

## EDHE – ELETRÔNICA EM DISPOSITIVOS HIDRÁULICOS EMBARCADOS

Francesco Tubiello Neto \*

Me. Jorge Ferreira da Silva Filho \*\*

### RESUMO

O sistema de acionamento eletrônico de dispositivos hidráulicos está diretamente relacionado com conforto e ergonomia em máquinas pesadas. São utilizados onde o ganho de potência, controle, ou conversão da forma de entrada são necessários. O sistema basicamente controla através da leitura de sensores a abertura de válvulas elétricas proporcionais de bombas hidráulicas. O principal foco do trabalho está no desenvolvimento de um método de controle eletrônico da tração e da direção do veículo, substituindo os antigos métodos mecânicos. Outros dispositivos hidráulicos do veículo também serão assistidos pelo módulo com propósito apenas de acionamento. Deslocando o controle de aceleração para frente, um sinal (PWM) do módulo é gerado para cada atuador das bombas hidráulicas liberando o fluxo de óleo para os motores hidráulicos. Desta forma inicia-se a rotação dos motores e as esteiras de tração começam a rodar. Instalados nos motores hidráulicos encontram-se dois sensores de pulsos que detectam a rotação e informam ao módulo de controle o movimento das esteiras metálicas. Deslocando o controle de aceleração para trás o circuito inverte a polaridade dos pulsos do módulo fazendo agora um movimento contrário do veículo. A direção do veículo está acoplada a um potenciômetro, que quando gira, modifica a velocidade das esteiras e a direção do veículo. Sinais analógicos e digitais são enviados de diversos dispositivos a um micro controlador para serem tratados e usados nos programas que realizam as funções do equipamento. Um software de configuração em linguagem Visual Basic poderá ser usado para ajustar as variáveis de referência de cada dispositivo.

**Palavras chave:** Controle da tração. Motores hidráulicos. PWM.

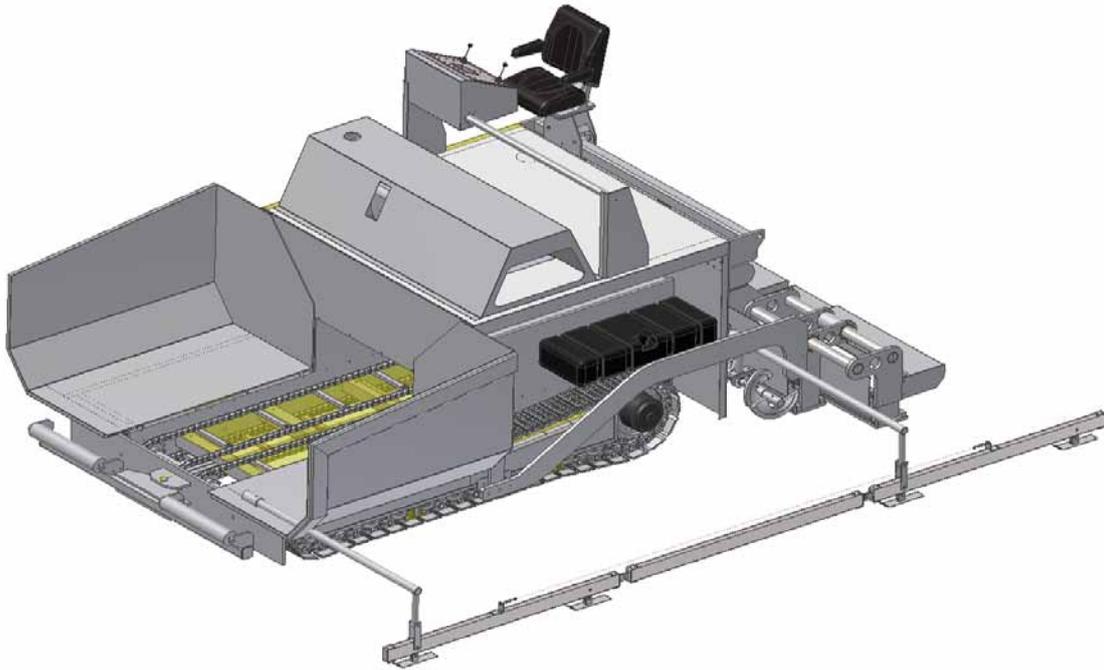
---

\* Acadêmico da Faculdade de Engenharia Elétrica da PUCRS. E-mail: franco@ticel.com.br

\*\* Professor da Faculdade de Engenharia Elétrica da PUCRS. E-mail: jorgef@puccrs.br

## 1 INTRODUÇÃO

A elaboração de um projeto de controle para qualquer tipo de equipamento envolve primeiramente um estudo dos sistemas envolvidos, sejam mecânicos, eletrônicos, químicos, etc. Sistemas controlados fazem parte do dia a dia. Muitas aplicações estão presentes nas coisas que se faz mesmo sem perceber-se. A figura abaixo mostra o desenho de uma Vibro Acabadora Hidrostática que é o foco do desenvolvimento deste projeto.



**Figura 1 Vibro Acabadora Hidrostática**

### - SISTEMAS CONTROLADOS

Um sistema de controle consiste em processos e subsistemas construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com desempenho esperado, a partir de uma entrada fornecida.

Utilizando sistemas controlados, podemos movimentar grandes equipamentos com precisão, que de outra forma seria impossível. Neste caso tem-se a tarefa de movimentar uma máquina de mais de 10 toneladas e permitir que o operador da máquina possa dirigir com suavidade e conforto.

### - O MICROPROCESSADOR

Em sistemas de controle modernos, o uso do microprocessador torna-se quase indispensável. Na aplicação que se está construindo, usar-se-á um microprocessador da

Freescale e alguns periféricos de forma a realizar as tarefas de controle necessárias e com precisão. A vantagem de usar sistemas controlados por microprocessadores é que se podem realizar muitas tarefas do processo quase que simultaneamente ocupando um pequeno espaço físico do produto final. Além disso, quaisquer ajustes de parâmetros necessários para fornecer as respostas desejadas, são simples de serem implantados, bastando modificações dos programas e das variáveis da entrada e saída do módulo de controle.

#### - O CONTROLE

Sistemas de controle de posição traduzem os comandos de entrada, controle de aceleração (joystick) e controle de direção (volante como de um automóvel), em uma resposta de saída que são bombas hidráulicas controladas com válvulas elétricas proporcionais.

Este tipo de máquina onde é necessário muita força e torque, normalmente a transmissão da potência é feita através de um sistema hidráulico.

O objetivo do produto é produzir sinais eletrônicos de controle para as válvulas de acionamento das bombas hidráulicas as quais estão conectadas por tubos com óleo hidráulico nos motores hidráulicos, esquerdo e direito. Portanto a potência gerada pelo motor Diesel e entregue as bombas hidráulicas, será transmitida ao eixo dos motores hidráulicos de forma controlada, permitindo obter as velocidades desejadas nas esteiras rolantes e realizar as manobras com precisão e segurança [12].

As respostas aos estímulos são um estudo importante que se deve realizar neste equipamento. Uma resposta lenta faria o operador realizar varias correções antes de ajustar a direção na posição desejada. O inverso disto, uma resposta rápida demais poderia danificar os motores e bombas hidráulicas, e a sensação do operador seria “trancos” e imprecisão de direção da máquina, ou seja, o sistema posiciona bruscamente os movimentos causando desconforto ao operador. As respostas a transiente contribuem para identificar o tempo necessário para cada movimento que se quer realizar.

