

## **PROJETO E CONTROLE DE UM ROBÔ MÓVEL.**

**Maria Suely Freitas de Oliveira<sup>(1)</sup>**

Tecnólogo em Eletromecânica pela Faculdade de Tecnologia CENTEC (2006) – Limoeiro do Norte. Mestranda em Engenharia de Teleinformática na Universidade Federal do Ceará (UFC).

**José Tarcísio Costa Filho<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Elétrico pela Universidade Federal do Ceará (1985). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1988). Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1992). Professor titular da Universidade Federal do Ceará com experiência na área de Engenharia Elétrica, e com ênfase em Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos. Atuando principalmente nos seguintes temas: Automação, Computação Paralela, Jogos Dinâmicos, Otimização, Decisão Inteligente e Instrumentação e Controle.

**André Luiz Carneiro de Araújo<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Elétrico pela Universidade Federal do Ceará (1997). Especializado em Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos pela Universidade Federal do Ceará (2000), curso-tecnico-profissionalizante pela Escola Técnica Federal do Ceará (1996) e mestrado-profissionalizante em Computação pela Universidade Estadual do Ceará (2003). Professor titular do Centro Federal de Ensino Tecnológico do Ceará com experiência na área de Ciência da Computação, e com ênfase em Redes de Computadores. Atuando principalmente nos seguintes temas: Componentes, Ferramentas CASE, Engenharia de Software, Informática Educativa, Redes de Computadores.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua dos Monarcas, 431 – Planalto do Pici - Fortaleza - CE - CEP: 60510-460 - Brasil - Tel: (85) 3233-4374 - e-mail: [suely\\_02@yahoo.com.br](mailto:suely_02@yahoo.com.br)

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Teleinformática. Campus Universitário do Pici – Pici - Fortaleza - CE - CEP: 60755-640 - Brasil – Caixa Postal: 6007 - Tel.: (85) 3366-9467 - e-mail: [tarcisio@deti.ufc.br](mailto:tarcisio@deti.ufc.br)

**Endereço<sup>(3)</sup>:** Centro Federal de Ensino Tecnológico do Ceará, Itti Instituto de Telemática. Avenida 13 de Maio, 2081 – Benfica - Fortaleza - CE - CEP: 60040-531 - Brasil - Tel.: (85) 3307-3708 - e-mail: [andreluiz@cefetce.br](mailto:andreluiz@cefetce.br)

### **RESUMO**

A maioria das indústrias possui em sua estrutura física robôs que auxiliam no processo de fabricação e execução de tarefas que dificilmente podem ser executadas pelo homem. Mediante estas vantagens, a área da robótica sofreu, e continua sofrendo com o passar dos anos, uma evolução similar à que ocorreu com os computadores, ou seja, os robôs evoluíram de industriais para robôs de serviço (aspiração de pó, entrega de correspondência, etc.), que por sua vez evoluíram para os robôs pessoais. Um requisito comum a todas estas classes de robôs é a capacidade de locomoção, onde em geral, é feita de forma autônoma. Este trabalho apresenta o projeto e etapas realizadas para a construção de uma plataforma móvel autônoma denominada *Labor Móvel*. Este robô foi projetado no intuito de atender os seguintes requisitos: 1) navegar em ambientes desconhecidos com o uso de sensores, a fim de que não haja colisão com os corpos estranhos existentes no ambiente, e 2) conceber um sistema eletrônico de controle digital utilizando o dispositivo DSP (*Digital Signal Processor*). Os estudos realizados na implementação de uma nova tecnologia baseada em DSP para o sistema de navegação de um robô móvel pessoal resultaram não só na melhoria da estrutura física do *Labor Móvel* como também possibilitou uma alta performance no que diz respeito ao controle em tempo real do sistema de navegação, facilitando a programação e proporcionando uma arquitetura eletrônica com excelentes características, tais como confiabilidade, aquisição e tratamento de dados, circuito PWM embutido, respostas rápidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Alta Performance do Sistema de Navegação, Melhoria e Rapidez no Processamento de Dados, Arquitetura Inovadora.

## **INTRODUÇÃO**

A robótica móvel tem sido um tema freqüente tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico. Isto devido à diversidade de problemas ainda não resolvidos relacionados a este tema. Em particular, no meio acadêmico, as questões que envolvem a navegação e o controle dos robôs móveis têm recebido atenção especial. Já no campo industrial, o problema de controle e navegação autônoma de robôs móveis, merece grande atenção em virtude da possibilidade de automação de vários processos industriais, inclusive na realização de tarefas que dificilmente podem ser executadas com êxito pelo ser humano.

