

ROBERTO DALLO FERREIRA

BICICLETA HÍBRIDA (MECÂNICA / ELÉTRICA)

ORIENTADOR:

PROF. DR. MARCÍLIO ALVES

SÃO PAULO

2007

RESUMO

Este trabalho visa a análise de um projeto para a melhoria de eficiência de uma bicicleta híbrida acionada por motor elétrico alimentado por baterias. Nele estão presentes as etapas de testes e tomada de dados de soluções já existentes para o projeto de um meio de transporte econômico e com o mínimo impacto ambiental. A bicicleta híbrida funciona da seguinte maneira, o usuário fornece energia mecânica através dos pedais, como em qualquer bicicleta comum, para alimentar o sistema e caso o usuário não forneça energia mecânica, a energia necessária para a locomoção será retirada das baterias. As baterias poderão ser recarregadas por um carregador ligado na linha elétrica ou no uso normal pelo sistema de regeneração, através das pedaladas do próprio usuário, em frenagens e descidas. Para aumentar a eficiência energética da bicicleta híbrida, uma parte da energia do sistema será reaproveitada através do sistema de regeneração, quando ao frear ou em descidas, a energia retorne ao sistema, ao invés de ser desperdiçada na forma de calor por atrito dos freios. O sistema de regeneração consiste no próprio motor de tração, porém na configuração de gerador elétrico. Através da análise das necessidades e desempenho esperado, será feita a análise de uma proposta de melhorias na eficiência de uma bicicleta híbrida, meio de transporte que acarrete menos prejuízo ao meio ambiente em relação aos veículos movidos por combustíveis fósseis. Em uma etapa final, será proposta a construção de um protótipo que demonstre os conceitos envolvidos.

Palavras Chave: Engenharia Mecatrônica. Bicicleta híbrida. Transporte eficiente.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Fator Ambiental	4
1.2. Transporte sustentável	7
1.3. Legislação vigente	9
1.4. A proposta	10
2. OBJETIVOS	14
3. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	15
4. PONTE H	21
5. CONTROLE DE POTÊNCIA	24
5.1. controle de potência através de PWM	26
5.2. controle de velocidade de motores através de PWM	29
6. CENÁRIO ATUAL	32
7. REQUISITOS DE PROJETO	38
8. SOLUÇÕES PROPOSTAS	40
9. ESCOLHA DA PROPOSTA SELECIONADA	43
9.1. Detalhamento da proposta selecionada	45
10. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50
ANEXO A	53

1. INTRODUÇÃO

1.1. Fator Ambiental

O efeito das atividades humanas sobre o meio ambiente aumentou significativamente a partir do início da Revolução Industrial, no final do século XVIII. Desde este período até os dias atuais, é crescente o impacto das atividades industriais, dos grandes aglomerados urbanos e da expansão da agricultura sobre a biosfera.

O aumento da preocupação com o meio ambiente exerceu um grande impacto sobre as atividades empresariais. A partir de meados da década de 1980, a maioria dos países criou leis ambientais ou tornou as existentes mais restritivas, regulando as atividades industriais e comerciais, no que concerne a seus impactos sobre o solo, a água e o ar. Para garantir o cumprimento da legislação, surgiram órgãos ambientais nos diversos níveis governamentais. Paralelamente, houve um aumento exponencial no número de ONGs (organizações não-governamentais), atuando de maneira crítica em relação às atividades dos governos e das empresas. No mesmo período, também houve o aumento da conscientização devido ao surgimento da imprensa especializada e pela maior importância dada ao tema por veículos de comunicação de massa.

Surge, neste contexto, o conceito da gestão eco-eficiente, que visa operar um empreendimento reduzindo ao máximo o consumo de matérias-primas, insumos e energias, otimizando todo o processo produtivo e reduzindo o impacto ambiental. A eco-eficiência também inclui a utilização de tecnologias menos poluentes ou perigosas (tecnologias limpas) e técnicas operacionais de prevenção à poluição.

O consumo de combustíveis fósseis derivados do petróleo apresenta um impacto significativo na qualidade do meio ambiente. A poluição do ar, as mudanças climáticas, os derramamentos de óleo e a geração de resíduos tóxicos são resultados do uso e da produção desses combustíveis. A poluição do ar das

grandes cidades é, provavelmente, o mais visível impacto da queima dos derivados de petróleo.

Nos Estados Unidos, os combustíveis consumidos por automóveis e caminhões são responsáveis pela emissão de 67% do monóxido de carbono (CO), 41% dos óxidos de nitrogênio (Nox), 51% dos gases orgânicos reativos, 23% dos materiais particulados e 5% do dióxido de enxofre (SO₂). Além disso, o setor de transportes também é responsável por quase 30% das emissões de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais responsáveis pelo aquecimento global. A concentração de CO₂ na atmosfera tem aumentado cerca de 0,4% anualmente.

O efeito da maior concentração de CO₂ na atmosfera é um agravamento do efeito estufa, isto é, tende a ocorrer um aumento da temperatura maior do que o normal, a temperatura global tende a subir, podendo trazer graves consequências para a humanidade.

O quadro abaixo indica as emissões de CO₂ na atmosfera para diversos meios de transporte, juntamente com o número de árvores que precisariam ser plantadas para neutralizar as emissões de CO₂ gerados na queima de combustíveis fósseis.

Atividade	Quantidade	Emissão de CO₂ (Kg)	Árvores devidas
Utilização de carro por dia			
Km rodados, carro 1.0 a 1.4 gasolina	30	1927	3,0
Km rodados, carro 1.5 a 2.0 gasolina	30	2233	3,3
Km rodados, carro 1.0 a 1.4 diesel	30	2584	3,9
Km rodados, carro 1.5 a 2.0 diesel	30	3230	4,8
Km rodados, carro 1.0 a 1.4 GLP	30	1347	2,1
Km rodados, carro 1.5 a 2.0 GLP	30	1511	2,4
Utilização de transporte coletivo por dia			
Km rodados, usuário de ônibus	30	240	0,3

Tabela 1: Impacto de emissão de CO₂ nos meios de transportes comuns.