Outra tarefa é a identificação da resposta em regime estacionário, isto é a resposta que o sistema atinge após o período transitório. Por exemplo, o que fazer quando o movimento se aproxima da posição desejada.

#### - CONSIDERAÇÕES

Os principais objetivos do projeto já foram descritos. Entretanto, considerações importantes devem ser observadas. Por exemplo, os fatores que afetam a escolha dos

componentes da máquina como os motores hidráulicos às bombas de óleo, os sensores, e por fim os componentes do próprio controlador eletrônico que é o objetivo deste projeto.

Outra consideração importante é o aspecto financeiro. O projetista somente fará um projeto de vanguarda se for economicamente viável. Os orçamentos devem orientar o engenheiro a criar projetos eficientes e de baixo custo, sem comprometer a qualidade do produto, garantindo o sucesso do investimento.

Os parâmetros considerados durante o projeto para transientes, para erros em regime e estabilidade podem alterar-se com o tempo, tornando o produto incompatível com a proposta inicial. Normalmente há variações de parâmetros que podem levar o sistema a ter reações adversas a aquelas que se deseja. Assim o engenheiro deve ter a preocupação de criar um projeto robusto o suficiente para não sofrer com as variações dos parâmetros.

## **2. METODOLOGIA**

A metodologia utilizada nesse projeto foi o estudo dos diversos dispositivos e sistemas neste tipo de equipamento até a construção final do módulo de controle. O desenvolvimento teve início com a pesquisa bibliográfica sobre as partes do conjunto da máquina, de modo a sistematizar as informações e criar as interfaces com o micro-controlador.

Etapas realizadas:

- Busca e seleção das informações;
- Montagem da experiência;
- Avaliação crítica dos resultados;
- Conclusão apartir dos resultados encontrados.

### **2.1 Estudo Teórico**

Uma importante consideração na coleta das informações de um projeto desta natureza é ter muito bem definido o objetivo do projeto, os questionamentos das respostas do sistema e a atuação do dispositivo no equipamento como um todo.

Nesta etapa, inicia-se a análise das informações das diversas partes do sistema.

- Bombas Hidráulicas (Válvulas Proporcionais)
- Motores Hidráulicos (Sensores de Rotação)
- Acelerador e Direção Eletrônica (Joystick)
- Digitalização e Amostragem

- Controle Realimentado
- Acionamento de Sistemas Auxiliares

### 2.1.1 Bombas Hidráulicas (Válvulas Proporcionais)

O estudo deste dispositivo é parte importante do sistema. A bomba hidráulica [1] é responsável pela geração do torque da tração. Este dispositivo é controlado por corrente elétrica através da abertura de válvulas proporcionais. A modulação (PWM) permite o controle da potência nas válvulas solenóides com maior precisão. O sinal de saída em PWM realiza trabalho e empurra o pino interno do solenóide que aumenta a pressão nos pistões dos servos.

A pressão diferencial através dos pistões de servo move o prato de controle liberando o fluido hidráulico na proporção desejada. Este sistema possui uma realimentação de óleo hidráulico e uma mola linear de retorno as quais são responsáveis pela posição do prato e pela exatidão da liberação do fluido hidráulico. O controle atinge o equilíbrio quando a posição do prato estiver precisamente balanceada com a entrada de comando do operador (solenóide / percentual da potência). No EDC (Electrical Displacement Control)[1], ainda incorpora o sistema de posição de neutro. Durante a operação, a perda do sinal de corrente no solenóide ou a perda de carga do sistema, fará o retorno do prato para a posição de neutro. Uma vez que a posição do neutro for atingida a corrente de controle dos solenóides deverá estar em flutuação. Isto minimiza a imprecisão do EDC no controle da faixa do neutro.

O sistema é um dispositivo de controle de fluxo de óleo hidráulico. A posição da entrada de comando do prato da bomba é sempre proporcional a entrada de controle.

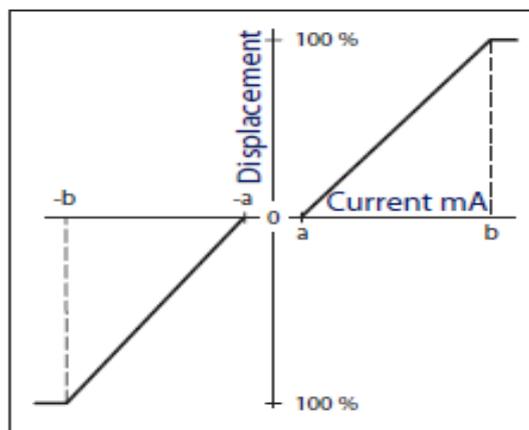


Figura 1 Curva do funcionamento dos atuadores

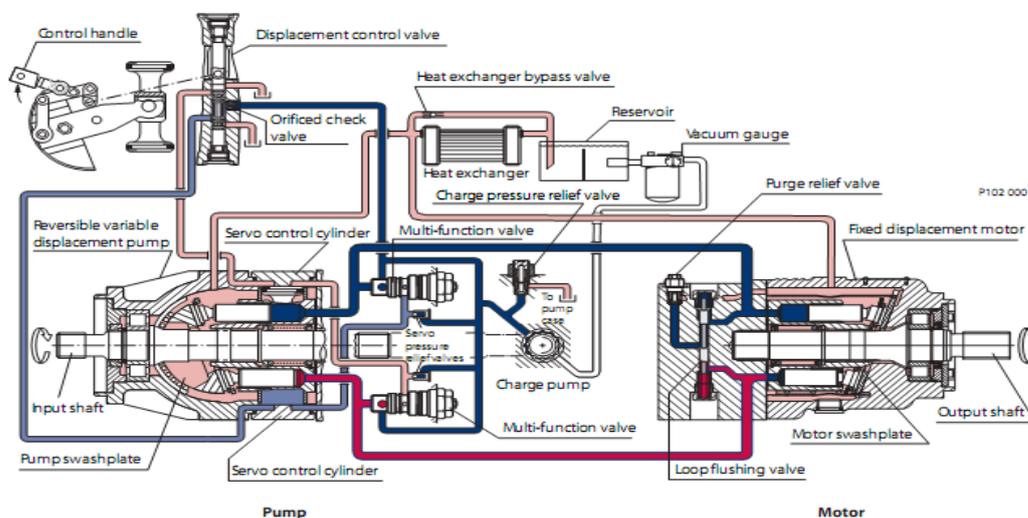
A tabela a seguir mostra as especificações elétricas do sistema de acionamento da bomba. O fabricante recomenda que a frequência do PWM não ultrapasse os 200 Hz, isto poderia causar uma perda significativa no controle do sistema.