O presente trabalho contém estudos realizados na área de robótica móvel para a construção de uma versão inovadora de uma plataforma móvel. Na sua primeira versão, o protótipo desenvolvido visava à navegação em ambientes desconhecidos utilizando uma eletrônica analógica (aquisição de dados e sinais) e um processamento remoto (via microcomputador). Porém, neste trabalho, procurou-se atentar para o estudo e a proposição de um sistema eletrônico de controle digital no intuito de proporcionar mais rapidez e precisão no processamento de dados e sinais do sistema em tempo real. Neste sentido, optamos pelo emprego de um dispositivo com funções integradas e de alta performance para a aquisição e tratamento de dados e para o controle digital. Este dispositivo é o Processador Digital de Sinais (DSP - *Digital Signal Processor*) que incorpora as especificações acima mencionadas para sistema de navegação do robô com controle em tempo real.

Para melhor entendimento da importância deste trabalho é preciso saber que, o mapeamento do ambiente em que o robô está inserido, é realizado através do processamento dos sinais capturados pelos sensores (ultrassônico, infravermelho) que constituem o protótipo, ou seja, as informações processadas pelos sensores traçarão uma trajetória de tal forma que não ocorra colisão do robô com algum corpo estranho do ambiente em questão. Enfim, podemos assim dizer que, o sistema eletrônico que executa o processamento de dados e envia novas informações aos atuadores do robô se aproxima ao comportamento de um cérebro humano, que por meio dos sensores humanos (visão, tato, audição) enviam dados que caracterizam o ambiente e processa uma ação para ser realizados pelos seus atuadores (braços, pernas).

O projeto proposto é dividido em diversas etapas, das quais podemos citar: operação, especificação, restrições, escolha de componentes, implementação de algoritmo, e outros. Em se tratando de um projeto que concentra diferentes áreas de estudo, como mecânica (construção da plataforma), eletrônica (projeto lógico do circuito eletrônico), automação (controle do sistema) entre outros, serão abordados neste trabalho apenas as etapas já desenvolvidas, tais como: estrutura física do robô móvel e especificação dos sensores, estudo do DSP, e algoritmos de controle. Na primeira, realizou-se um estudo detalhado sobre a estrutura física do robô e os tipos de sensores a serem utilizados para fazer o mapeamento do ambiente. Posteriormente, procurou-se verificar que outros componentes poderiam utilizar para tornar o sistema de controle mais eficiente e mais preciso comparado com a versão antiga. Em seguida, fez-se um estudo sobre o dispositivo DSP, analisando suas características e contribuições para o sistema. E por fim, analisou-se o controle dos motores dc utilizando algoritmos de controle como PWM e PID.

Dos estudos realizados até o presente momento, concluiu-se que a utilização de um DSP no *Labor Móvel* (nome dado à nova versão da plataforma móvel), pode proporcionar não só a melhoria na arquitetura física do robô, como também uma alta performance no que diz respeito ao controle em tempo real do sistema de navegação, facilitando a programação e proporcionando uma arquitetura eletrônica com excelentes características, tais como confiabilidade, aquisição e tratamento de dados, circuito PWM embutido, respostas rápidas.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

A construção de um protótipo exige do projetista um conhecimento de todas as características de operação que o mesmo se propõe, ou seja, o projetista deve caracterizá-lo segundo a sua anatomia (aéreo, aquático ou terrestre), ao tipo de controle (teleoperados, semi-autônomos ou autônomos) e a sua funcionalidade. Além destes pontos, o projetista deve também resolver questões que envolvem a navegação do robô. Como já descrito por Leonard e Durrant-White [9], o problema da navegação pode ser resumido em três questões básicas: “*Onde estou?*”, “*Para onde estou indo?*” e “*Como chego ao local desejado?*”. Encontrar a resposta para estas questões, tem sido um tema bastante discutido no meio acadêmico, pois estas questões correspondem a solucionar três problemas fundamentais da robótica móvel que coexistem em qualquer

aplicação prática: a localização (“Onde estou?”), o mapeamento (“Para onde estou indo?”) e o planejamento da trajetória (“Como chego ao local?”). Como se pode notar, a tarefa de construir um protótipo de robô com capacidades para atuar em ambientes desconhecidos é um desafio aparentemente difícil, pois a sua construção envolve uma série de fatores que podem ocasionar grandes problemas como erros de posição e orientação, ruídos nas leituras dos sensores, problemas com a carga das baterias, erros de programação, enfim, pequenos detalhes mais que causariam inconsistências quando não monitoradas adequadamente.

De posse das características desejadas para o protótipo a ser desenvolvido, é possível verificar de antemão quais os materiais necessários para sua construção, tendo apenas o cuidado de analisar qual o dispositivo que apresentará melhores condições para a aplicação do mesmo.