Fonte www.florestadofuturo.com.br

É possível estimar as emissões de CO_2 de uma bicicleta híbrida. Para uma autonomia de 30Km diária, com uma bateria de 24V, 7Ah, a energia estimada para a recarga da bateria é de 0,17kWh / dia. Cada kWh leva à emissão de 0,6Kg de CO_2 [21], considerando ser proveniente das usinas termelétricas (energia considerada como sendo marginal). Com isso, é estimado como sendo de 37Kg de CO_2 a emissão anual.

De acordo com a tabela acima, para percursos iguais, um automóvel popular comum emitiria cerca de 2000Kg de CO_2 anualmente, enquanto uma bicicleta híbrida 37Kg, considerando as emissões estimadas para a energia elétrica utilizada para o carregamento das baterias. Significando mais de 50 vezes menos emissões.

Esses valores foram considerados como sendo a energia da bicicleta híbrida proveniente unicamente das baterias previamente carregadas pela rede elétrica. Em um caso normal, com o auxílio do usuário através dos pedais para a locomoção, as emissões seriam ainda menores.

1.2. Transporte sustentável

Uma grande preocupação atual da sociedade é o transporte sustentável, a busca de soluções melhores nos aspectos econômicos, humanos e ambientais para todo e qualquer tipo de meio de transporte.

As ações para a redução da poluição causada pelo sistema de transportes, independentemente da localidade onde ela ocorra, passa por diversas ações como a articulação do planejamento de uso e ocupação do solo e melhoria do sistema viário, melhoria do sistema de transportes, dos sistemas de circulação e fiscalização do tráfego, da qualidade dos combustíveis e alternativas energéticas de baixo potencial poluidor, redução das emissões de veículos automotores, desenvolvimento de instrumentos econômicos, fiscais, educação e o desenvolvimento social.

Os fatores mais determinantes da qualidade do ar nas grandes cidades são a tecnologia do material rodante, a organização do tráfego urbano, o ordenamento do uso do solo e a política de transportes. O transporte coletivo, por exemplo, produz menores emissões do que os automóveis, quando essas são calculadas em função de passageiro por quilômetro. Além disso, para veículos de combustão interna, o congestionamento ou a redução da velocidade média aumenta as emissões de cada veículo, especialmente as emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e material particulado.

De acordo com a CETESB, as seguintes diretrizes de Transporte Sustentável são recomendadas pela Comissão de Meio Ambiente da ANTP - na qual a CETESB é membro integrante, para orientar as políticas públicas relacionadas com o sistema de transportes, de modo a racionalizar os deslocamentos, ampliar a mobilidade urbana e reduzir os impactos sobre o meio ambiente e a qualidade de vida, tendo referências à ampliação do uso de uma bicicleta híbrida [1]:

- Incentivar a utilização de modos não-motorizados, através da expansão da malha cicloviária e das áreas destinadas prioritariamente a ciclistas, com implementação dos equipamentos urbanos necessários à

sua correta operação. Priorizar a integração com o transporte coletivo estrutural e local.

- O gerenciamento da circulação viária deve buscar preservar as condições ambientais e a segurança nas vias locais, especialmente em áreas de uso predominantemente residencial, evitando que possam ser degradadas pelo fluxo excessivo de veículos.

- Incentivar a renovação das frotas e a utilização de veículos com menor impacto poluidor, como elétricos, híbridos, a gás natural, ou veículos a diesel que utilizem diesel com menor teor de enxofre, ou que sejam equipados com sistemas avançados de controle de emissões.

- Privilegiar a tração elétrica, não poluente, especialmente na implantação e ampliação das redes estruturais.

- Incentivar a criação de tarifa diferenciada de energia elétrica para o transporte público, e uma política tarifária que privilegie outras alternativas de baixo impacto poluidor.

- Incentivar medidas e alternativas energéticas que promovam a redução de emissões de gases de efeito estufa, de forma a reduzir os impactos do setor de transportes sobre o aquecimento global.

- Incentivar a implantação de programas de educação de trânsito voltado para o transporte coletivo e de desenvolvimento e capacitação de profissionais de planejamento, projeto e gestão de transporte e trânsito voltados tanto para os veículos motorizados quanto para os não motorizados.

Veículos leves, compactos, de baixa velocidade e eficientes poderiam substituir os meios de transporte convencionais, como os automóveis, quando o usuário desejar percorrer pequenas distâncias, como o tráfego no interior de uma cidade.

1.3. Legislação vigente

De acordo com o anexo A, o a legislação de trânsito vigente no Brasil [3] não faz distinção entre bicicletas comuns e elétricas, por tanto, uma bicicleta híbrida se encaixaria nas mesmas normas, obrigações e direitos de uma bicicleta comum.

Considerando a legislação de trânsito, o usuário de uma bicicleta híbrida se beneficiaria enormemente em comparação a um motorista de automóvel nos seguintes itens:

- Não pagamento de impostos e taxas periódicas relativas ao meio de transporte, como IPVA e seguro obrigatório.
- Ausência de medidas de controle de tráfego, como por exemplo, o rodízio de automóveis.
- Não é necessário possuir carteira de habilitação ou permissão especial para conduzir a bicicleta híbrida.
- Não existência de idade mínima nem máxima para se tornar apto a conduzir a bicicleta híbrida. No caso de automóveis e ciclomotores, esse limite inferior é de 18 anos.

Pela atual legislação vigente, o uso de uma bicicleta híbrida não teria nenhum empecilho para ser absorvido pela população. Seu uso poderá ser imediato, por qualquer pessoa, facilitando assim o uso e popularização da bicicleta híbrida.