<b>Voltage</b>	<b>12 V</b>	<b>24 V</b>
<b>Threshold current (-a, a)</b>	700 mA	350 mA
<b>End current (-b, b)</b>	1650 mA	820 mA
<b>Maximum current</b>	1800 mA	920 mA
<b>Rated power</b>	18 W	18 W
<b>Coil resistance at 20°C [70°F]</b>	3.66 Ω	14.20 Ω
<b>Coil resistance at 80°C [176°F]</b>	4.52 Ω	17.52 Ω
<b>PWM frequency range</b>	70 to 200 Hz	70 to 200 Hz
<b>Recommended PWM frequency (see note below)</b>	100 Hz	100 Hz
<b>Inductance</b>	33 mH	140 mH

**Tabela 1 – Especificações elétricas.**

## 2.1.2 Motores Hidráulicos e Sensores de Rotação

A ligação destes dispositivos é feita através de tubos e mangueiras que transportam o fluido hidráulico da bomba para o motor [2]. Na figura 2 abaixo tem um exemplo de um sistema com uma bomba hidráulica, as conexões com o motor e dispositivos, refrigeração do fluido, acionamentos e válvulas de alívio.



**Figura 2 Exemplo da ligação motor com bomba hidráulica**

O acionamento da troca da velocidade é feito através de uma válvula solenóide eletricamente comandada. Existe um orifício de calibração no circuito que permite suavizar as acelerações e desacelerações. Este tipo de motor é normalmente configurado para instalações onde existe a necessidade de ser compacto, como por exemplo, diretamente na roda do equipamento desta natureza.

Um sensor de rotação do motor hidráulico na figura a seguir está instalado e será usado para realimentação do controle eletrônico da direção.

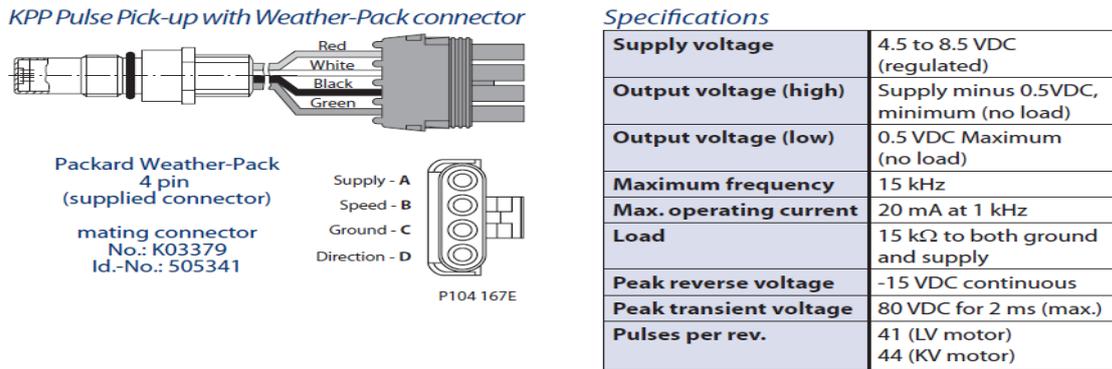


Figura 4 Sensor de rotação do motor hidráulico

### 2.1.3 Posição do Neutro e Segurança

Uma importante observação é a segurança em caso de falha do sistema. Uma chave de posição foi instalada no comando do acelerador para garantir a parada das esteiras metálicas.

Cada vez que o operador posiciona o comando do acelerador no centro, a chave de posição é acionada interrompendo a alimentação dos circuitos de potência de saída PWM.

Desta forma, uma falha de hardware ou até mesmo de software, com o comando do acelerador na posição de neutro não haverá sinal na saída de potência.

### 2.1.4 Acelerador e Controle da Tração

A proposta do sistema é controlar as rotações dos motores hidráulicos em função de parâmetros fornecidos da posição dos controles do acelerador e da direção, e de uma realimentação originada por sensores de rotação instalados nos motores hidráulicos.

O operador deslocando o controle do acelerador informa ao sistema que se deve movimentar o equipamento a uma determinada velocidade. O sistema calcula através da posição do acelerador a quantidade de potência da saída para as válvulas proporcionais EDC.

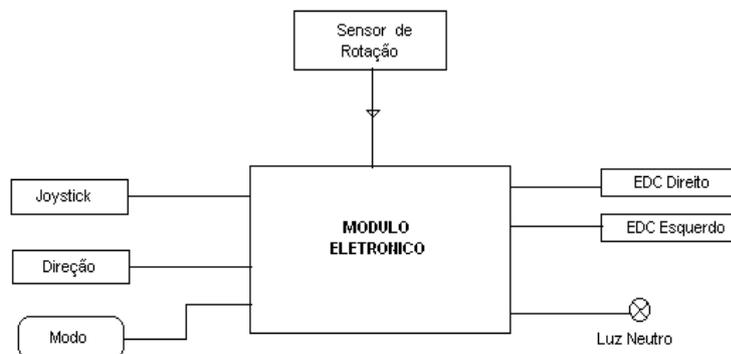
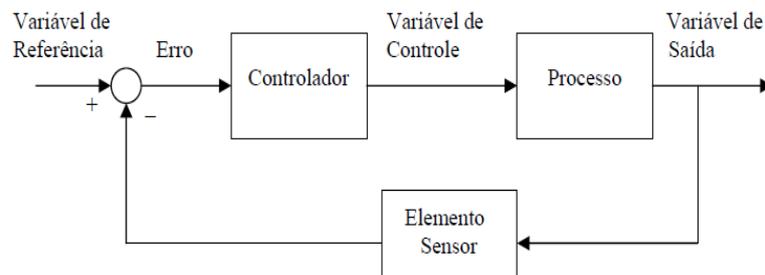


Figura 5 Diagrama de Blocos do Sistema

Inicialmente a corrente de saída gerada nas válvulas proporcionais é calculada por meio de parâmetros iniciais fornecidos em uma configuração preliminar. Tão logo do início do movimento, os sensores de rotações das esteiras enviam ao sistema de controle os sinais de pulso indicando movimento da máquina.

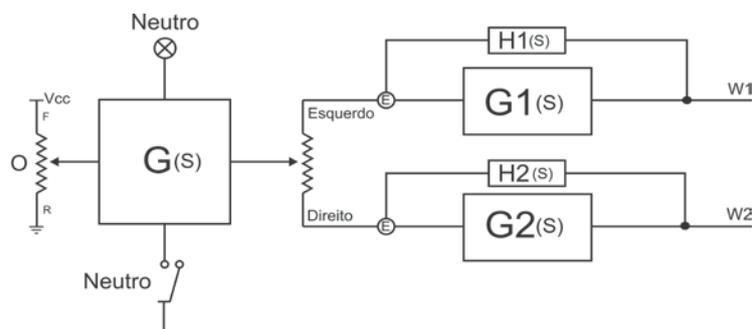
A medição do tempo de cada pulso é feita por interrupção interna do micro controlador calculando a taxa da quantidade de pulsos por segundo dos sensores de rotação.

Desta forma pode-se calcular a velocidade de cada esteira rolante já que as reduções do equipamento são valores constantes e conhecidos.



**Figura 6 Diagrama exemplo do Sistema Realimentado**

No diagrama acima a variável de referência é o acelerador e estabelece uma condição inicial para o controlador. São produzidos dois sinais idênticos que serão destinados ao acionamento das rodas. Os sensores de pulso enviam a rotação dos motores hidráulicos ao controlador para cálculo dos erros.



