PROGRAMAÇÃO E CONTROLE DE VAZÃO PARA CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL APLICADAS A MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Programming and flow control of fuel cells applied in internal combustion engines

SANTOS, Gregory Ramos Soares
Centro Universitário de Jaguariúna

Resumo: Este trabalho tem como objetivo a criação de um sistema de controle de vazão de combustíveis para motores movidos à combustão interna. Para tal efeito o projeto é baseado no desenvolvimento de um sistema de injeção eletrônica incorporado por dispositivos de controle, sensores e atuadores. Como meios principais de programação e recebimento de dados são utilizados um micro controlador Arduino como interface de dados e um computador comum associados a plataforma LabVIEW como processador principal e elemento supervisório do sistema. Com o objetivo de redução no consumo de combustíveis líquidos (gasolina, Álcool e outros) será realizado o controle e tratamento de vazão de gás hidrogênio concretizando estudos de viabilidade e eficiência relacionados ao uso de células de combustíveis em veículos automotores. Para realização dos efeitos desejados será desenvolvida a programação adequada ao dispositivo controlador utilizado onde serão capturadas variáveis, manipuladas e devolvidas de forma controlada ao sistema que deverá trabalhar de forma estável. Portanto será projetado e desenvolvido um sistema de controle de vazão que terá como finalidade a dosagem conjunta de combustíveis líquidos e gasosos em motores, de forma controlada, tratada e automática, tendo como parâmetros de programação o funcionamento adequado e eficiente do motor, dessa forma proporcionando conclusões sobre o uso de células de hidrogênio. O trabalho tem como objetivo a aplicação dos conceitos teóricos estudados, demonstrando a montagem e os métodos utilizados para o experimento proposto bem como os resultados obtidos com o sistema construído.

Palavras-chaves: Programação, Controle de Vazão, Processamento de Variáveis, combustíveis, Hidrogênio.

Abstract: This paper aims to create a flow control system of motor fuel-powered internal combustion for this purpose the project is based on the development of an electronic injection system incorporated by control devices, sensors and actuators as means main programming and receiving data is used a micro Arduino controller as data interface and a PC Personal joint Co associated with LabVIEW main processor and supervisory system element. In order to reduce the consumption of liquid fuel (petrol, alcohol, etc.) will be performed the control and treatment hydrogen gas flow embodying feasibility and efficiency related to the use of fuel cells for automotive vehicles. For achieving the desired effects will be developed appropriate programming to the controller device used where variables are captured, manipulated and returned in a controlled way the system should work stably. So it will be designed and developed a flow control system that will aim the joint dosing liquid and gaseous fuels in engines, controlled, treated and automatically, with the programming parameters the proper and efficient operation of the engine thus providing conclusions on the use of

hydrogen fuel cells. The paper aims at the application of theoretical concepts studied, demonstrating the assembly and the methods used for the experiment proposed and the results obtained with the system built.

Key words: Programming, Flow Control, Variable Processing, Fuel, hydrogen.

INTRODUÇÃO

Atualmente, os veículos automotores, comercializados mundialmente, em sua grande maioria utilizam como combustível a gasolina, o etanol e o diesel, a prática global do uso desses combustíveis tem se tornado alvo de grandes discussões quando é associada principalmente a poluição do meio ambiente. Além dos danos causados ao meio ambiente, no Brasil os preços praticados na venda desses combustíveis têm desmotivado consumidores seja no uso particular ou no reflexo dos preços causado nos transportes coletivos, fretes e outros. Seja pela poluição causada ou pelos preços de venda praticados, a busca por novas tecnologias de combustíveis é necessária e aquela que atenda a níveis satisfatórios de eficiência e economia deve ser implantada no mercado o quanto antes.

Além do surgimento e do desenvolvimento constante dos métodos de injeção eletrônica nos veículos, fator que implicou no controle eletrônico de dosagem de combustível e assim na economia, adaptações tem sido elaboradas fora das industrias montadoras tal como a utilização de “kits” do gás GNV e GLP(gás natural veicular e gás liquefeito de petróleo respectivamente), gases com custo relativamente mais baixo que outros combustíveis e utilizados em instalações realizadas em conjunto com os elementos originais dos veículos, porém trata-se de um método adquirido com o objetivo de economia financeira e popularizado principalmente entre motoristas profissionais. A busca por outros meios de transporte e motorização não gira só em torno de combustíveis, ocorrendo assim tendências tais como o carro elétrico que tem se mostrado como alternativa viável no futuro, sendo um meio de transporte não poluente e que atualmente depende apenas da evolução de tecnologias de armazenamento de energia elétrica, trazendo ainda grandes limitações de autonomia. Assim como a implantação de combustíveis alternativos caso do GNV e GLP em

sistemas originais de veículos, tecnologias de células de combustíveis tem se popularizado na forma de promessas de economia para o consumidor.

O gás hidrogênio é um elemento abundante na superfície da Terra, sendo encontrado na natureza em forma de gás, trata-se de um elemento promissor na corrida mundial incessante por novas alternativas de fontes de energia. Apesar do hidrogênio ser uma fonte de energia não poluente, assim como outros recursos ele apresenta limitações relacionadas ao armazenamento e riscos de explosões visto que é um gás muito pouco denso (o que atualmente dificulta a armazenagem) e altamente inflamável. As células de combustível são equipamentos que tendem a auxiliar na utilização do hidrogênio como combustível em automóveis pois nelas o hidrogênio é gerado em processos equivalentes aos que ocorrem com baterias, neste caso a eletrólise da água é realizada para a obtenção do gás, ocorrendo a geração e utilização do gás pelo motor simultaneamente, condições que tendem a anular as dificuldades de utilização apresentadas.