Existe um crescimento aparente em busca de novas opções de transporte e a legislação tem-se evoluindo. Um exemplo é a proposta de lei [20] que obriga os shopping centers e supermercados a terem espaço de estacionamento gratuito reservado para bicicletas.

1.4. A proposta

De acordo com o contexto exposto, o uso de uma bicicleta híbrida elétrica pela população seria bem vindo pelos órgãos de trânsito competentes, pois além de ser um meio de transporte eficiente e não poluente, seria de fácil locomoção e possivelmente uma solução para a diminuição do trânsito.

Em países como os da Europa, Estados Unidos e China, o uso de bicicletas híbridas é amplamente difundido, havendo vários fabricantes e modelos para os mais variados fins, tais como uso pessoal e comercial, como pode ser visto na figura 1 onde uma pizzaria adotou bicicletas híbridas para executar o serviço de entrega.



Figura 1: Serviço de entrega utilizando bicicletas híbridas em Shanghai, China.

Na China, o governo promove incentivo fiscal para a aquisição de bicicletas híbridas, com isso, promovendo e viabilizando esse mercado. Em 2003, a organização governamental The China Bicycle Association produziu sete milhões e meio de bicicletas híbridas na China [22], sendo vendidas por 1500 a 3000 yuan (aproximadamente R\$400,00 a R\$800,00), o que indica que é possível a implementação de uma ação similar no Brasil.

O presente trabalho se propõe a analisar o projeto de uma bicicleta híbrida acionada por motor elétrico alimentado por baterias, como nas figuras 2 e 3. O usuário forneceria energia mecânica através dos pedais para alimentar o sistema e caso o usuário não forneça energia mecânica, a energia necessária para a locomoção virá das baterias.



Figura 2: Exemplo de bicicleta híbrida.



Figura 3: Detalhe do sistema elétrico de uma bicicleta híbrida

Contará com sistema de regeneração, para que ao frear ou em descidas, a energia retorne ao sistema, ao invés de ser desperdiçada na forma de calor. As baterias poderão ser recarregadas por um carregador ligado na linha elétrica.

Será feita a análise dos fatores que influenciam o projeto de uma bicicleta híbrida, para determinação dos mais importantes na formulação de um conceito ideal de bicicleta híbrida.

Será montada uma proposta de uma solução de transporte ecologicamente correto adaptado para as necessidades nacionais, em respeito ao cumprimento da legislação vigente e aspectos econômicos, geográficos e culturais. Finalmente, será montado um protótipo que demonstre os conceitos contidos no presente trabalho.

Também serão tomadas medidas dinâmicas com a bicicleta, para a determinação de parâmetros como perdas por atrito e arrasto, entre outras para a medição da eficiência energética obtida no transporte pela bicicleta híbrida projetada e construída.

2. OBJETIVOS

Com o trabalho, espera-se propor uma solução para amenizar o caos viário que é notório nas grandes cidades e principalmente ajudar a diminuir as emissões de gases de efeito estufa e economizar os já escassos recursos naturais disponíveis.

Será feita uma proposta de uma bicicleta híbrida, com foco na melhoria da eficiência no transporte, diminuindo o gasto de energia utilizado para realizar um determinado percurso e diminuindo o impacto ambiental a um mínimo aceitável, com maior viabilidade e adequação no cenário brasileiro.

O objetivo deste trabalho é análise de um projeto de uma bicicleta híbrida, na qual além do sistema de propulsão mecânica humana característica das bicicletas, contará com um sistema em paralelo com propulsão via um motor elétrico. Analisando assim um meio de transporte que acarrete menos prejuízo ao meio ambiente em relação aos veículos movidos por combustíveis fósseis.

Para a demonstração dos conceitos envolvidos e analisar as eficiências reais obtidas, é proposta a criação de um protótipo de bicicleta híbrida que demonstre os conceitos expostos no presente trabalho.

3. Motor de corrente contínua

Os motores são elementos utilizados para a conversão de energia elétrica em energia mecânica de rotação, no caso do motor de corrente contínua (CC) essa energia elétrica se apresenta na forma de corrente contínua, gerada por uma fonte de alimentação de tensão contínua.

O princípio de funcionamento de um motor de corrente contínua está baseado em um princípio físico relativo ao campo magnético gerado ao redor de um condutor quando percorrido por uma corrente elétrica, como pode ser visto na figura 4.

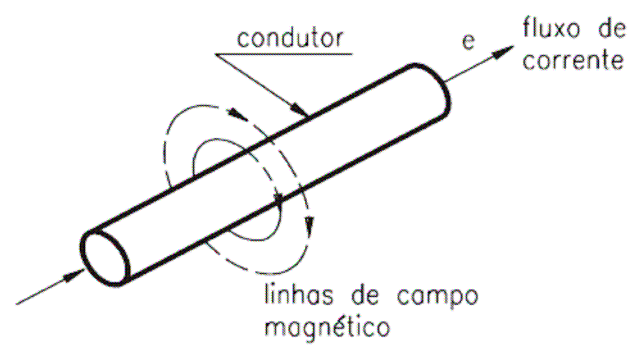


Figura 4: Ilustração do princípio físico.

Campos magnéticos de mesma polaridade se repelem e campos magnéticos de polaridade diferente se atraem, essa propriedade é utilizada nos motores CC para que se possa gerar um torque no eixo do motor (figura 5).

