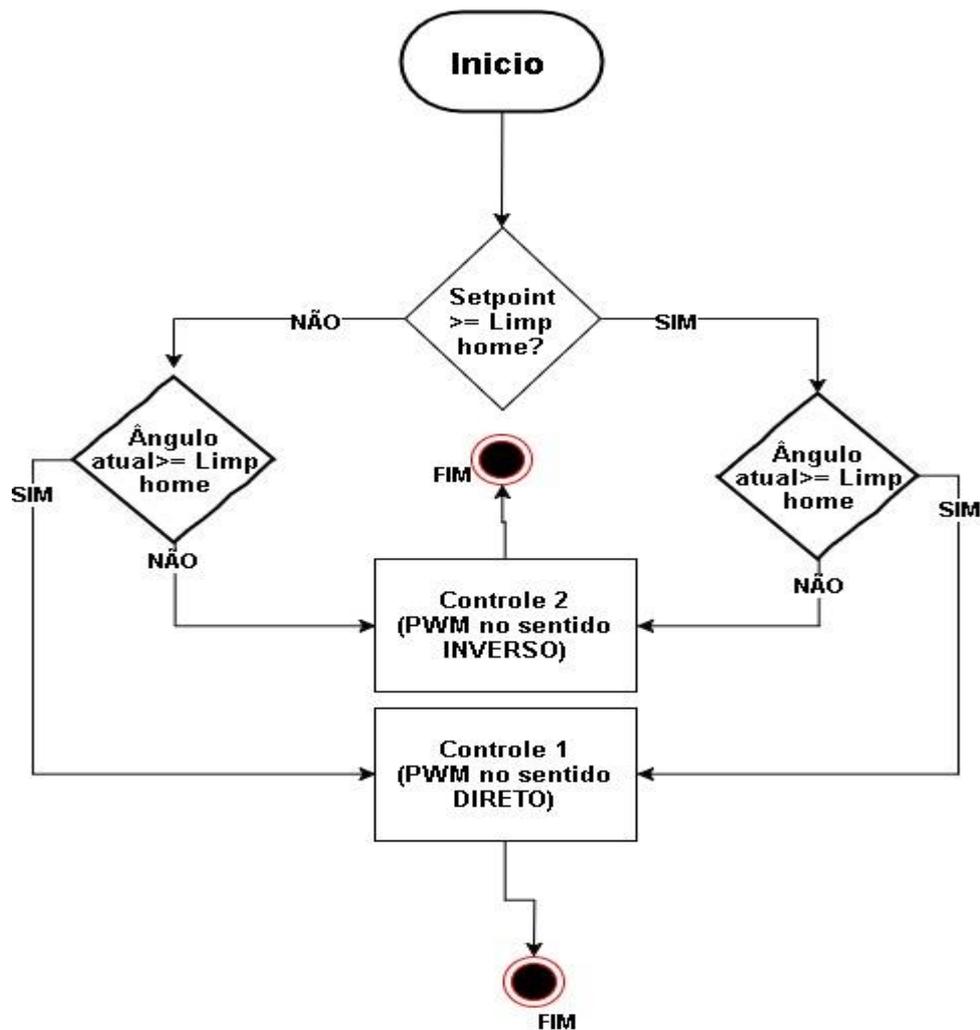


Figura 19- Fluxograma de estados do sistema.

A partir do fluxograma é possível identificar que o módulo de controle só inverte o PWM quando a válvula passa pela posição de *limphome*.

Se o *setpoint* é menor do que a posição *limphome* e o prato da válvula se encontra em um ângulo acima desta posição, o controlador acionado será o “Controle 1” mostrado em (12) que trabalha com PWM direto. Quando a válvula atingir a posição *limphome* o controlador utilizado será o “Controle 2” mostrado em (16), (17) e (18) que inverte a polaridade do sinal PWM.

A figura 20 ilustra a situação descrita, onde inicialmente a referência para o controle é de 60 graus, passando posteriormente para 2 graus.