**Figura 7 Diagrama de Blocos da Controle da Direção**

A direção do veículo é calculada a partir da diferença de rotação entre as esteiras rolantes. Para fazer curvas, sempre diminui-se a rotação da esteira para o lado que se quer girar. Desta forma quando o sistema atingir a rotação máxima e por consequência a velocidade máxima ainda será possível realizar movimentos de direção. A dirigibilidade e conforto para o operador no acerto de posição do equipamento foi um dos itens da proposta,

portanto algumas funções especiais no software tornam suaves os movimentos no volante em função do raio da curva a realizar.

### 2.1.5 Digitalização e Amostragem

Nas entradas do equipamento foi necessário a conversão do sinal contínuo no tempo (Sinal Analógico) para um sinal digital. O processo de conversão destes sinais é chamado de conversão analógico-digital (A/D).

Um conversor A/D transforma um sinal analógico em uma seqüência de impulsos. Desta forma para cada valor no tempo se tem um vetor de tamanho determinado para representar o sinal lido. A saída de um conversor A/D é um fluxo de Bits que corresponde a uma seqüência em tempo discreto  $x(n)$ , e para cada valor de  $n$ , existe uma amplitude determinada. O intervalo de amostragem  $T$  determina a qualidade do sinal amostrado em relação ao sinal analógico original (Taxa de Amostragem). Quanto mais amostras por segundo do sinal mais fiel ao sinal analógico. O número de bits do conversor refina a quantização da amplitude do sinal. Portanto quanto mais bits maior será a precisão da amplitude do sinal.

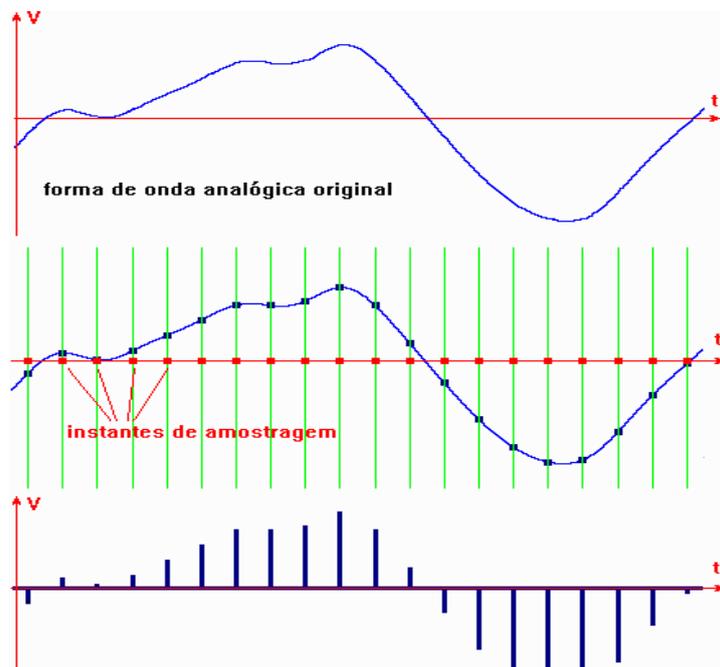
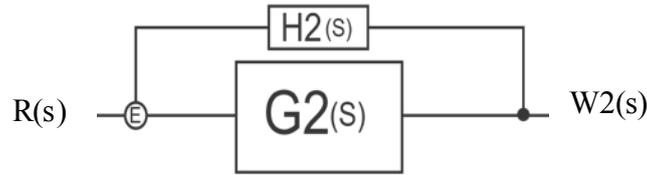


Figura 8 Amostragem de um sinal analógico

### 2.1.6 Controle de Saída Realimentado

Geralmente sistemas de controle realimentados em um projeto prático [11], as variáveis não são muito amigáveis e a realimentação não é unitária. A estabilidade e o conhecimento das variáveis de ganho são essenciais para um bom desempenho do sistema.

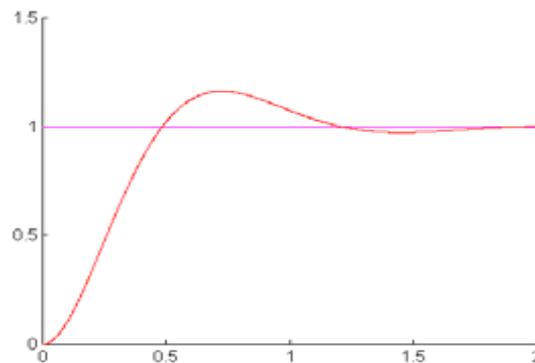


**Figura 9 Diagrama de sistema realimentado**

Um das técnicas utilizadas para o diagrama de blocos acima em malha fechada é o método de Nyquist. Sendo  $G2(s)$  a função de transferência do ramo direto e  $H2(s)$  a função de transferência da realimentação, a função de transferência em malha fechada será dada por:

$$T(s) = \frac{W2(s)}{R(s)} = \left( \frac{G2(s)}{1 + G2(s) * H2(s)} \right)$$

A estabilidade depende da localização das raízes. Se as raízes estiverem no lado esquerdo do plano S o sistema será estável. Na figura abaixo observamos um sinal de referência tipo degrau de amplitude unitária e uma curva de um sistema sub amortecido.



**Figura 10 Sistema sub amortecido**

Neste caso a idéia é fazer que o sistema responda de forma lenta levando o erro sempre com tendência ao zero e minimizando a resposta de sobre sinal como mostrado na figura acima que teria um efeito indesejado no sistema causando desconforto para o operador.

Na grande maioria das vezes um simples controle proporcional resolve o problema do atuador. No projeto usar-se-á inicialmente o controle proporcional isolado.

$$P(n) = k(ref(n-1) - y(n-1)) = k(e(n-1))$$

A equação acima mostra a resposta do sistema da forma proporcional simples. Quanto maior for o ganho K menor o erro em regime, melhora a precisão em malha fechada, porém o sistema pode tornar-se oscilatório e até instável.

## 2.1.7 Acionamentos de Sistemas Auxiliares

Para a configuração que está sendo desenvolvida neste sistema, alguns dispositivos hidráulicos auxiliares precisarão ser controlados. Aproveitaram-se algumas portas do microprocessador e programaram-se alguns acionamentos que necessitam de controle quando a máquina estiver em movimento ou não.

## 2.2 O MICROCONTROLADOR MC68HC908MR32CFU

O microcontrolador escolhido da família 908MR da Freescale[3], tem uma característica particular para este tipo de projeto: portas especiais para acionamento de dispositivos com PWM. O uso deste modelo “MC68HC908MR32CFU” no projeto é por possuir diversos dispositivos periféricos em uma única pastilha como conversores AD de 10 Bits, PWM, portas seriais, etc.. Algumas das características do “MC68HC908MR32CFU”:

- 32kbytes memória programável (FLASH), 768 Bytes RAM
- 8 MHz Frequência do Barramento interno
- 6 Canais PWM de 12 Bits, 6 canais de 16 Bits Timer (TIM)
- Interface serial SPI e SCI
- 10 canais de 10 Bits ADC