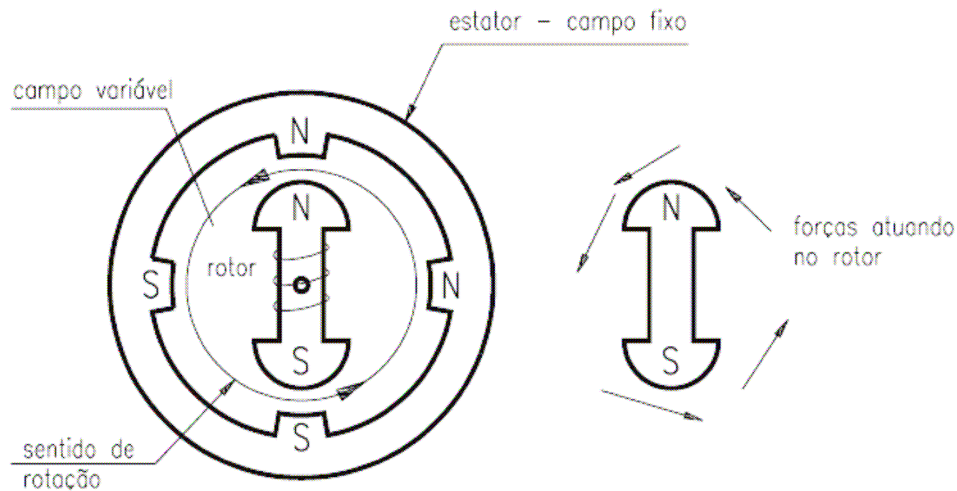


Figura 5: Forças de atração e repulsão no rotor.

Os elementos básicos de um motor CC são:

- **Estator:** a parte fixa do motor de corrente contínua. Nesta parte do motor normalmente existem campos magnéticos fixos, criados por ímãs permanentes ou eletroímã.
- **Rotor:** constitui a parte móvel do motor, ligada ao eixo de transmissão de movimento. Nesta parte do motor normalmente existem bobinas, percorridas por correntes elétricas que geram campos magnéticos. Em função da polaridade, os campos magnéticos submetem o rotor a forças de atração e repulsão, produzindo o movimento giratório do rotor e produzindo torque que é aproveitado através do eixo.
- **Coletor ou comutador:** esta parte do motor liga as bobinas à rede elétrica, de modo que o rotor se movimenta sem curtos-circuitos nos fios ligados à rede elétrica.
- **Bobinas:** são enrolamentos de condutores percorridos por corrente elétrica. Devido ao fluxo de elétrons, os enrolamentos ficam submetidos a

um campo magnético que interage com o campo magnético do estator, gerando o movimento desejado.

- Escovas: são os contatos do comutador, responsáveis pelo chaveamento entre as várias bobinas constituintes do motor.

A parte fixa, o estator, possui peças fixas (sapata polar) em torno das quais se enrolam fios de cobre, formando bobinas (bobina de campo). Na figura 6 abaixo são mostrados uma ilustração com os constituintes mecânicos de um motor CC.

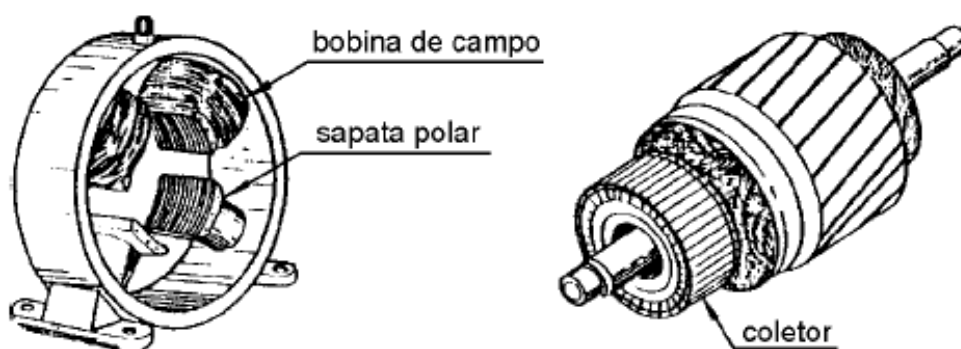


Figura 6: Partes mecânicas de um motor CC.

Com a passagem da corrente contínua, criam-se pólos magnéticos ao redor das peças polares constituindo eletroímãs, duas escovas de grafita também ficam presas ao estator e recebem os pólos da tensão elétrica contínua que alimenta o motor.

A parte móvel, o rotor, pode girar em torno do estator, pois as bobinas do estator são percorridas por uma corrente elétrica que chega até elas pelo coletor.

O fio movimenta-se ao ser atravessado pela corrente e faz girar o rotor, devido ao magnetismo dos campos permanentes do estator, que exercem uma força magnética sobre os elétrons em movimento no interior do condutor,

tentando modificar suas trajetórias, tendo o sentido da força dependente do sentido da corrente.

Ao girar, o fio perde o contato com as escovas ligadas ao comutador, entretanto, este movimento logo coloca um novo par de terminais de fio em contato com as escovas e essa situação ocorre constantemente a cada nova espira resultando o rotor continuar em movimento.

O comutador funciona como uma combinação automática de chaves que mantém a corrente sempre no mesmo sentido no condutor. Para inverter o sentido de rotação do motor basta inverter a polaridade da tensão elétrica aplicada às escovas.

Motores de corrente contínua podem movimentar cargas pesadas, desde que possuam uma construção resistente. São empregados em guindastes, elevadores, locomotivas, prensas, estamparias e máquinas-ferramenta.

A equação fundamental do torque nos motores é dada por:

$$T = K_1 \cdot I_a \cdot \varphi \quad [N \cdot m] \quad (1)$$

Onde:

φ : Fluxo magnético produzido pelos pólos;

I_a : Corrente que circula pelas bobinas da armadura;

K_1 : Constante construtiva do rotor das máquinas elétricas.

A Força contra eletro-motriz (fcem) gerada pelo movimento do motor é dado por:

$$E_a = K_2 \cdot n \cdot \varphi \quad [Volts] \quad (2)$$

Onde:

n : Número de rotações por minuto;

K_2 : Constante construtiva do campo magnético;

O fluxo magnético, por sua vez, é dado por:

$$\varphi = K_3 \cdot I_F \quad (3)$$

[Wb]

Onde:

I_F : Corrente de campo;

K_3 : Constante construtiva do fluxo magnético;

Tanto as bobinas de campo como as bobinas de armadura apresentam uma resistência elétrica a passagem da corrente, e chamamos aqui de R_f e R_a respectivamente, exemplificado pela figura 7.