Portanto, as células de hidrogênio são equipamentos que já são utilizados em veículos e funcionam em conjunto com os meios de injeção originais do automóvel, desta forma o controle de injeção do veículo adaptado com uma célula de hidrogênio vária em função dos meios originalmente projetados para trabalhar apenas com combustíveis líquidos, não havendo misturas para a queima e funcionamento do motor. As ferramentas de controle e programação são elementos que podem auxiliar neste controle, tornando o funcionamento mais eficiente, calculado e estável, executando funções que determinem variáveis de injeção dos combustíveis líquidos no motor em função da variação de geração do hidrogênio em uma célula.

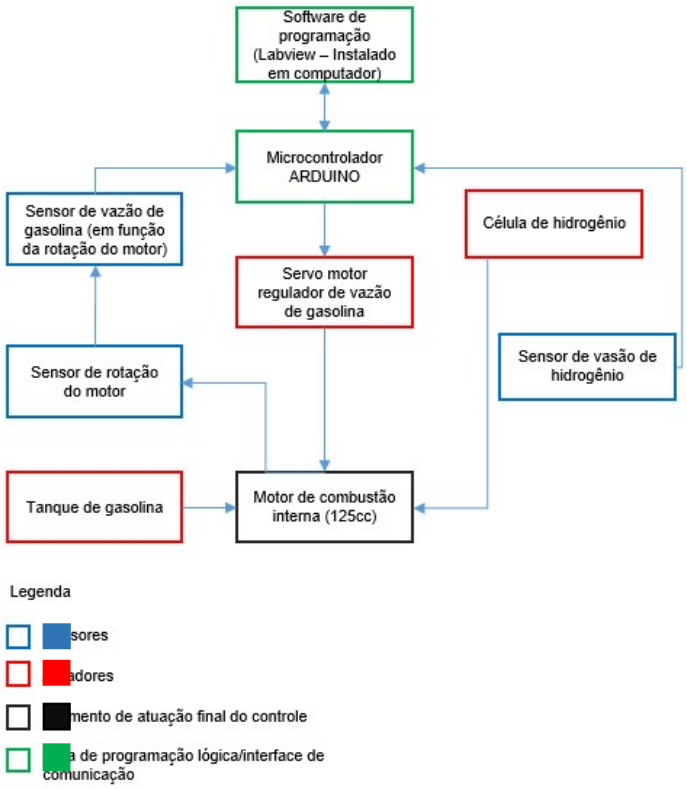
Busca-se com este projeto o desenvolvimento de um sistema de controle de vazão de combustíveis para motores de combustão interna que analise a viabilidade da utilização de células de hidrogênio com controle dedicado. Nele serão explorados os recursos de processamento e controle disponibilizados por computadores digitais assim como a utilização de uma programação eficiente baseada na plataforma *Labview* que deverá trabalhar como método de programação e *software* supervisório, sendo capaz de gerar dados suficientes para analises de eficiência e funcionamento em relação ao emprego de uma célula de combustível em um motor de combustão comum. Os testes serão

realizados em um motor utilizado em motocicletas produzidas e comercializas atualmente, como resultante deste processo de programação busca-se a definição sobre o uso de células de combustível controladas eletronicamente assim como os benefícios relacionados a economia de combustíveis fosseis e orgânicos poluentes.

METODOLOGIA

Nesta seção serão explorados e descritos os procedimentos utilizados para a programação lógica, aplicação e testes que tendem a sanar as necessidades da proposta demonstrando o funcionamento real da ideia base (figura 1).

Figura 1. Modelo simplificado de ligação geral do projeto



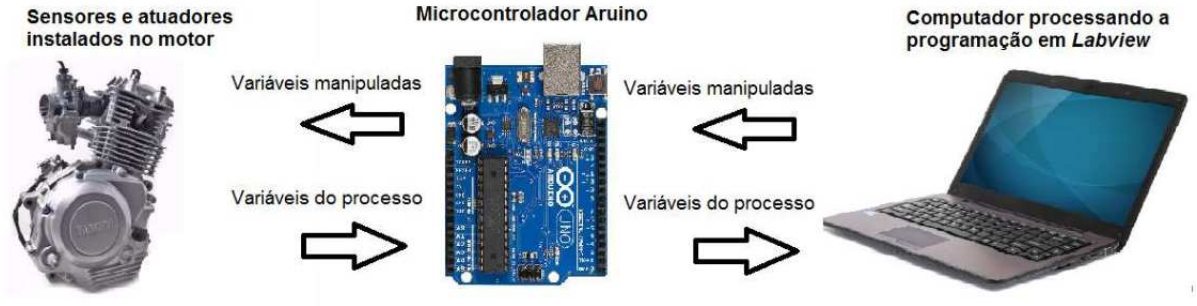
Fonte: Autor

Ligação da interface entre o meio físico e a área lógica do sistema

Tratando-se de um experimento onde são necessárias a programação em ambiente lógico e a obtenção de variáveis do meio físico, faz-se necessária uma rede de comunicação entre eles. Dessa forma, a comunicação dos meios idealizada para o projeto pode ser exemplificada por um microcontrolador

Arduino para obtenção de variáveis e geração de sinais para atuadores, ligado a um computador por meio de um cabo USB Serial (Figura 2).