As etapas realizadas neste trabalho serão descritas a seguir:

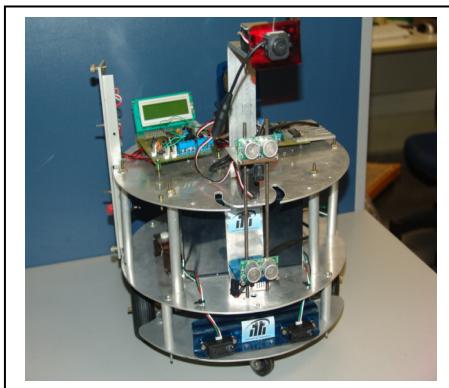
### **PRIMEIRA ETAPA: ESTRUTURA FÍSICA DO ROBÔ E ESPECIFICAÇÃO DOS SENSORES**

Para a construção física do *Labor móvel*, foi utilizada uma chapa de alumínio para a fabricação de uma plataforma capaz de suportar todos os dispositivos e circuitos do *Labor móvel*. A escolha deste material se relaciona ao fato dele possuir características adequadas a aplicação, ou seja, o alumínio, além de ser um metal leve, macio, e resistente, ele também é um material não tóxico, não-magnético, e não cria faíscas quando exposto ao atrito, apresenta excelente resistência à corrosão e durabilidade, condutividade elétrica e uma vida útil prolongada, enfim, o alumínio é um material adequado para a construção do chassis de um robô móvel.

Utilizou-se na plataforma um formato arredondado com o intuito de obter uma melhor exploração do ambiente de trabalho em que o robô está inserido e também por proporcionar uma ótima distribuição do peso sobre a base de quatro apoios (duas rodas motrizes dos motores cc e duas rodas livres). Como se trata de um robô autônomo e o nosso objetivo central é o melhoramento do sistema de navegação, então, optou-se por utilizar rodas de borracha, ao invés de esteiras e pernas, pois estes atuadores não necessitam de um hardware tão complexo quanto os outros dois e por diminuírem o escorregamento nas superfícies. As rodas são fixadas diretamente ao eixo dos motores de corrente contínua, onde o controle de sua velocidade e posição será realizado através de um encoder incremental que estará acoplado ao motor.

A base móvel do *Labor Móvel* será construída em três níveis: o inferior com os dois motores cc, os sensores GP2D02 e as duas rodas livres; o segundo nível suportará as duas baterias e um dos sensores Tato; e por fim, no nível superior com o sistema eletrônico de navegação, o sonar Polaroid 6500 e a micro-câmera. A disposição do sistema eletrônico na parte superior se deu devido ao fato de proporcionar um acesso mais fácil, além de se conseguir uma melhor “leitura” do sensor de ultra-som com uma maior distância dele em relação ao solo. Através da Fig. 1 pode-se perceber como será o formato da nova versão da plataforma móvel.

**Figura 1: Fotografia da estrutura física da versão antiga da plataforma móvel.**



Outro problema enfrentado no desenvolvimento da robótica móvel surge diretamente da necessidade de interação com objetos físicos e entidades do ambiente. Esta interação consiste principalmente na localização e identificação destas entidades enquanto o robô move-se (navega) neste meio ambiente. Este processo precisa ser realizado rapidamente, e com a máxima precisão e exatidão. É exatamente para este propósito que

utilizamos diversos tipos de sensores, mas para projetá-lo, devem-se levar em consideração as seguintes considerações [2,3]: campo de visão, capacidade de alcance, acurácia e resolução, habilidade para detectar todos os objetos no ambiente, operação em tempo real, dados concisos e de fácil interpretação, redundância, simplicidade, consumo de força e tamanho. Para a avaliação destes sensores alguns critérios são indispensáveis, como a sensibilidade, linearidade, faixa, tempo de resposta, precisão, repetibilidade, resolução e tipo de saída.

No projeto em questão, utilizamos sensores de posição óticos, sensores de proximidade ultra-sônicos e sensores de proximidades óticos, além de outros que contribuirão bastante para uma boa percepção do meio ambiente.

Na seção a seguir, será apresentada uma lista do material utilizado na construção do *Labor Móvel*, assim como todos os sensores especificados para este projeto.

## **RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA**

Depois de uma árdua pesquisa em projetos na área de robótica móvel e um profundo estudo sobre os diversos tipos de sensores aplicados nesta área, selecionou-se alguns materiais e sensores importantes para a construção do *Labor Móvel*. A escolha dos sensores utilizados no robô, deu-se pelo meio de estudos feitos nos *data sheets* dos mesmos, em que o principal critério de avaliação era o que apresentassem melhor desempenho e características satisfatórias para a aplicação em questão.

A Tabela 1 contém os principais materiais e sensores selecionados para a construção do *Labor Móvel*. Nela está contida também a quantidade necessária de cada dispositivo e suas respectivas funções/utilidades para esta aplicação.