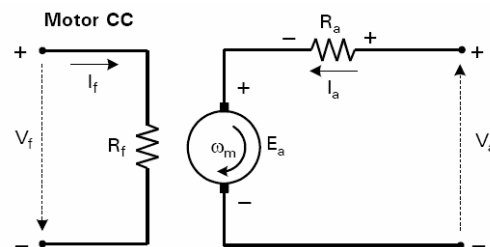


Figura 6: Máquina CC com conexão independente do campo.

Analisando o circuito acima, podemos concluir que:

$$E_a = V_a - R_a \cdot I_a \quad [\text{Volts}] \quad (4)$$

Substituindo (2) em (4):

$$n = \frac{V_a - R_a \cdot I_a}{K_2 \cdot \varphi} \quad [\text{rpm}] \quad (5)$$

Que é a equação para a velocidade do rotor, que é o interesse do controle.

Os motores de corrente contínua são divididos em motores com e sem escovas, muitas vezes denominados *brushed* e *brushless*.

O motor *brushless* é um tipo de motor síncrono, ou seja, ele recebe energia trifásica no estator e fornece energia mecânica ao eixo [23]. Isto significa que o campo magnético gerado pelo estator e o campo magnético gerado pelo rotor possuem a mesma frequência, ou seja, giram em sincronia e não é observado o escorregamento normalmente visto em motores a indução.

O motor síncrono de corrente alternada recebe energia elétrica trifásica no estator e fornece energia mecânica ao eixo. Este tipo de motor apresenta as características de velocidade constante, velocidade dependente da frequência da rede e baixa capacidade de arranque.

O motor *brushless* possui o mesmo princípio do motor síncrono, porém é um motor de corrente contínua [24]. O motor síncrono é ligado direto na rede trifásica, já o *brushless* é ligado em uma fonte de corrente contínua e uma eletrônica é responsável por comutar as fases no estator e fazer o motor girar.

4. Ponte H

A ponte H, também chamada de ponte total tem esse nome devido a seus quatro interruptores, os quais são normalmente chamados de *High Side Left* (HSL), *High Side Right* (HSR), *Low Side Right* (LSR) e *Low Side Left* (LSL) quando percorridos no sentido horário, situados nas pontas do H enquanto o motor fica posicionado no centro da letra conforme a figura 7.

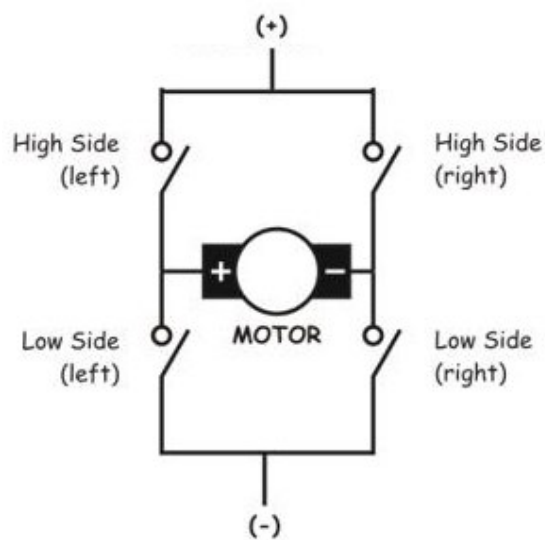


Figura 7: Esquema da Ponte H.

Para que o motor seja alimentado de maneira correta é preciso ligar os interruptores que estão diagonalmente opostos, HSL e LSR ou HSR e LSL, como na figura 8, porém nunca no mesmo lado da ponte. Se isso acontecer provocará um curto circuito entre os terminais da bateria o que pode provocar fusão dos interruptores.

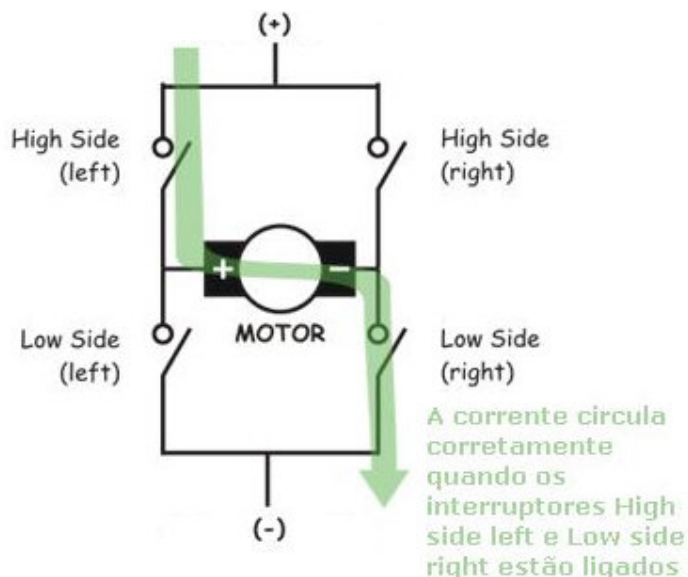


Figura 8: Ilustração da corrente em uma ponte H.

Supondo que o sentido da corrente faça o motor girar em uma direção positiva HSL e LSR acionados, invertendo-se a ligação, HSR e LSL, obtém-se uma direção de rotação oposta (negativa). A implementação dos interruptores pode ser feita com qualquer tipo de dispositivo que conduza corrente elétrica, por exemplo, relés, transistores, MOSFETS, entre outros.