Figura 2. Modelo básico de interface de comunicação implementado



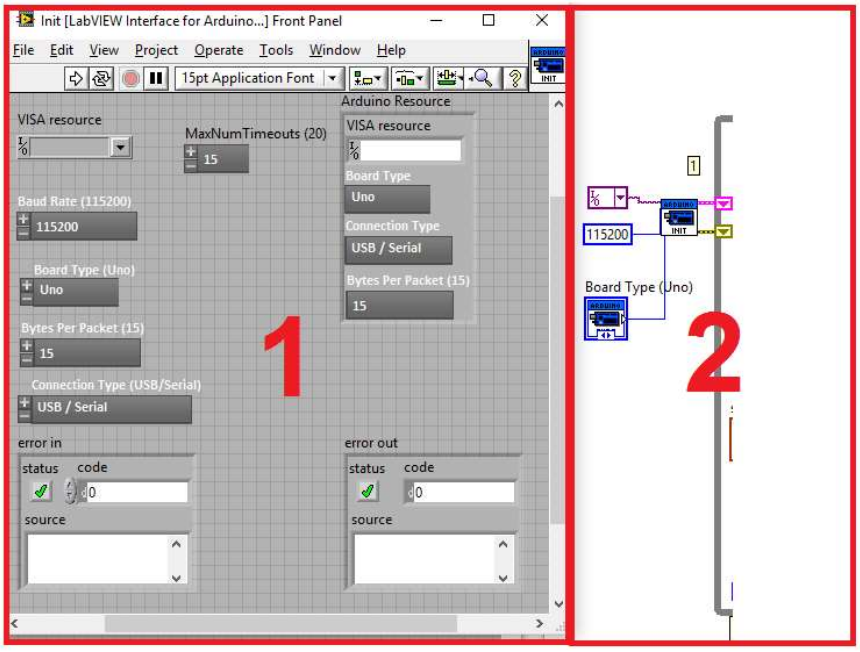
Fonte: Autor

O fluxo de informações ilustrado pelas setas em cor verde representa a comunicação entre o Arduino e o *software LabVIEW* realizada por um cabo USB serial. O fluxo de informações ilustrado pelas setas em cor azul representa a comunicação entre o Arduino e os sensores e atuadores do sistema, a comunicação neste caso é realizada por cabeamento ligado as portas de entrada e saída do controlador (portas analógicas, digitais e PWM).

Uso da ferramenta Arduino aplicada ao *software Labview*

O *software Labview*, possui bibliotecas dedicadas a diversos tipos de aplicação, dentre elas é utilizada no projeto a biblioteca Arduino cuja função é realizar a comunicação direta com as portas do controlador, realizar o monitoramento da variação das portas e disponibiliza-las para utilização dentro da área lógica do *software*. Com o uso dessa biblioteca não é necessária a utilização de programações dentro do controlador, e ao aplica-la caracteriza-se o controlador Arduino como dispositivo de interface de comunicação, suprindo a necessidade proposta idealizada para o projeto (Figura 3).

Figura 3. Representação da biblioteca Arduino no *software LabVIEW*



Fonte: Autor

A área 1: Área de programação de parâmetros do Arduino onde são configurados para o projeto os itens:

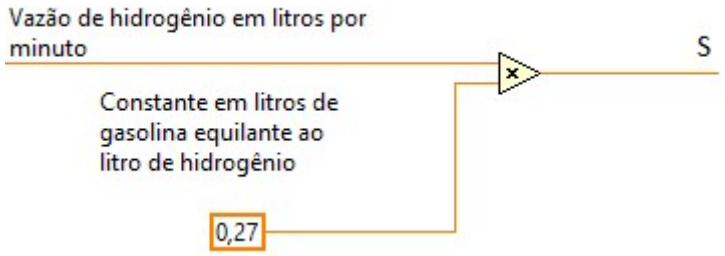
- *Board type (Tipo de placa)* - Tipo do Arduino utilizado, que no caso considera-se o modelo Uno.
- *Connection type (Tipo de conexão)* - Tipo de conexão, definida como conexão USB.
- *Error in* e *error out (Entrada de erro e saída de erro)* - Área onde serão apresentados possíveis erros de entrada e erros de saída.
- Os outros parâmetros apresentados na área de configuração do Arduino serão mantidos os originais da aplicação.
- Área 2: Área de programação onde é demonstrado o bloco programável dedicado a comunicação com o controlador Arduino.

Metodologia de utilização do hidrogênio

Conforme os conceitos apresentados e disponibilizados por NETO, 2016, para utilização no projeto em questão, a vazão de hidrogênio será fornecida diretamente ao programa principal em litros por minuto. Sabe-se que a energia contida em 1 litro de hidrogênio equivale a 0,27 litro de gasolina (HOFFMANN, 2005), dessa forma é considerado para o projeto o cálculo de

porção de gasolina que pode ser substituída por determinada vazão de hidrogênio medida conforme demonstra a figura 4.

Figura 4. Cálculo de equivalência hidrogênio X gasolina



Fonte: Autor

Onde a saída “S” é a resultante direta em litros de gasolina por minuto que podem ser substituídos ou compensados pelo hidrogênio gerado.