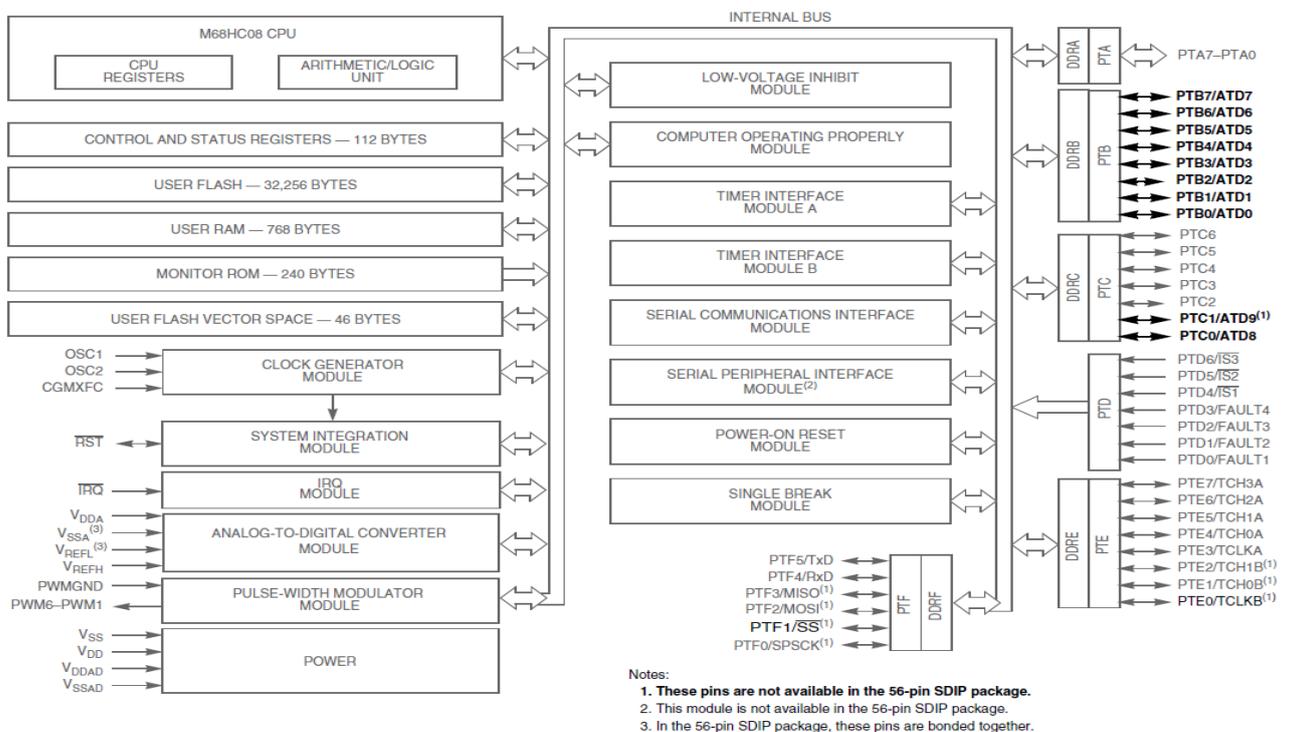


Figura 11 Diagrama de blocos MC68HC908MR32CFU

### 2.2.1 Configuração do Mc68hc908mr32cfu

O relógio do sistema foi configurado com o uso de um cristal oscilador na frequência de 9.830400MHz. Com PLL interno da base tempo, é possível iniciar o módulo gerador de clock a uma frequência do barramento próxima do máximo de 8MHz. A Programação do PLL é feita como segue:

- Escolher a frequência do BUS desejado;  
Escolher uma frequência tal que seja múltipla para o módulo de comunicação serial.  
Escolheu-se para o bus: 7.378400 MHz. (fBUSDES)
- Calcular a frequência do VCO desejada “fvCLKDES”  
 $f_{VCLKDES} = 4 \times f_{BUSDES}$   
 $f_{VCLKDES} = 4 \times 7.378400 \text{ MHz} = 29.513600 \text{ MHz}$
- Calcular a frequência do VCO(N), usando a frequência de referência, fRCLK  
 $VCO(N) (f_{VCLK} = N \times f_{RCLK})$   
 $29.513600 \text{ MHz} = N \times 9.830400 \text{ MHz} \quad N=3$
- Usando o valor de frequências de 9.830400MHz da referência do cristal, agora calcular a faixa linear do VCO (L). O “L” controla a faixa de frequência do PLL.
- Calcular a faixa central para o VCO, fVRS. A frequência central desta faixa está entre o mínimo e o máximo do PLL

$$f_{VRS} = 3 \times 9.830400 \text{ MHz} = 29.513600 \text{ MHz}$$

Desta forma foi possível programar o sistema de gerador de base de tempo do micro controlador e fazer 1 ciclo de máquina a 135.5ns. Outras configurações importantes foram feitas, como a do conversor analógico digital, o timer interno (importantes na medição do tempo dos pulsos dos tacômetros) e o módulo gerador do PWM.

### 2.2.2 O Compilador ICC

A programação deste sistema foi desenvolvida toda em linguagem “C” usando o compilador ICC08 [9]. A ImageCraft produz compiladores “C” desde 1994 para diversos microcontroladores com boa qualidade e baixo custo.

A versão usada no desenvolvimento deste projeto foi uma versão de demonstração para o HC08 que permitiu compilar códigos em C até 64Kbyte suficiente para o projeto.

### 3. O CIRCUITO

O objetivo do circuito é gerar sinais de PWM de tal forma a controlar a velocidade das esteiras metálicas do truck e proporcionar dirigibilidade da máquina. Nas saídas de potência do PWM encontra-se um conjunto de transistores MOSFET IRFZ34 [7] ligados de forma a permitir que o sinal possa chegar às bobinas de controle com inversão de polaridade.

Entre o microcontrolador e o conjunto MOSFET de potência existe um selecionador construído com um circuito integrado 74HC125 [6] o qual envia sinal de PWM para frente ou para trás para as bobinas dos EDC's. O circuito abaixo mostra a etapa de saída de potência dos sinais PWM.