**Tabela 1: Levantamento dos materiais e dispositivos necessários para a construção de uma plataforma móvel.**

<b>Quantidade</b>	<b>Discriminação</b>	<b>Função/Utilidade</b>
2	Rodas fixas	Movimentar o robô
2	Rodas livres	Movimentar o robô em torno do seu eixo
1	Placa de alumínio (1x1m)	Fabricação da plataforma
3	Servomotores de aeromodelos para robótica (S3003)	Controlar o posicionamento dos sensores
2	Bateria 6V e 4A	Alimentação do sistema
2	Sonar tato	Sensor ultra-sônico usado para mapear o ambiente
1	Sonar Polaroid 6500	Medir a distância entre o objeto detectado e robô (distâncias de até 11m)
2	Sensores Sharp (GP2D02)	Medir a distância entre o objeto detectado e robô (distâncias de até 80 cm)
2	Motor cc com alto torque	Movimentar as rodas do robô
1	Micro câmera de vídeo	Permite a visualização do ambiente
1	Bússola digital 1490	Orientar a direção do robô
2	Encoders	Controla o movimento do motor

Vale ressaltar que os componentes expostos na tabela acima tratam-se apenas da parte grosseira do robô, e que o material que compõem a parte eletrônica do robô não estão disponibilizado nesta tabela.

## **SEGUNDA ETAPA: DESCRIÇÃO DO CONTROLADOR DSP**

Um dos objetivos de nosso projeto é exatamente inovar a estrutura eletrônica e reduzir a quantidade de placas de circuito existente no robô no modelo anterior, proporcionando uma resposta mais rápida e confiável, e também uma estrutura física apresentável e organizada. Devido a este motivo, procurou-se implementar na estrutura eletrônica do robô um dispositivo que fornecesse essas duas características. Então, resolveu-se utilizar ao invés do microprocessador AT8958252, um microprocessador especializado em processamento digital de sinal, mais conhecido como DSP.

O DSP é um microprocessador especializado em processamento de sinal digital para processar sinais de áudio, vídeo, etc., quer em tempo real, quer em off-line, além de proporcionar o cancelamento de ruídos em mídias. Neste projeto, utilizamos o DSP TMS320LF2407A pertencente à família TMS320 que consiste de um multiprocessador de DSPs com ponto fixo e ponto flutuante, e de um controlador DSP com ponto fixado. Ela possui uma arquitetura para tempo real de sinal processado e seu funcionamento baseia-se da seguinte forma: a série de controladores DSPs 240xA combina a capacidade de tempo real de processamento com o controlador de periféricos para a criação de uma solução ideal para o controle de sistema.

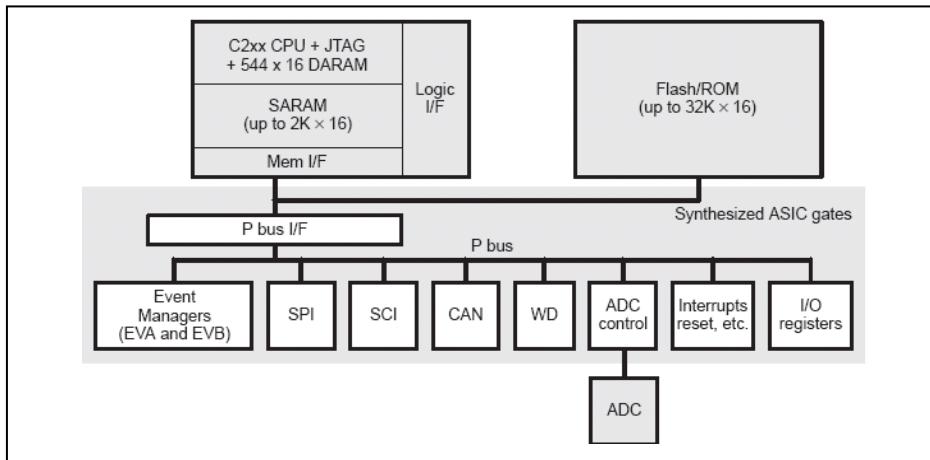
A série TMS320LF2407A do controlador DSP é bastante satisfatória para o controle de processamento de palavra de 16 bits juntamente com registros de 32 bits para armazenamento de resultados intermediários, e tem dois hardwares modificadores disponíveis para números escalares independentemente da CPU. Esta combinação reduz a quantização e erros picados, e aumenta a força de processamento para funções adicionais, como um corte na força do filtro que pode cancelar a ressonância mecânica no sistema ou uma avaliação técnica que pode eliminar estados dos sensores no sistema.

Além da existência de uma série de periféricos que permitem a configuração rápida de diferentes performances ou aplicações, o controlador DSP 240xA possui uma biblioteca digital com as seguintes vantagens:

- Supervisão de eventos
- Rede da área do controlador (CAN)
- Portas de comunicações Seriais (SCI, SPI).
- Conversores Analógico-Digitais (ADC)
- Dispositivos de segurança, tais como temporizadores *watcdog* e dispositivos de força.

Na Fig. 2 contêm uma ilustração da arquitetura dos dispositivos 240x. Para uma consulta mais detalhada (*datasheets, tutoriais e manuais*) e também, para se ter uma visão geral da CPU do DSP da série 240x sugerimos o acesso ao site: [www.ti.com](http://www.ti.com).