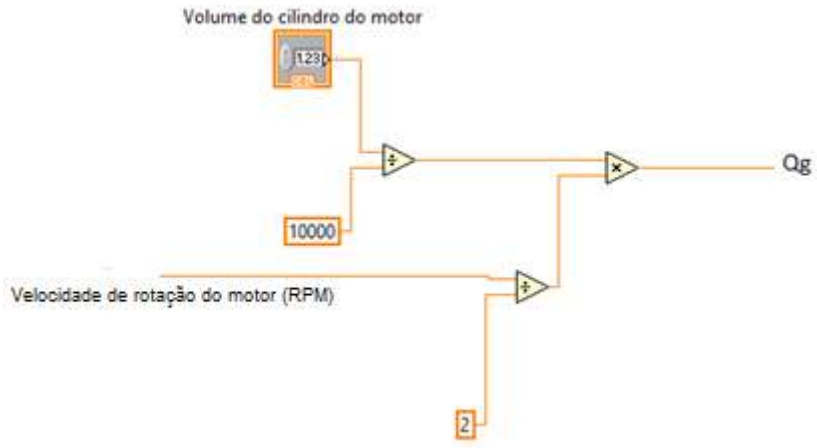
Programação da variável de vazão de gasolina

Utilizando o cálculo de vazão ideal para um motor de combustão interna (PUGLIESI, 1998), é obtida a vazão de gasolina em função da rotação do motor conforme a equação.

$$Qg = \frac{Vm}{10000} * \left(\frac{Rpm}{2}\right) \quad (1)$$

A implementação da formula na plataforma *Labview* é obtida utilizando as ferramentas matemáticas conforme demonstra a Figura 5.

Figura 5. Implementação da formula de vazão de gasolina

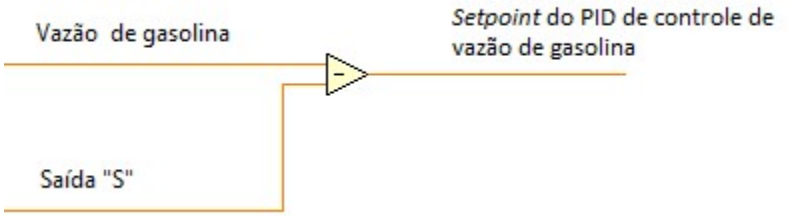


Fonte: Autor

Função de substituição da parcela gasolina em função da vazão de hidrogênio

Considerando a saída “S” demonstrada no item 2.4 é utilizada a subtração da vazão de gasolina necessária pela parcela de hidrogênio. Esse cálculo definirá o *setpoint* do controle PID de vazão de gasolina (Figura 6).

Figura 6. Obtenção do *Setpoint* do PID de controle de vazão de gasolina

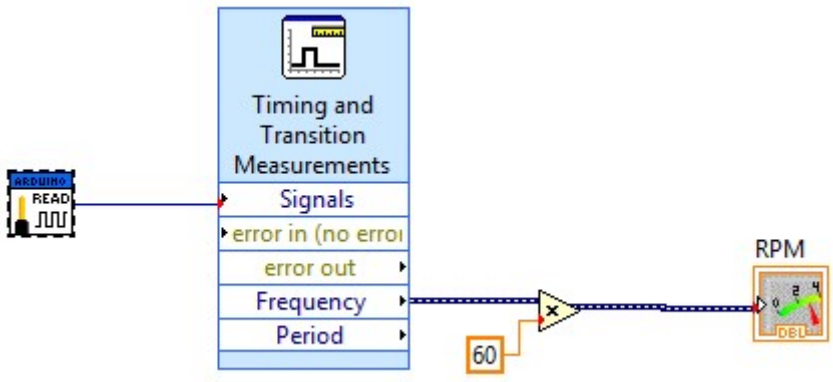


Fonte: Autor

Programação da variável de rotação do motor

Dados os pulsos do sensor indutivo fixado no pinhão do motor, sendo acionado a cada volta completa (OLIVEIRA, 2016), é possível a captação desse sinal que será gerado em uma porta digital do Arduino e fornecido a ferramenta *Timing and Transition Measumements* (Temporização e transição de medidas). O sinal de frequência gerado na saída dessa ferramenta é multiplicado pela constante 60 (Segundos) e então é obtido o sinal em rotações por minuto (Figura 7).

Figura 7. Obtenção da movimentação do motor em rotações por minuto

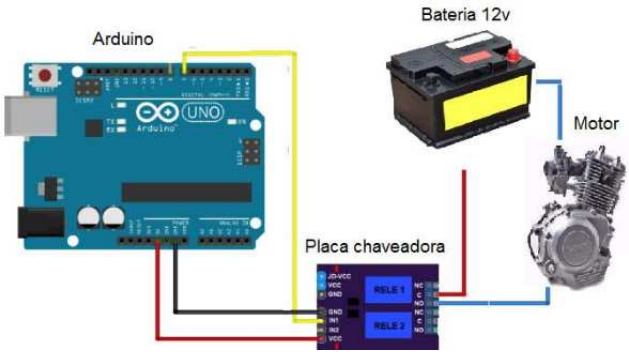


Fonte: Autor

Programação da ligação do motor via software

Dados os elementos necessários para o funcionamento do motor de combustão interna, para se obter seu estado de funcionamento inicial deve-se ocasionar movimentos de rotação iniciais (retirar os mecanismos da inércia) até que os mecanismos de geração de fagulha juntamente com a introdução de combustível na câmera de combustão produzam a energia necessária. No caso, utilizando o dispositivo de partida elétrica original do motor pode-se implementar a ligação do motor via software supervisório com a utilização de um módulo relé 5v, a ligação é representada pela figura 8.