A ponte H também possibilita, além de girar o motor nos dois sentidos, desacelerá-lo bastando para isso que haja controle independente de cada chave dispositivo conhecido como *four quadrant device* (4QD). Pode-se chegar a essa conclusão facilmente lembrando que cada chave possui dois estados (ligado ou desligado) e como existem quatro interruptores, 16 estados possíveis. Entretanto, como duas chaves que estão posicionadas no mesmo lado da ponte não podem ser ligadas simultaneamente existem de fato apenas quatro estados úteis como ilustra a tabela 2.

HSL	HSR	LSL	LSR	Descrição
on	off	off	on	Sentido Horário
off	on	on	off	Sentido Anti-horário
on	on	off	off	Desacelera, freia
off	off	on	on	Desacelera, freia

Tabela 2: Estados viáveis de comutação.

As duas últimas linhas descrevem a manobra onde o motor é curto circuitado e, devido à Lei de Lenz, surge um torque contrário à direção de rotação do rotor fazendo-o parar rapidamente.

Uma última observação importante a ser feita com relação a pontes H é que no instante no qual as chaves se abrem, a corrente passante pelo motor vai para zero muito rapidamente, ou seja, a derivada da voltagem em função do tempo atinge um alto valor negativo. Uma vez que o motor é um indutor, tendo sua voltagem proporcional a esta derivada, a voltagem sobre o ele tem um alto valor negativo, muito maior que a máxima tensão reversa suportada pelas junções das chaves da ponte. Para contornar esse problema, normalmente é colocado o que é conhecido como diodo de *Fly-back* na direção reversa à corrente no motor de forma que o pico de voltagem esteja diretamente polarizado por meio do diodo, criando um caminho de retorno para a corrente.

5. Controle de potência

A maneira tradicional, ou mais simples de se controlar uma carga de potência é através de um reostato em série, conforme mostra a figura 9 abaixo.

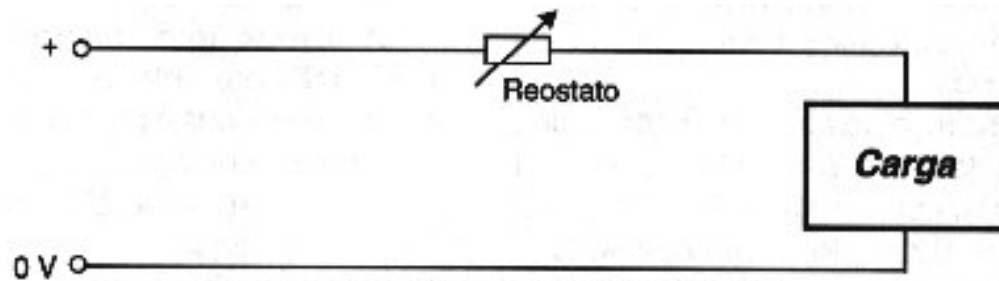


Figura 9: Método analógico através de reostato.

Variando-se a resistência apresentada pelo reostato pode-se modificar a corrente na carga e, portanto, a potência aplicada a ela.

A grande desvantagem deste tipo de controle é que a queda de tensão no reostato multiplicada pela corrente que ele controla representa uma grande quantidade de calor gerada, diminuindo drasticamente a eficiência efetiva do sistema.

O controle passa a dissipar mais potência que a aplicada na própria carga em determinadas posições do ajuste. Além de esta perda ser inadmissível, ela faz com que o componente usado no controle seja capaz de dissipar elevadas potências, ou seja, torna-se caro e grande, sendo normalmente reostatos ou potenciômetros de fio mesmo para potências relativamente baixas.

O uso de transistores ou circuitos integrados em um controle mais elaborado, que ainda varie linearmente a potência aplicada pelo controle direto da corrente, pode ser feito conforme ilustra a figura 10.

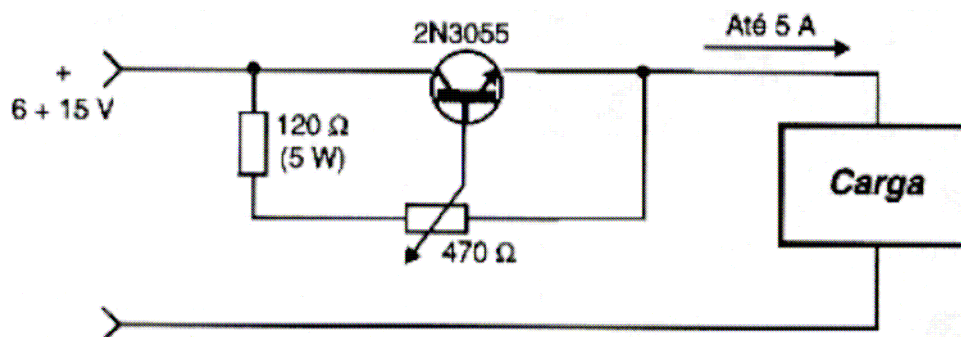


Figura 10: Método analógico através de transistor.

Embora o potenciômetro usado no controle dissipe pequena potência, pois a corrente nele é menor, este tipo de controle ainda tem um problema, a potência dissipada pelo dispositivo que controla a corrente principal é elevada.

Esta potência depende da corrente e da queda de tensão no dispositivo e, da mesma forma, em certas posições do ajuste, pode ser maior que a própria potência aplicada ao dispositivo.

Na eletrônica moderna, o rendimento com pequenas perdas e a ausência de grandes dissipadores que ocupem espaço é fundamental, principalmente quando circuitos de alta potência estão sendo controlados.

Desta forma, este tipo de controle de potência linear não é conveniente, sendo requisitadas outras configurações de maior rendimento como as que fazem uso das tecnologias PWM.

5.1. Controle de potência através de PWM

Os controles de potência, inversores de frequência, conversores para servomotor, fontes chaveadas e outros circuitos utilizam a tecnologia de PWM (*Pulse Width Modulation*) ou Modulação de Largura de Pulso como base de seu funcionamento.