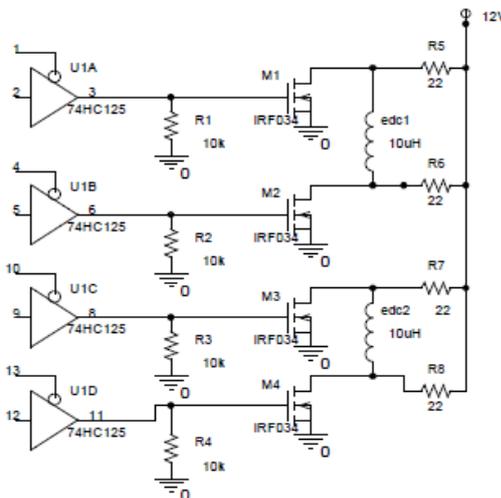
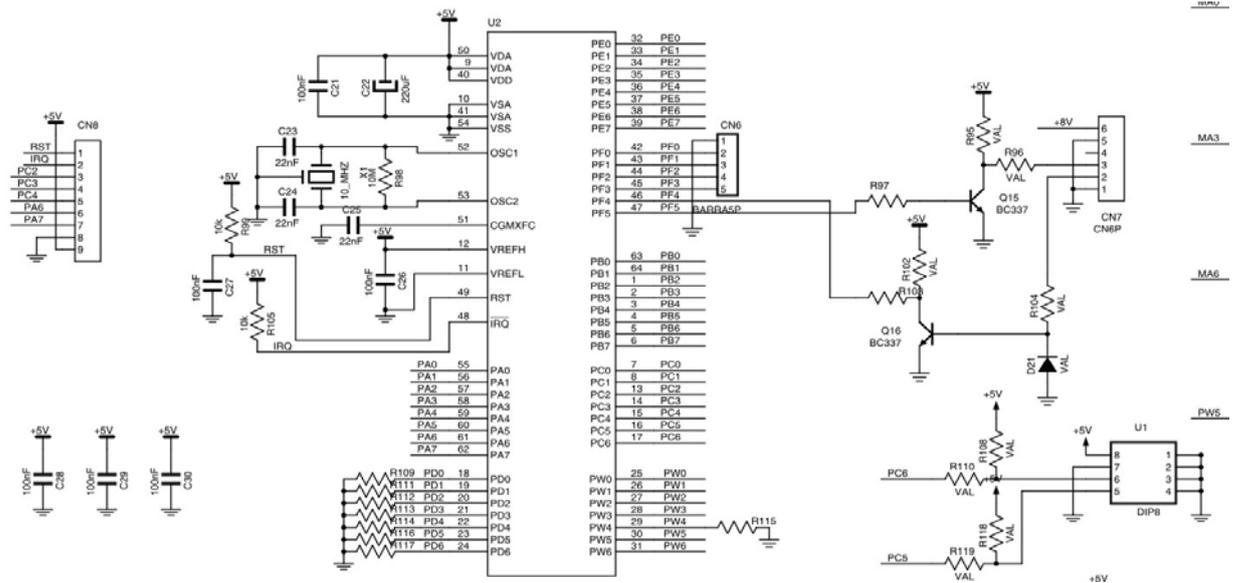


Figura 12 Circuito de saída de potência

Uma importante etapa do projeto certamente é a escolha do microprocessador [5]. O microprocessador 68HC908MR32CFU, escolhido, possui as saídas de PWM configuradas nativas no núcleo. Esta função facilita a elaboração das instruções de código para o produto. Além disso, as entradas analógicas com 10 bits ajudam a obter maior precisão no posicionamento dos controles de aceleração e de direção.

Este projeto trabalha com um cristal de referência na frequência em 9.8304MHz produzindo estabilidade e boa velocidade de processamento para a aplicação. O circuito integrado 24C02 EEPROM[8] é a memória de calibração do módulo onde serão armazenadas as constantes iniciais do sistema. A interface desta memória com o microprocessador é através de um canal de IIC feito por uma função programada em código C para geração dos sinais do protocolo de comunicação.

Os transistores Q15 e Q16 regulam os níveis de sinais da interface de comunicação serial entre o microprocessador do módulo e um notebook por exemplo.

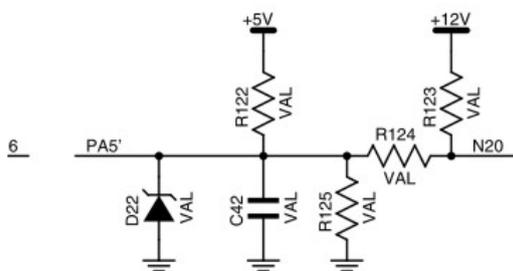


**Figura 13 Circuito do Microcontrolador**

Os capacitores C28, C29, C30 de 100nf fazem o desacoplamento do microprocessador e garantem o funcionamento do circuito evitando travamento indesejado do processamento por ruído na alimentação.

Na placa principal, tem duas fontes de 5 volts independentes, uma para os circuitos do módulo e a outra para os periféricos externos ao módulo (sensores, controle de aceleração e controle da direção). Um detalhe importante são as entradas digitais e analógicas as quais tem um circuito de proteção contra descargas elétricas. Um diodo zener de 5,1 volts colocado diretamente na porta do microprocessador somado a um filtro passa-baixas e um atenuador de entrada. Este circuito limita a tensão em 5 volts nas entradas do microprocessador.

No caso de uma entrada analógica, a composição do atenuador é calculada para não prejudicar o nível do sinal de entrada. O mesmo acontece nas entradas de pulso dos sensores de rotação dos motores, o capacitor calculado para filtro não atenua o sinal nas frequências de operação do equipamento.



$$V_{OUT} = \frac{1}{1 + (R124 * j\omega C) + \frac{R124}{R125} + \frac{R124}{R122}} * V_{IN}$$

**Figura 14 Circuito das Entradas**

No gráfico podemos observar um típico filtro de -20db por década o qual foi projetado em todas as entradas, podendo ser configurado de muitas formas, em frequência de corte e em amplitude para atender a necessidade dos periféricos no projeto.