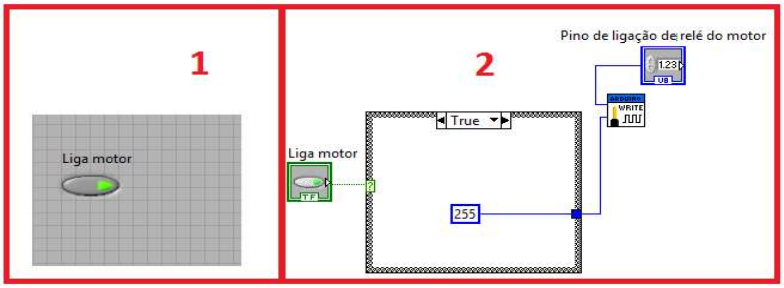
Figura 8. Ligação de módulo relé no arduino



Fonte: autor – Adaptado de Filipeflop, 2013

O método lógico implementado é realizado por meio da *Case Structure* (estrutura “caso”), ferramenta que permite utilizar programações diferentes em função de uma condição verdadeira ou falsa. O *case* é acionado assim que o botão booleano da área supervisória for ativado, dessa forma a condição verdadeira fornecerá ao bloco o valor constante de 255, escrevendo na porta digital selecionada do Arduino o valor 1 e ocasionando o acionamento do módulo relé que acionará o motor de partida da moto enquanto o botão booleano permanecer acionado no supervisório. Caso a estrutura *case* esteja em condição falsa, o valor escrito na porta digital conectada ao módulo relé será como ilustrado na figura 9.

Figura 9. Metodologia de ligação do motor via software

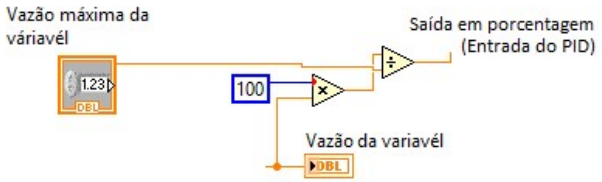


Fonte: autor

Transformação de variáveis em porcentagem

Para a utilização das variáveis nos controles PID envolvidos no processo suas respectivas entradas e saídas são transformadas em porcentagem. A transformação de variável para porcentagem utilizada pode ser exemplificada pela figura 10.

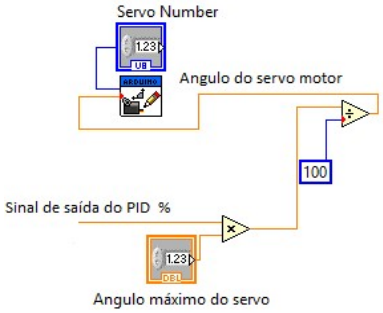
Figura 10. Obtenção de variáveis em porcentagem



Fonte: Autor

O mesmo procedimento é utilizado para a saída do PID, como no processo o atuador final do controle PID será um servo motor (regulador de vazão de gasolina) determina-se seus valores de atuação de porcentagem para ângulo (Figura 11).

Figura 11. Transformação do sinal de saída PID em ângulo de atuação do servo motor

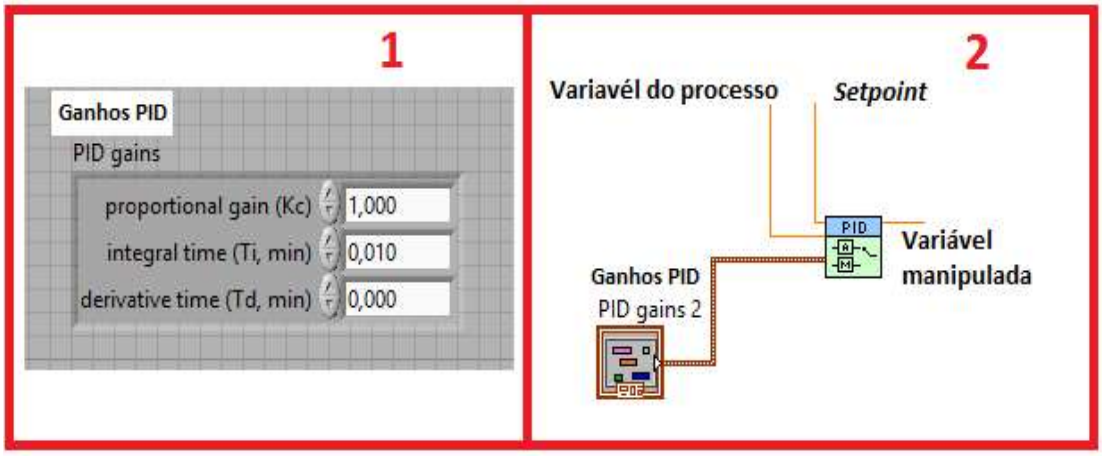


Fonte: Autor

Programação dos blocos PID

Os blocos de PID disponibilizados pelo *software labview* apresentam uma estrutura onde os dados de entrada necessários são apenas o *setpoint* o valor da variável do processo em porcentagem e os ganhos (National instruments, 2013), a área lógica e supervisória dos controles PID a serem utilizados no projeto são demonstradas pela figura 12.