**Figura 2: Arquitetura dos dispositivos 240x.**



### **TERCEIRA ETAPA: ALGORITMOS DE CONTROLE**

O motor dc é de grande utilidade em sistemas de automação e controle. Ele é usado como instrumento para exercer o controle de posição ou o controle de velocidade ou de ambos. Neste trabalho, o controle dos motores dc é um ponto bastante relevante, pois a função deles consiste na movimentação do robô de forma a evitar uma colisão com algum obstáculo que se encontre no ambiente. Considerando este fato, realizou-se um estudo sobre os dois tipos de algoritmos mais usado no controle de motores dc, que são: o PWM (Modulação por Largura de Pulso), e o controlador PID (proporcional-integral-derivativo).

A técnica PWM envolve a modulação da razão cíclica de um sinal ou fonte de alimentação, para transportar qualquer informação sobre um canal de comunicação ou controlar o valor da alimentação entregue a carga. Ela

pode ser utilizada em diversos casos, porém neste projeto, esta técnica terá como principal função a realização do controle da velocidade dos motores dc através da tensão de entrada que será fornecida.

O PWM sempre aplica a potência máxima disponível por um intervalo de tempo pré-determinado. Então para sabermos a sua freqüência mínima devemos primeiro verificar quanto tempo leva para que a energia aplicada ao dispositivo se dissipe. Se a freqüência e a razão cíclica (duty-cycle) forem muito pequenas, o próximo pulso do PWM irá atuar no dispositivo quando ele já estiver parado e isso será percebido imediatamente por quem pilota o robô, pois o motor em questão irá dar "soquinhos". À medida que aumentamos o duty-cycle, este efeito tenderá a diminuir, mas isto sempre acontecerá quando trabalharmos com o motor em baixa rotação. Sendo assim, pode-se concluir que, a freqüência necessária para que os motores de corrente contínua do *Labor Móvel* funcionem em perfeitas condições, não precisa ser necessariamente tão alta já que os motores, normalmente, têm uma grande inércia mecânica. Uma freqüência de 1000Hz já é mais que suficiente para um motor dc. No caso do *Labor Móvel*, o PWM já vem embutido na estrutura interna do DSP, eliminando assim a utilização de outro dispositivo.

Os controladores PID (proporcional-integral-derivativo) são bastante empregados no controle de processos (sistemas a serem controlados). A característica básica destes controladores, que os torna muito populares, é o fato de que, quando adequadamente ajustados, eles geralmente conduzem o sistema a um desempenho satisfatório (PHILLIPS, 1996). Estes controladores utilizam a realimentação com forma de alterar as funções originais existentes no sistema, ou seja, estes controladores verificam se os dados de entrada (recebidos pelo sistema) estão de acordo com os dados reais. No nosso caso (controle do motor), o controlador verificará se a potência fornecida ao motor é a ideal para a situação em que ele se encontra ou se é necessário aumentar ou diminuir a velocidade do motor no caso, por exemplo, de uma possível colisão.

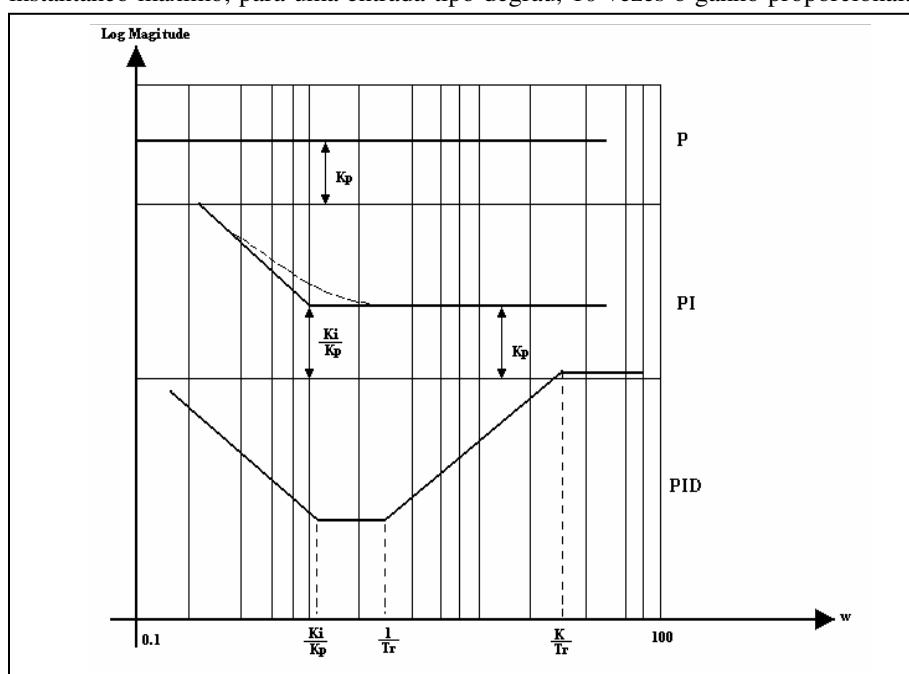
Controladores PID práticos, sejam eles pneumáticos, hidráulicos ou eletrônicos tem a mesma formulação no domínio da freqüência [1,6]:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i \left( 1 + \frac{K_p}{K_i} s \right) (1 + T_r s)}{s \left( 1 + \frac{T_r}{K} \right)}$$

Sendo,

- Faixa proporcional em percentagem =  $100 / K_p$
- Tempo de restauração =  $(K_p / K_i) * 60$  minutos;
- Tempo de aceleração =  $T_r * 60$  minutos.