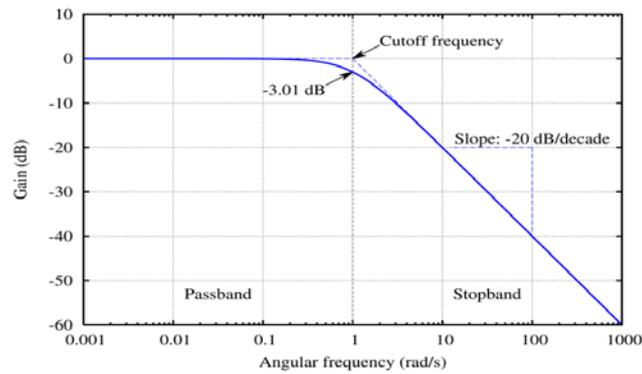


Figura 15 Filtro da entrada de sinal do Módulo

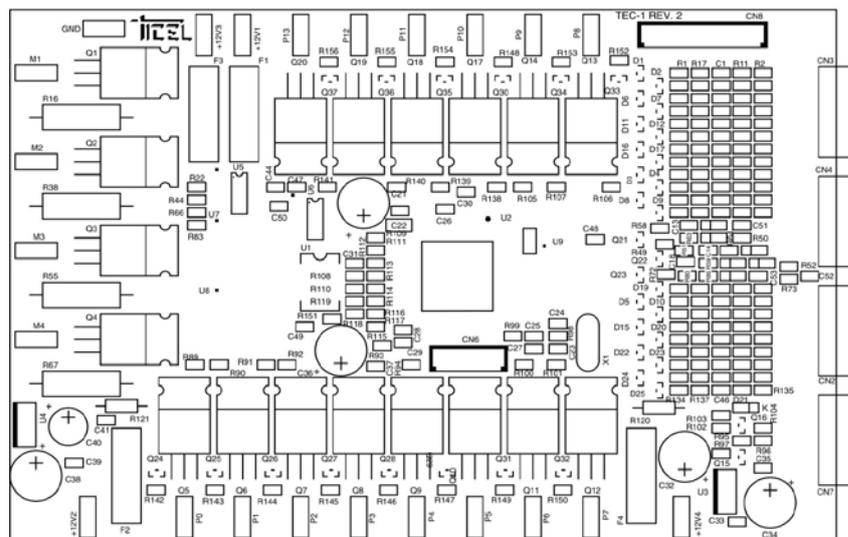
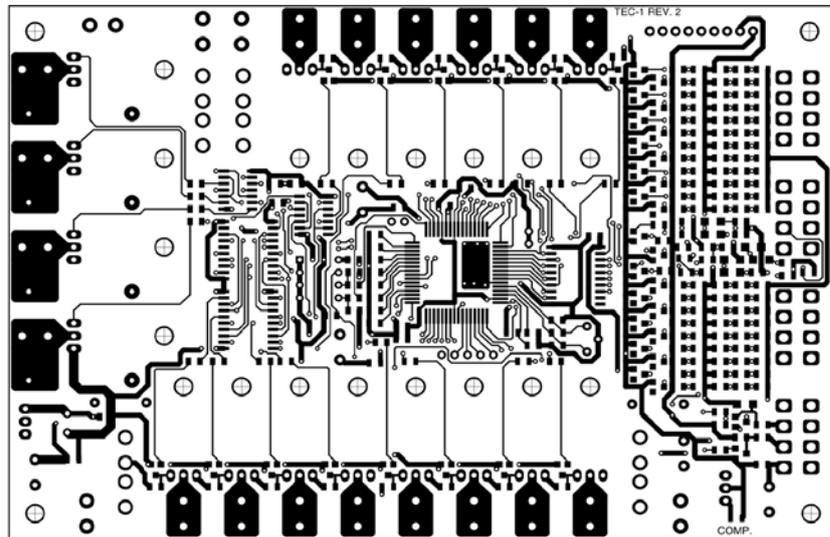
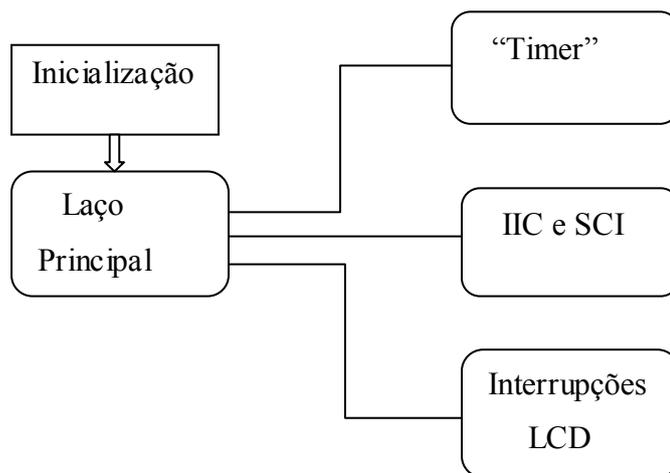


Figura 16 Circuito impresso

### 3.1 O Programa



**Figura 17 Fluxograma básico do sistema**

Após a inicialização de cada módulo do sistema, um laço principal de programa executa todas as funções necessárias para funcionamento da máquina. Subprogramas auxiliares são solicitados no laço principal para fim de medição e cálculo das funcionalidades do sistema. Como exemplo: para saber a velocidade de uma das esteiras metálicas, é preciso saber a taxa de variação de pulso e, portanto usa-se uma função programada em um dos TIMERS para medir o intervalo de tempo entre um pulso e outro, e então realizar o cálculo desejado. Da mesma forma para ler a chave de neutro e assim por diante. A comunicação serial com o PC foi programada para 4800bps, uma boa resposta em velocidade para um programa monitor. Para cada dispositivo do sistema foi projetado um ajuste de ganho e de offset. Desta forma é possível adaptar ao módulo para uso com diversos periféricos com parâmetros diferentes.

### 3.2 O Software de Configuração

Para a configuração dos parâmetros iniciais do sistema foi necessário o desenvolvimento de um Software em um PC com uma interface amigável com o técnico da instalação do módulo na Vibro Acabadora. O programa Monitor foi desenvolvido em linguagem Visual Basic da Microsoft [10] e serve para modificar a calibração de todos os parâmetros do sistema. Algumas facilidades gráficas como medidores de rotação, voltímetros e luzes de indicação foram desenhados na tela do programa monitor para facilitar ao técnico a visualização dos resultados do equipamento.

Na figura a seguir apresenta-se a tela principal do software de configuração do programa monitor com as diversas variáveis de referência da configuração do sistema bem como alguns medidores para auxiliar o técnico na calibração.

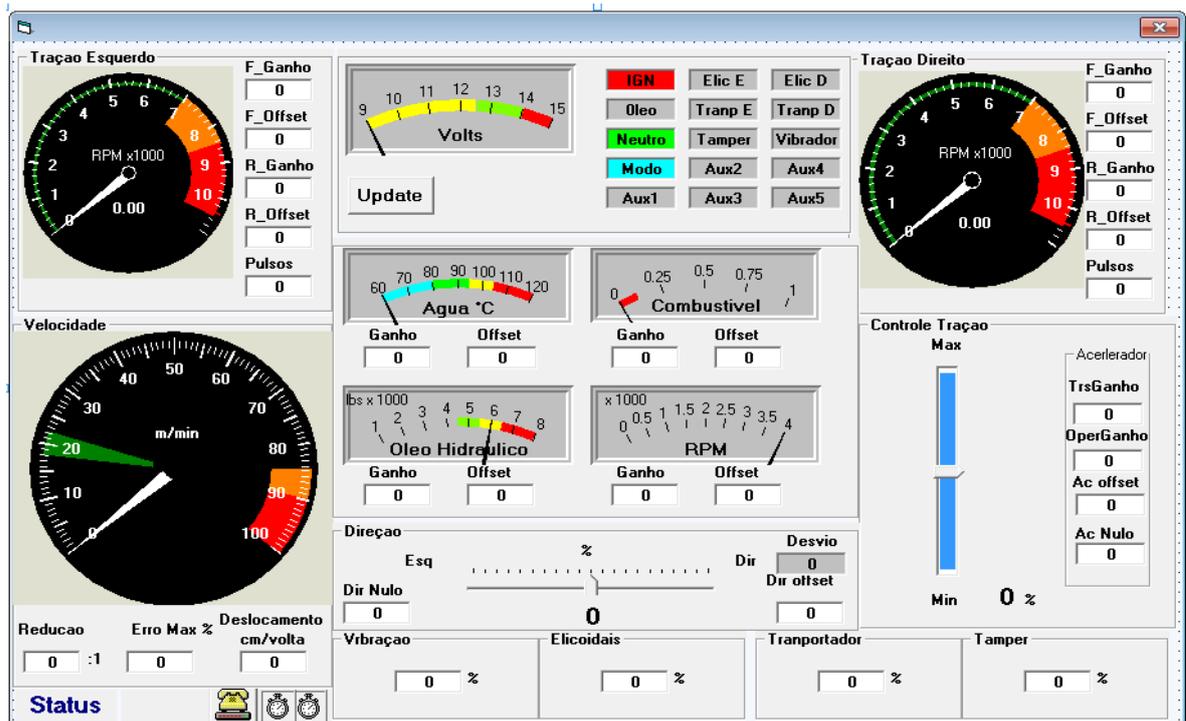


Figura 18 Painel do Monitor

### 3. RESULTADOS

O primeiro problema enfrentado foi na saída de potência. A idéia inicial seria manter a mesma configuração que o fabricante do EDC usou para os controles analógicos. Quando aumentado o percentual na saída de potência (PWM) a tensão medidas nas válvulas proporcionais do EDC diminuía em 30%, configurando assim uma perda de potência e em conseqüência a não linearidade do sistema. A forma encontrada para melhorar o desempenho foi uma alteração no circuito de saída para um circuito tipo ponte H. Ponte H é um circuito que permite variar a potência, assim como comutar o sentido da polaridade do sinal PWM.