Figura 12. Configuração do controle PID no *Labview*



Fonte: Autor

Onde:

Área 1 – Área de configuração dos ganhos PID

Área 2 – Área de ligação e programação lógica do PID

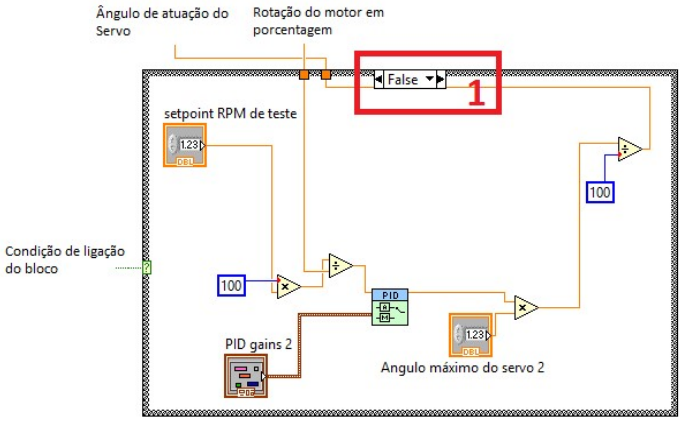
Os ganhos PID serão configurados manualmente, sendo obtidos por meio de testes até que o tempo de estabilidade do processo seja satisfatório, ou

seja quando a estabilidade da variável do processo for estabilizada em relação ao *setpoint* no menor tempo possível.

Controle de vazão para testes

Os testes de economia de combustível terão início a partir de uma rotação determinada no sistema supervisório, a partir do momento em que o valor de rotação de testes for atingido o controle PID de vazão de gasolina será ligado. Para a obtenção da rotação de testes é empregado o controle PID em função da rotação do motor, sendo montado dentro da estrutura *Case Structure* (estrutura “caso”), a área 1 representada na figura 13 demonstrada que este PID funciona enquanto o *case* estiver em estado falso.

Figura 13. PID controlador de rotação de teste



Fonte: Autor

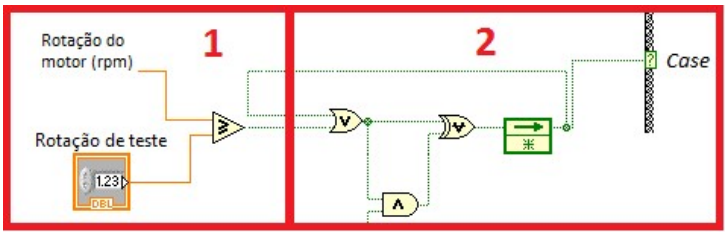
As variáveis do controle PID de rotação de testes são:

- Entradas - *Setpoint* de RPM de testes e RPM real do motor
- Saída - Sinal de atuação para o servo motor (Aumentando ou diminuindo seu ângulo, alterando a vazão de gasolina e respectivamente alterando a rotação do motor).

Programação do PID de controle de vazão de gasolina

Sendo o controle empregado quando o *case* é verdadeiro, o PID de controle de vazão de gasolina será ligado assim que a rotação do motor atingir a rotação de testes desejada, o processo que passará a condição do *case* para verdadeiro é representada pela figura 14.

Figura 14. Programação de condições do *case*



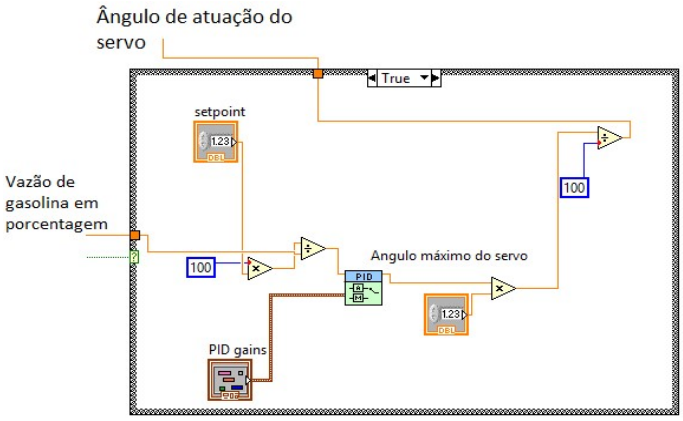
Fonte: Autor

Onde:

- Área1 – área de comparação entre a rotação do motor e a rotação de testes utilizando a ferramenta *Greater Or Equal* (maior ou igual).
- Área2 – Área de programação booleana.

Na programação booleana são utilizadas as portas or (ou), and (e) e xor (x-ou), para formar um lanço, impossibilitando que o *case* torne-se falso após a ligação do PID de controle de vazão de gasolina caso a rotação do motor desça abaixo da rotação de teste. O controle PID de vazão da gasolina então é ligado e tende a manter a vazão de gasolina no *setpoint* desejado (vazão de gasolina necessária subtraída da vazão de hidrogênio proporcional a determinada parcela de gasolina) (Figura 15).

Figura 15. PID de controle de vazão de gasolina



Fonte: Autor

As variáveis do controle PID de vazão de gasolina são:

- Entradas - Set point vazão de gasolina e vazão de gasolina real.
- Saída - Sinal de atuação para o servo motor (Aumentando ou diminuindo seu ângulo, alterando a vazão de gasolina.