Para que se entenda como funciona esta tecnologia no controle de potência através de PWM, é proposto na figura 11 circuito imaginário formado por um interruptor de ação muito rápida e uma carga que deve ser controlada, de acordo com a figura abaixo.

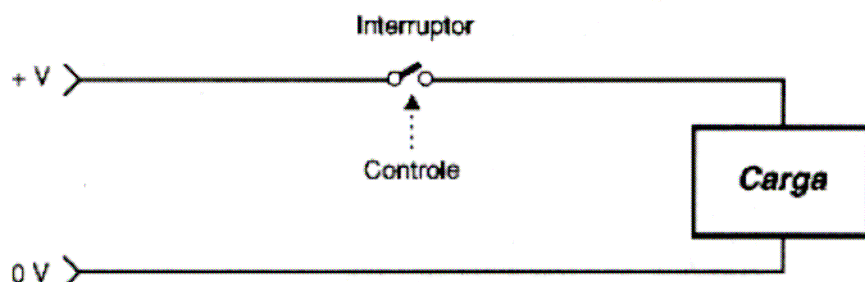


Figura 11: Circuito imaginário inicial.

Quando o interruptor está aberto não há corrente na carga e a potência aplicada é nula. No instante em que o interruptor é fechado, a carga recebe a tensão total da fonte e a potência aplicada é máxima.

Para obter uma potência intermediária, por exemplo, em 50% aplicada à carga, é feito com que a chave seja aberta e fechada rapidamente de modo a ficar 50% do tempo aberta e 50% fechada. Isso significa que, em média, apresenta metade do tempo com corrente e metade do tempo sem corrente, conforme a figura 12.

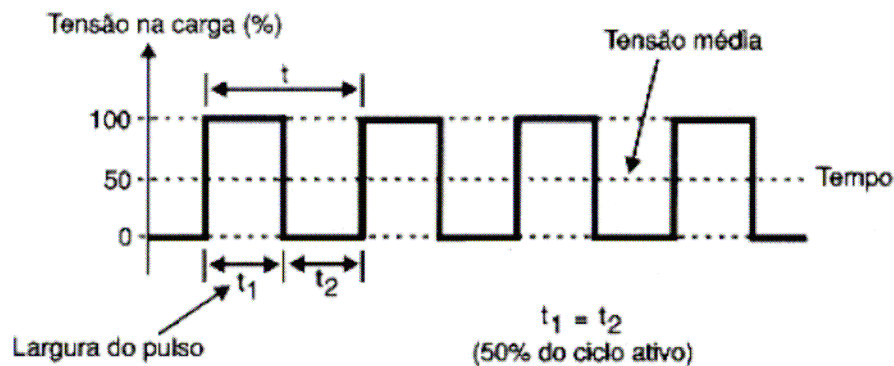


Figura 12: Demonstrativo de tensão em função do tempo.

A potência média e, portanto, a própria tensão média aplicada à carga é neste caso 50% da tensão de entrada.

O interruptor fechado pode definir uma largura de pulso pelo tempo em que ele fica nesta condição, e um intervalo entre pulsos pelo tempo em que ele fica aberto. Os dois tempos juntos definem o período e, portanto, uma frequência de controle.

A relação entre o tempo em que temos o pulso e a duração de um ciclo completo de operação do interruptor nos define ainda o ciclo ativo, conforme é mostrado na figura 13.

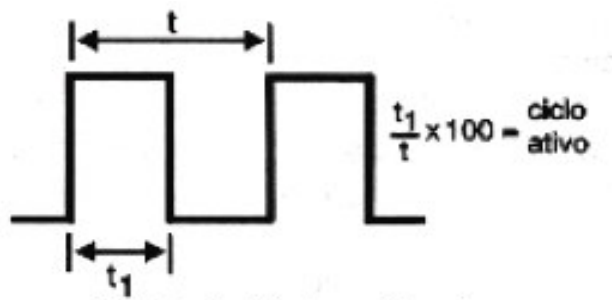


Figura 13: Ciclo ativo de tensão

Variando-se a largura do pulso e também o intervalo de modo a termos ciclos ativos diferentes, pode-se controlar a potência média aplicada a uma carga. Assim, quando a largura do pulso varia de zero até o máximo, a potência também varia na mesma proporção, conforme está indicado na figura 14.

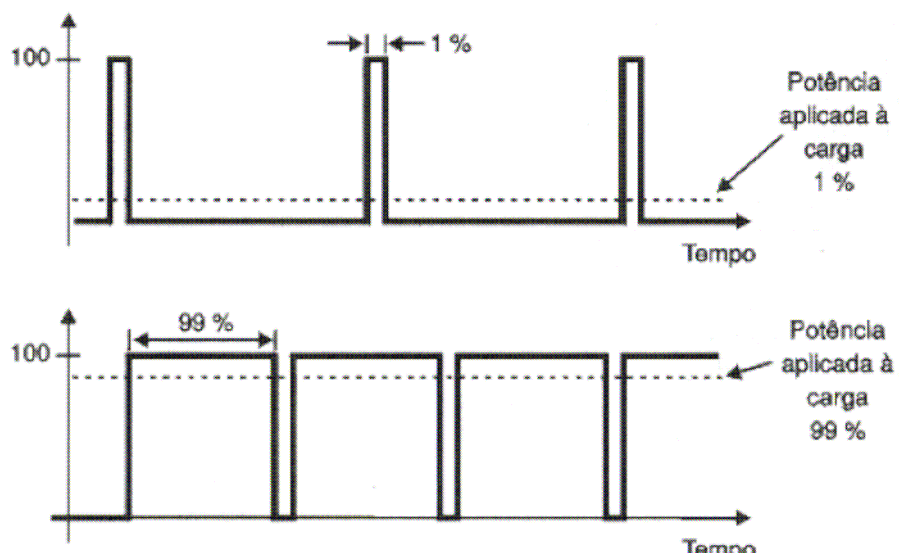


Figura 14: Variação da largura do pulso de tensão

Este princípio é usado justamente no controle PWM, é feita a modulação da largura do pulso de modo a controlar o ciclo ativo do sinal aplicado a uma carga e, com isso, a potência aplicada a ela.