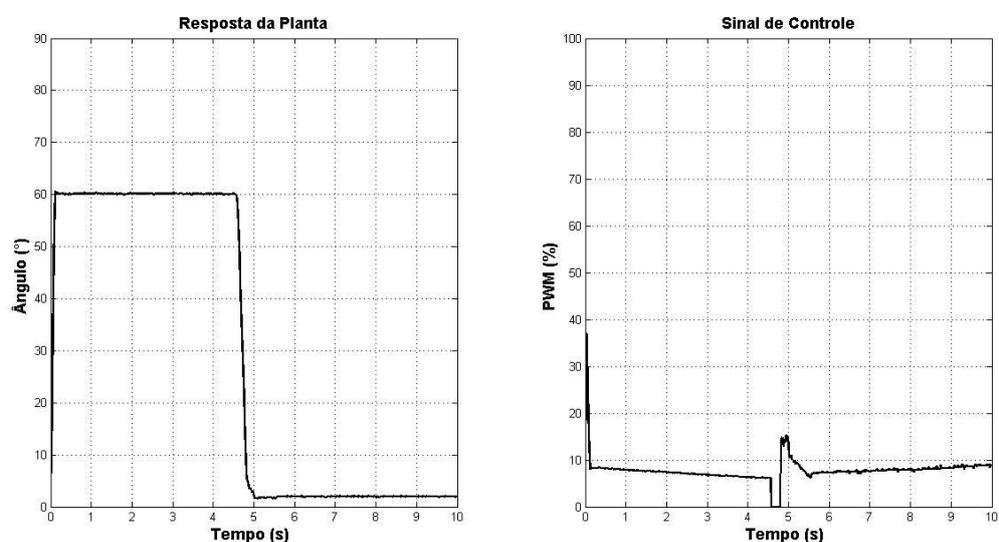


Figura 20- Transição de 60 graus para 2 graus.

## CONCLUSÃO

O controle de posição da válvula borboleta tem grande importância na implementação de uma unidade de controle automotivo. Este projeto teve como proposta o desenvolvimento e aplicação de tal controle em uma válvula borboleta de bancada para ser posteriormente inserido em uma unidade de gerenciamento eletrônico para o veículo “Polo 1.6 Flex” que se encontra em fase de desenvolvimento. Dentre os muitos desafios encontrados, vale destacar as dificuldades em realizar a identificação da planta e ajustar controlador, pois essas etapas não se baseiam simplesmente no desenvolvimento de equações, bem como não se trata de um algoritmo exato ou uma receita que leva ao resultado esperado. A matemática envolvida no projeto do controlador serve para encaminhar o controle para o comportamento almejado, sendo que este, só obtém-se com calibrações feitas a partir de uma análise minuciosa da resposta transitória e do regime estacionário.

Com os resultados apresentados é categórico afirmar que o controle implementado em um modelo obtido a partir do método de identificação descrito, torna-se completamente viável quando se tem disponibilidade limitada para a obtenção de um modelo físico, uma vez que tal método proporciona resultados extremamente satisfatórios, como proposta de aperfeiçoamento, fica a sugestão de implementar um método para identificação de um modelo que descreva o comportamento da válvula abaixo da posição *limphome*.

Conclui-se que o projeto traz uma potencial aplicação em um firmware de gerenciamento eletrônico de motores, uma vez que o mesmo propicia soluções para o controle de posição da válvula borboleta. Com os satisfatórios resultados obtidos é possível implementá-lo em um motor real.

## REFERÊNCIAS

- [1] AUGUSTO RODRIGUES COELHO, Antônio; DOS SANTOS COELHO, Leandro. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [2] DA SILVA ZANCO, Wagner. **Microcontroladores PIC18 com Linguagem C**. São Paulo: Érica, 2010.
- [3] DE LAURO CASTRUCCI, Plínio; BITTAR, Anselmo; MOURA SALES, Roberto. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [4] OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. Estados Unidos: Prentice-Hall, 2002.
- [5] REIF, Konrad. **Gasoline Engine Management**. Friedrichshafen: Springer Vieweg, 2015.
- [6] AHMED AL-SAMARRAIE, Shibly; KHUDHAIR ABBAS, Yasir. Design of Electronic Throttle Valve Position Control System using Nonlinear PID Controller. **International Journal of Computer Applications**, Iraq-Baghdad, Vol 59, p. 27-34, Dez. 2012.
- [7] SILVA PEREIRA, Bruno; FRANCISCO JUSTO, João; ANTONIO MARIA LAGANÁ, Armando. Controle da Mistura Ar/Combustível em um Motor a Combustão Interna: Sistema em Malha Fechada. **XXIII Simpósio Internacional De Engenharia Automotiva-SIMEA 2015**, São Paulo, Vol. 2, p. 1-17, Set. 2015.
- [8] THAMIRES DA SILVA, C. **Modelamento matemático e controle PI de uma válvula borboleta eletrônica**. 2015. 139 p. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 22/05/2015.

- [9] MICROCHIP, PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet, Ver. E .EUA: 2009.  
Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>.  
Acesso em: 02 fev. 2017.
- [10] NXP , H-Bridge Driver, Ver. 8. EUA: 2013. Disponível em:  
<<http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MC33186.pdf>>  
Acesso em: 01 jan. 2017.
- [11] EBAH. **Pwm microcontrolador 8051**. Disponível em:  
<<http://www.ebah.com.br>>. Acesso em: 01 jan. 2017.