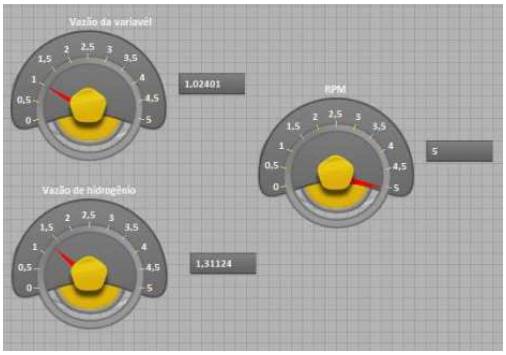
Resultados

Nesta sessão serão demonstrados os resultados experimentais envolvendo a energia obtida com a célula de hidrogênio utilizada, apresentações gráficas de variáveis bem como a conclusão sobre a viabilidade dos processos de controle e automação utilizados para o controle de vazão empregado no projeto em função da economia de combustível.

Apresentação gráfica de variáveis

Para a apresentação gráfica das variáveis de vazão de hidrogênio e gasolina real são utilizados os indicadores de ponteiro predefinidos e disponibilizados pelo *software labview* na área supervisória do programa (Figura 16).

Figura 16. Indicadores de variável em tempo real

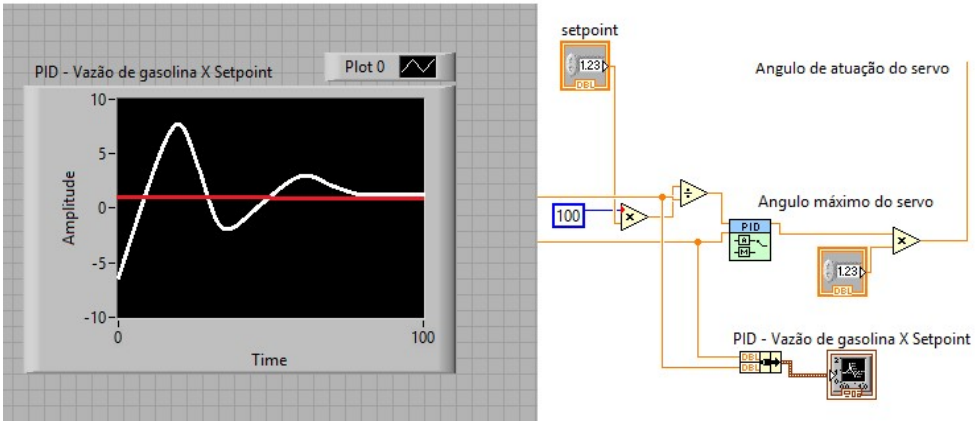


Fonte: Autor

Apresentação de gráfico PID.

Uma das possibilidades de apresentação de um gráfico PID é o gráfico demonstrativo do *setpoint* e variável do processo, ao demonstrar essas variáveis em um único gráfico é possível analisar se a variável do processo é igual ou tende a estabilizar ao *setpoint* (Figura 17).

Figura 17. Representação gráfica *setpoint* X variável do processo



Fonte: Autor

Análise de combustível economizado

A análise de combustível economizado no processo é dada observando a o consumo de gasolina no momento em que o motor atingir a rotação de teste e a rotação do motor no momento em que a parcela de gasolina for substituída pela parcela proporcional de hidrogênio inserido no sistema. Caso a rotação do motor se mantenha a mesma, ou seja, caso a parcela de hidrogênio mantenha a mesma rotação exercida pela energia da parcela de gasolina substituída, o sistema será considerado viável.

Variáveis de vazão de hidrogênio obtidas por experimento

Conforme os conceitos apresentados por NETO, 2016 a vazão de hidrogênio teórica considerando as condições apresentadas abaixo pode ser obtida:

Tabela 1. Vazão de hidrogênio experimental obtida

VARIAVÉIS OBTIDAS NA CÉLULA	CONDIÇÃO OBTIDA POR EXPERIMENTO	VAZÃO DE HIDROGÊNIO OBTIDA
Corrente	60 A	30,12 Litros / Hora
Temperatura	328 K	
Pressão	1 atm	
Tempo	3600 s	

Fonte: Autor – Adaptado de NETO, 2016

Porcentagens simuladas de economia de gasolina obtida em função da vazão de hidrogênio

Abaixo são demonstradas as porcentagens experimentais de economia de combustível líquido para determinadas rotações do motor.

Tabela 2. Porcentagens de economia experimentais obtidas

Rotação	Vazão de gasolina necessária (L/min)	Energia proporcional Hidrogênio X gasolina (L/min)	Porcentagem de economia (%)
1000 RPM	0,00625	0,135	2160
3000 RPM	0,01875		720
5000 RPM	0,03125		432

Fonte: Autor

Portanto, é observado que as porcentagens de economia de gasolina simuladas em função da vazão de hidrogênio (considerando dados constantes para obtenção da vazão de hidrogênio) são elevadas e tendem a suprimir totalmente o consumo de gasolina. Com tudo, sabe-se que a dos dados para obtenção de vazão de hidrogênio são variáveis e cabe ao processo de controle a análise de dosagem de gasolina em função da vazão variável de hidrogênio.

Rotação de funcionamento inicial do motor

A rotação inicial do motor obtida por medição é dada pela multiplicação da frequência inicial por 60 (Rotações por minuto). Dessa forma foi considerada que a rotação inicial do motor é igual a aproximadamente 1319 rotações por minuto para uma frequência de 21,98 Hz (Hertz) conforme demonstra a figura 18.

Figura 18. Frequência inicial do motor obtida por medição



Fonte: Autor

Porcentagem de economia de gasolina para rotação inicial do motor

Considerando a rotação inicial do motor obtida por medição direta em função da frequência e que a vazão do hidrogênio se mantenha constante a 5% da vazão obtida em teste (item 3.4) é demonstrada abaixo a economia de gasolina possibilitada pelo controle desenvolvido (tabela 3).