Com alguns cortes e fios na placa foi possível adaptar o circuito para ponte H e o resultado foi satisfatório. A 100% do sinal PWM a tensão cai 5%. Um detalhe, a tensão sobre os EDC passou a ser de 12 volts ao invés de 6 volts como no circuito original.

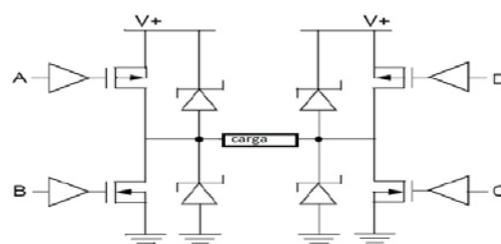


Figura 19 Circuito de saída de potência tipo H

Com o novo circuito de potência alguns cuidados extras precisaram ser providenciados. Na gravação do programa no microcontrolador não se podia garantir as saídas das portas em zero volt e com isto os MOSFET de potência terminavam danificados. Foi necessário desligar as alimentações dos transistores de potência para poder gravar o módulo com segurança.

Na bancada do laboratório, aplicou-se às entradas de pulso um gerador de onda quadrada para teste. O resultado foi além do esperado. Foi possível medir frequências de até 8 kHz sem degradação da medida em ambos os canais simultâneos, e com a comunicação serial sendo utilizada a 4800bps interrompendo o processamento a cada 5ms. Nas frequências abaixo de 20 Hz o sistema perdia a medida. Foi modificada a função de interrupção para poder suportar longos períodos [4] para medição em baixas frequências e então mediu-se 5 Hz com facilidade.

Montado o módulo na Vibro Acabadora e ajustado as constates iniciais como o ganho da tração foi verificado variações aleatórias nas velocidades das esteiras metálicas. Inicialmente uma revisão cautelosa no software e não se encontrou erros. Viu-se então que quando o ENABLE da porta circuito integrado 74HC125 subia para 5 volts a saída entrava em alta impedância fazendo as entradas dos MOSFET de potência ficarem sem referência. Isso traz resultados inesperados para a saída de potência, e é até perigoso para o equipamento. Foi modificado o circuito e inserido resistores das portas dos MOSFET IRF Z34 para a terra e com isto solucionou o defeito.

O controle da aceleração ficou sensível para o operador, qualquer pequeno movimento a máquina partia com muita potência. Acrescentou-se ao programa um algoritmo para escalonar o controle do acelerador em três etapas de aceleração tornando mais suave o ajuste da potência desejada. O mesmo foi feito no controle da direção para ter precisão nas posições da faixa central do volante.

Na pista de teste com o motor Diesel a 2100 RPM a máquina em velocidade de transporte atingiu 79 m/min e em modo de operação 41 m/min que é considerado satisfatório pelo fabricante do equipamento. O movimento de direção da máquina testado mostrou-se suave causando sensação de conforto ao operador.

A preocupação principal foi com o resultado do sistema realimentado. No projeto inicial do sistema usou-se uma função de controle proporcional simples. Não foram notadas perturbações como falta estabilidade do sistema que poderia resultar em desconforto de operação ou até mesmo impossibilidade de se controlar.

## 4 CONCLUSÕES

Conforme apresentado anteriormente, foi possível criar um sistema de controle para uma máquina movida com esteiras que atendesse as expectativas iniciais, baseadas em geração de PWM para válvulas de acionamento proporcionais por intermédio de um microcontrolador, reduzindo os custos de peças de controle hidráulicas do equipamento. Os resultados obtidos até aqui promovem o sucesso do projeto e revelam um potencial de crescimento do produto não imaginado quando começou o projeto. O microcontrolador mostrou-se totalmente eficaz na tarefa de controle, principalmente pela praticidade em controlar muitos dispositivos simultaneamente. A linguagem de programação C utilizada permite cálculos elaborados que facilitam muito no projeto de um sistema complexo.

Os circuitos desenvolvidos para transformar as variações mecânicas dos controles de direção e aceleração, foram de extrema simplicidade, baseados apenas em um divisor resistivo acoplados diretamente nas entradas do microcontrolador.

O circuito de potência utilizado neste projeto demandou uma quantidade de tempo a mais por não estar previsto inicialmente. Este circuito é conhecido como ponte H.

O circuito apresentado como um todo é de baixo custo e de fácil fabricação, e todos os componentes são encontrados no mercado nacional.

Como melhoria futura, existe uma idéia de uso do sistema em rede CAN (Controller Area Network) com troca das informações com outros dispositivos e módulos, os quais poderão compor o sistema embarcado mais complexo. Também um novo circuito de potência mais robusto em sua construção que permita ao fabricante a troca dos programas do microcontrolador de uma forma mais segura.

Outra melhoria que poderia acrescentar maior segurança de direção seria a inclusão de uma realimentação cruzada entre as esteiras metálicas. Desta forma pode se comparar as diferenças entre as rodas e fazer as correções necessárias, até mesmo comparar com um sinal de um giroscópio para correção de pequenos erros de posicionamento provocados pelo tipo de terreno onde o equipamento está sendo utilizado.

Talvez um controle como um PID (Proporcional Integral Derivativo) pudesse acrescentar maior precisão nos atuadores e quem sabe melhorar a dirigibilidade para o usuário.

## 5 REFERÊNCIAS

- [1]Sauer-Danfoss (US) Company, Electrical Displacement Control (EDC) Product Electrical Installation Tech Note Doc PN **11022744** • Rev AC • Sep 2007
- [2]Sauer-Danfoss (US) Company, L and K Frame Variable Motors Technical Information General description Technical Information **520L0627** • Rev BE • April 2008
- [3]Motorola, Inc. (Freescale Semiconductor), MC68HC908MR32 Advanced Information's Ver 5, 2001
- [4]Motorola, Inc. (Freescale Semiconductor), HC08 Timer Interface Module Reference Manual Ver 1.0, 1996
- [5]Freescale Semiconductor, Applications Enabled by High-Performance Hybrid Controllers, Rev. 1, 7/2005
- [6]Texas Instruments Incorporated, CD74HC125 Quad Buffer, Three-State November 1997,
- [7]International Rectifier Inc, IRFZ34 Power Mosfet,– SmartRectifier Control IC Datasheet pag1259 a 1264 Rev PD-9.509B
- [8]Atmel Corporation, AT24C02 Two-wire Serial EEPROM Advanced Information's <http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc0180.pdf>, Acessado em 07/06/2010
- [9] Imagecraft Inc & ImageCraft Creations Inc, ICC08 Ver: 6.0 demo version C compiler for HC908 [http://www.imagecraft.com/devtools\\_FreescaleOther.html](http://www.imagecraft.com/devtools_FreescaleOther.html), Acessado em 6/4/2010
- [10]Visual Basic: Guia de Ferramentas Componentes Versão: 6.0 Microsoft Corp. Inc. 1998  
Guia do Programador Versão: 6.0 Microsoft Corp. Inc. 1998
- [11]Engenharia de Sistemas de Controle, Norman S. Nice Quinta Edição 2009 Cap. 6 e 7
- [12]Ticel Equipamentos Ltda. - Departamento de Engenharia Eletromecânica.