A constante de tempo adicional ( $T_r / K$ ) no denominador é, usualmente, em torno de  $T_r / 10$ . Ela coloca o ganho instantâneo máximo, para uma entrada tipo degrau, 10 vezes o ganho proporcional. A resposta em freqüência do controlador PID é dada na Fig. 3 (JACQUOT, 1994).



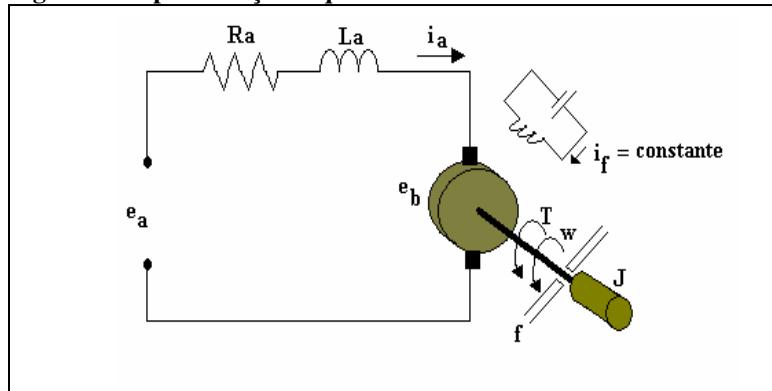
**Figura 3: Resposta em freqüência do controlador PID.**

A seguir serão apresentadas simulações feitas com motores dc utilizando o algoritmo PID.

### RESULTADOS DA TERCEIRA ETAPA

A representação esquemática de um motor DC de fluxo constante e excitado por armadura é apresentada na Fig. 4 (TARCÍSIO, 2001).

**Figura 4: Representação esquemática do motor dc de fluxo constante.**



A função de transferência simplificada do motor, desprezando o atraso elétrico em relação ao atraso mecânico, pode ser vista na equação (1).

$$\frac{W(s)}{E(s)} = \frac{K}{R_a Js + (R_a f + K^2)} \quad (1)$$

Sendo:

$E(s)$  é a tensão de armadura no plano s;  
 $R_a$  é a resistência de armadura;  
 $L_a$  é a indutância de armadura;  
 $W(s)$  é a velocidade angular do eixo do motor no plano s;  
 $f$  é o coeficiente de atrito que atua sobre o eixo;  
 $J$  é a inércia em relação ao eixo do motor e de sua carga.

Para analisar o comportamento de um motor dc utilizando o algoritmo PID, determinamos por meio da figura 2, os parâmetros do controlador PID e obtivemos os seguintes dados:

Tempo de atraso: 0,01 segundos.

Constante de tempo: 0,12 segundos

Em seguida, aplicamos o primeiro método de Ziegler-Nichols, que consiste na obtenção experimental da resposta do processo ao degrau unitário em malha aberta, e chegamos aos seguintes valores para  $K_p$ ,  $T_d$  e  $T_i$  para o controlador PID, conforme mostrado na tabela 2.

**Tabela 2: Parâmetros do controlador PID projetados pelo primeiro método de Ziegler-Nichols para o controle de velocidade do motor dc.**

<b>Tipo de Controlador</b>	<b>Parâmetros</b>		
	$K_p$	$T_i$ (seg.)	$T_d$ (seg.)
PID (proporcional-integral-derivativo)	14,4	0,01	0,005

Verificando-se, portanto, novamente a Fig. 2 percebe-se que o tempo morto é de aproximadamente 0,01seg. Assim, a função de transferência simplificada do processo pode ser vista como mostrada na equação 2.

$$\frac{W(s)}{E(s)} = \frac{0.833 e^{-0.01s}}{0.12 s + 1} \quad (2)$$

De acordo com o método de Ziegler-Nichols tem-se que, considerando  $T=0,12\text{seg.}$ ,  $G = 0,833$  e  $d = 0,01\text{seg.}$ , os parâmetros do controlador PID são dados por:

$$K_p = 1,2 (T/d) = 14,4$$

$$T_i = 2d = 0,02$$

$$T_d = 0,5d = 0,05$$

Assim, a função de transferência do controlador é:

$$G_c(s) = 14,4 \left( 1 + \frac{1}{0,02s} + 0,05s \right)$$

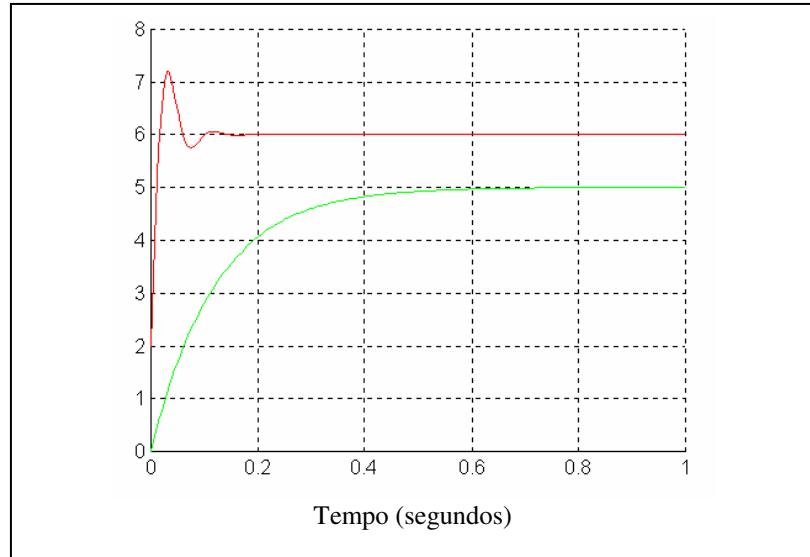
$$G_c(s) = 0,072 \frac{(s+100)^2}{s}$$

A tabela 3 mostra o desempenho do controlado PID no processo de controle do motor DC.

**Tabela 3: Desempenho do processo controlado PID obtidos pelo primeiro método de Ziegler-Nichols.**

<b>Tipo de Controlador</b>	<b>Desempenho</b>		
	<b>Tempo de acomodação</b>	<b>Sobre-sinal máximo</b>	<b>Erro de regime permanente</b>
PID (proporcional-integral-derivativo)	$\approx 4 \text{ seg.}$	$\approx 0.1048 (0.02\%)$	0

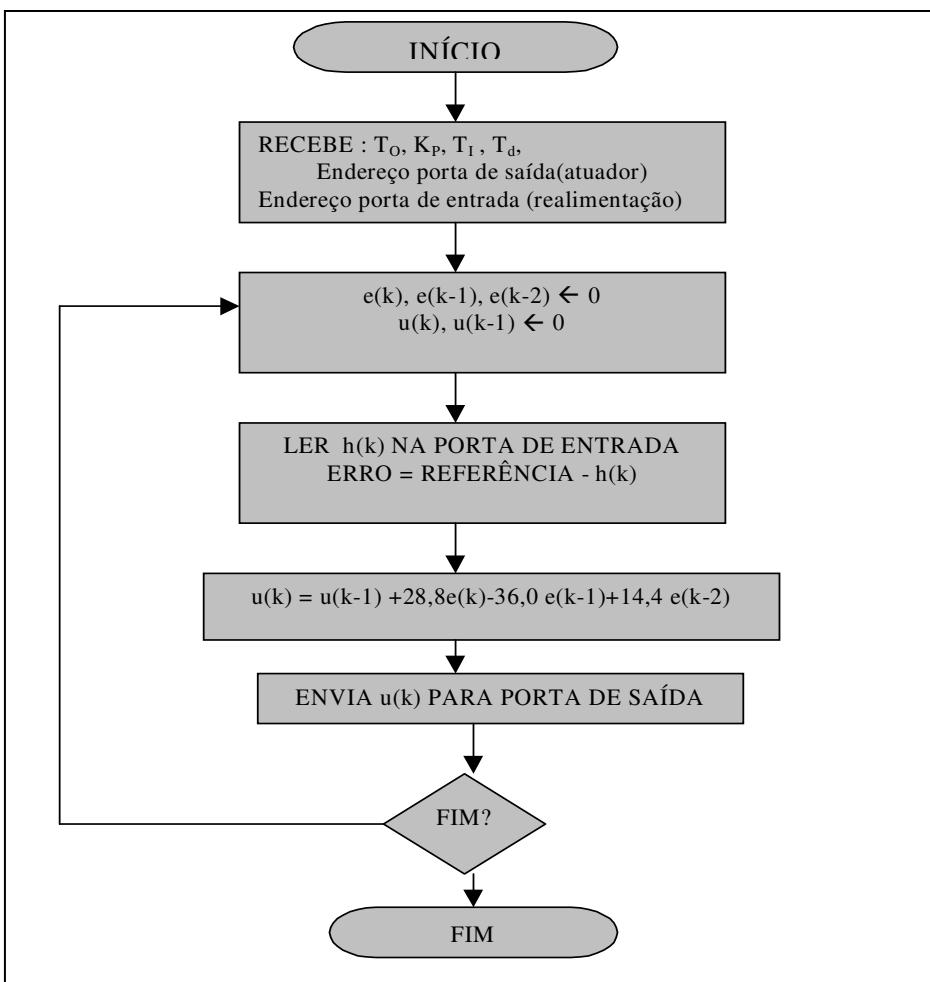
Na Fig. 5, estão mostrada as respostas ao degrau do processo controlado PID, de acordo com os valores obtidos na tabela 2. A linha verde representa a resposta do motor dc utilizando o controlador PID obtido pelo primeiro método de Ziegler-Nichols para amplitude ao degrau 6V trabalhando em malha aberta.