Tabela 3. Porcentagens de economia para rotação inicial do motor obtida

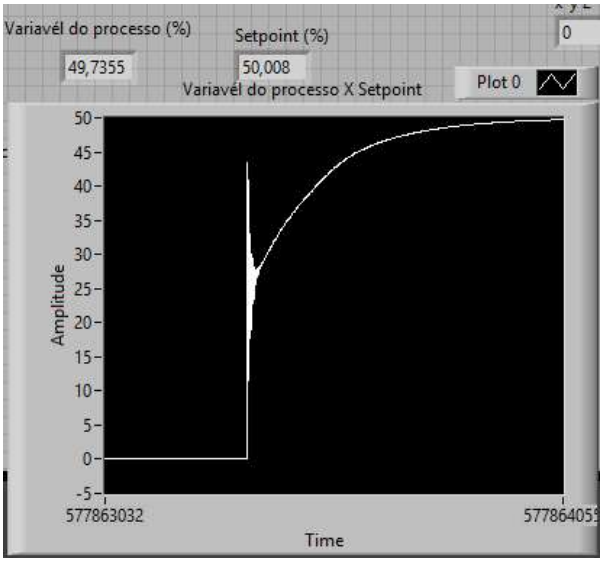
Rotação	Vazão de gasolina necessária (L/min)	Energia proporcional Hidrogênio X gasolina (L/min)	Porcentagem de economia (%)
1319RPM	0,00824375	0,00675	81

Fonte: Autor

Controle PID implementado

O controle PID utilizado proporcionou ao sistema de controle a variação e estabilização da vazão de gasolina em função do *setpoint* demonstrado no item 2.5 onde a vazão de gasolina é subtraída do pela equivalência de energia fornecida pela vazão de hidrogênio. Em modelo de teste, considerando que o atuador varie a aceleração em uma escala de 0º a 180º e que cada grau corresponda a vazão de 4,8% de gasolina é possível obter a curva característica do PID de controle de vazão de gasolina com sua aproximação ao *setpoint* (Figura 19).

Figura 19. Curva característica do PID implementado



Fonte: Autor

Conclusão

Considerando que motores movidos a combustão interna necessitam de um controle de vazão preciso e eficiente, não só pelas características e condições de funcionamento como também para a redução de consumo excessivo de combustíveis bem como a diminuição dos gases prejudiciais para a atmosfera terrestre, a utilização de controles PID aplicados a vazão de combustíveis tende a sanar essa necessidade.

A inserção de células de hidrogênio em motores de automóveis para auxílio na redução de consumo de combustíveis é um método que apresenta resultados satisfatórios para essa função, mesmo sendo aplicadas em processos originalmente não preparados para receber o hidrogênio como combustível. Com esses fatores é possível concluir que um controle PID aplicado ao objetivo de controlar a vazão de combustível de um motor em função da vazão de hidrogênio pode aumentar a precisão de injeção adequada ao sistema, as conclusões descritas podem ser embasadas na precisão e confiabilidade proporcionada por controles de malha fechada onde o erro (relação entre a saída do processo e o *SETPOINT*) é tratado continuamente tendendo a zero. A utilização do *LabiVIEW* para programação de teste mostra-se adequada visto que o software apresenta ferramentas de controle e automação que suprem a necessidade.

Com a pesquisa realizada é possível observar que o controle e a automação empregados na otimização ou adaptação de sistemas de injeção de veículos originalmente não preparados para receber determinadas variáveis é um meio viável e que pode gerar melhorias como no caso, a redução do consumo de combustível original do veículo. Outro ângulo de estudos e de análise quanto ao uso de tecnologias envolvendo células geradoras de hidrogênio é a área do consumo de energia, o estudo do consumo de energia utilizada por uma célula de hidrogênio pode auxiliar nas conclusões de viabilidade em uma visão diretamente ligada ao consumo de energia versus a inserção de energia no sistema alimentado (ex: gasolina economizada versus energia elétrica utilizada).

Como trabalhos futuros podem ser implementados ao sistema sensores diretos de vazão de hidrogênio e gasolina possibilitando a aproximação de valores reais de variáveis bem como a elaboração de um sistema similar que

possibilite a utilização do controle proposto em sistemas originais de veículos diretamente de fábrica, podendo proporcionar ao consumidor a opção de utilização de células de hidrogênio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

E. Hoffmann Gomes Neto**, "**Evoluir sem Poluir – A Era do Hidrogénio, das Energias Sustentáveis e das Células a Combustível**", BrasilH2 Fuel Cell Energy,** Curitiba**.** 2005.

National instruments, **Usando o toolkit LabVIEW PID Control com o modulo LabVIEW Control Design and Simulation**. Disponível em: http://www.ni.com/tutorial/6931/pt/15/05/2013>. Acesso em: 01/06/2016

NETO, WELLINGTON. **MEDIÇÃO DA VAZÃO DO HIDROGÊNIO PARA UM SISTEMA DE CONTROLE DE VAZÃO DE GASOLINA.** 2016.

OLIVEIRA, Vinicius Marinho - **Célula De Eletrolise, Adaptações Mecanicas Para Automatização Da Injeção De Bicombustiveis E Sensores Aplicado Em Motor A Combustão Ciclo Otto.** 2016

PUGLIESI, Márcio - Manual Completo do Automóvel - **Hemus**. 1998.