**Figura 5: Desempenho do controlador PID, obtido pelo primeiro método de Ziegler-Nichols, no controle de velocidade do motor dc.**

O fluxograma do controle PID discreto, utilizando o sistema SADAC (Sistema de Aquisição de Dados em Automação e Controle) [TARCÍSIO, 2001], pode ser visualizado na Fig. 6.

**Figura 6: Fluxograma do controle PID discreto do motor dc.**



## CONCLUSÕES

Conseguimos ao decorrer do trabalho, resultados importantíssimos, das quais podemos citar: estudo, ensaio e especificação dos componentes eletrônicos e dispositivos de processamento necessários para a construção do Labor Móvel, bem como a compra dos mesmos para montagem da plataforma; estudo preliminar e simulação de algoritmos tipo PID para análise e síntese de controlador de velocidade de motor DC; preparação e submissão do artigo: "Robust Digital PID Control of a Servomotor"; e a aprovação do projeto de dissertação apresentado por nós ao Departamento de Engenharia de Teleinformática, que tem como título: Controle e Estimação Robusta de Posição e Orientação de Robôs Móveis.

Do exposto no diagrama de bloco na metodologia adotada para o desenvolvimento deste projeto, pode-se afirmar que o cronograma original do projeto foi cumprido com êxito, consistindo na especificação e investigação de uma nova tecnologia baseada em DSP para o sistema de navegação de um robô móvel pessoal com características autônomas descrito acima. De acordo com os estudos feitos, concluímos que a utilização de um DSP em nosso protótipo dará ao nosso robô uma alta performance no que diz respeito ao controle em tempo real do sistema de navegação, facilitando a programação e proporcionando uma arquitetura eletrônica com excelentes características, tais como confiabilidade, aquisição e tratamento de dados, circuito PWM embutido, respostas rápidas.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. BARCZAK, CZESLAU L. - “Controle Digital de Sistemas dinâmicos, Projeto e Análise”. São Paulo. Editora Edgard Blucher LTDA, 1995. 295p.
2. BARRIENTOS, A., F. PEÑÍN, L., BALAGUER, C., AND ARACIL, R. - “Fundamentos da Robótica”. McGraw-Hill, 1997.
3. BORENSTEIN, J., EVERETT, H., AND FENG, L. - “Where am i? Sensors and Methods for Mobile Robots Positioning”. University of Michigan, Apr. 1996.
4. EVERETT, H. - “Sensors for Mobile Robots: Theory and Application”. A.K. Peters, 1995.
5. GABRIEL, G.W. - “Projeto e Construção de uma Plataforma Móvel para Navegação em Ambientes Estruturados” - (Tese de Mestrado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. São José dos Campos - São Paulo. 2005.
6. JACQUOT, RAYMOND G. “Modern Digital Control Systems”. 2a ed. New York: COPYRIGHT, 1994.
7. LAGES, W. F. - “Controle e estimativa de Posição e Orientação de Robôs Móveis” (Tese de doutorado). Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. São José dos Campos-São Paulo. 1998
8. LEONARD, J.J.; DURRANT-WHITE, H. F. - “Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons”. IEEE Transactions on Robotic and Automation, v. 7, n.3, pp. 376-382, jun. 1991.
9. MARCHI, J. - “Navegação de Robôs Móveis Autônomos: Estudo e Implementação de Abordagens”. Master’s Thesis, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
10. PHILLIPS, CHARLES L. - “Sistemas de Controle e Realimentação”. Makron Books, 1996. 557p.
11. PIERI, E. R. - “Curso de Robótica Móvel”. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
12. PLÁCIDO, M. E. B. - “Sistemas Robotizados de Inspeção Interna de Dutos”. (Dissertação de Mestrado); Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Out. 2005.
13. RIBEIRO, C., COSTA, A. & ROMERO, R. - “Robôs Móveis Inteligentes: Princípios e Técnicas”. In Anais do XXI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação – SBC’ 2001 (July 2001), vol. 03, pp. 258-306.
14. COSTA FILHO, J. T. ; SOUZA, C. P. . Controle por Computador - Desenvolvendo Sistemas de Aquisição de Dados para PC. 1. ed. São Luís: EDUFMA, 2001. v. 1. 177 p.
15. WILLIAMS, K. - “Amphibionics: Build Your Own Reptilian Robot”. McGraw-Hill Companies. New York. 2003.
16. YAMAMOTO, Y.; YUN, X. - “Coordinating Locomotion and Manipulator”. IEEE Transactions on Automatic Control, New York, NY, v. 39, n. 6, pp. 1326-1332, jun. 1994.