5.2. Controle de velocidade em motores CC através de PWM

Controladores de velocidade de motores consistem, basicamente, no princípio de enviar ao motor um sinal que representa esta velocidade requisitada.

A velocidade de um motor CC é diretamente proporcional à voltagem fornecida. Logo, para um motor de 12 Volts, se fornecermos uma voltagem de 6 Volts a partir de uma fonte de 12 Volts, o motor deve funcionar com metade de sua velocidade.

Portanto, o controlador de velocidades funciona simplesmente variando a tensão enviada ao motor. Seria, porém, ineficiente fazer um controlador de velocidade a partir de um circuito que ajuste a voltagem desejada para o motor. Um controle mais eficiente consiste em um chaveamento extremamente rápido deste fornecimento de energia. Se este chaveamento for rápido o suficiente, o motor funciona com a voltagem média proporcionada pelo chaveamento.

Este funcionamento pode ser comparado ao seguinte exemplo.

Imagine uma lâmpada com um interruptor. Ao fechar o interruptor, a lâmpada é ligada na luminosidade máxima, por exemplo, 100 Watts. Ao abrir o interruptor, a lâmpada apaga, ou seja, 0 Watts. Logo, se o interruptor ficar fechado em uma fração de segundo, e aberto pelo mesmo período, o filamento não terá tempo suficiente para resfriar e esquentar, obtendo, assim, uma média de 50 Watts.

O mesmo princípio é usado em controladores de velocidade utilizados em motores. Com o interruptor fechado, o motor recebe 12 Volts, e aberto, 0 Volts. Se o interruptor permanecer fechado o mesmo período de tempo em que estiver aberto, será considerada a média, 6 Volts, do ponto de vista do motor. Ele deve, assim, funcionar mais lentamente do que quando em 12 Volts.

Se o período de tempo que a alimentação do motor estiver acionada aumenta em relação à quantidade de tempo que estiver desacionada, a

velocidade média do motor aumenta. Este chaveamento é realizado por dispositivos eletrônicos de potência.

O tempo de demora para acelerar ou desacelerar o motor a partir desse chaveamento depende da inércia do rotor, atrito e carga presente. A figura 15 a seguir mostra a velocidade de um motor que está sendo ligado e desligado lentamente.

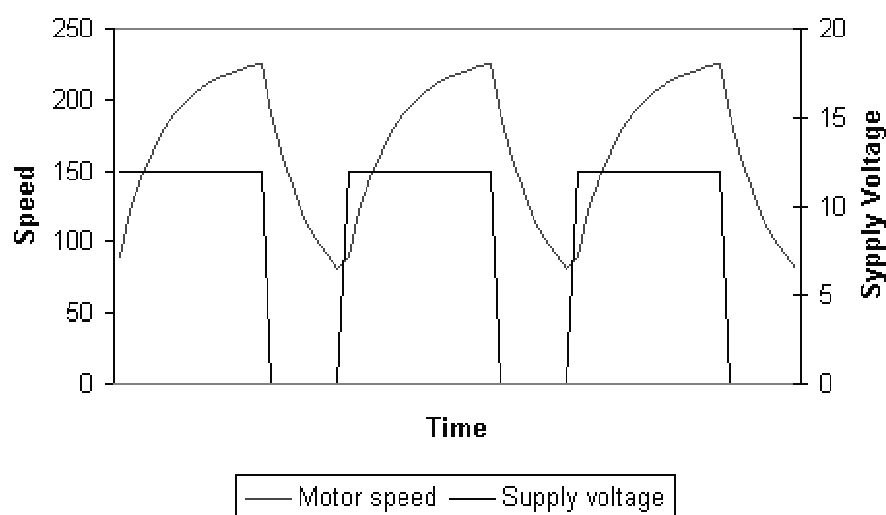


Figura 15: Comparativo entre tensão e velocidade do motor.

Pode ser observado que a velocidade média do motor é cerca de 150, apesar da variação. Se a alimentação for chaveada rápido o suficiente, a velocidade não tem tempo para variar, e, portanto, deve ser mantida constante.

A corrente que circula pelo motor segue o mesmo princípio. Devido ao efeito indutivo do motor, a variação da corrente no motor não é instantânea. Assim, caso o chaveamento for rápido o suficiente, a corrente que passa no motor terá um valor aproximadamente constante.

A velocidade é controlada pelo sinal PWM. Sua frequência resultante depende da frequência da onda de entrada. Para auxiliar a decidir que frequência utilizar é preciso levar em consideração os seguintes prós e contras.

Frequências entre 20Hz e 18kHz podem fazer com que o controlador de velocidade e motores produzam ruídos audíveis, as interferências de rádio frequência emitidas pelo circuito tendem a piorar com o aumento da frequência de chaveamento e cada chaveamento dos dispositivos de potência resulta em uma pequena perda de energia, portanto quanto maior sua frequência maior será a perda no controlador.

Quanto maior a frequência de chaveamento, mais estável será o sinal da corrente nos motores. Em baixas frequências, a onda apresentará picos nos instantes de chaveamento o que gera grande perda de energia nas resistências dos fios e dispositivos de chaveamento, já para altas frequências a indutância do motor irá amortecer aqueles picos produzindo assim uma corrente contínua média proporcional ao PWM.

6. Cenário atual

Comercialmente, existem várias soluções, variando vários parâmetros, tais como tipo e potência do motor, tipo e capacidade da bateria, configuração dos subsistemas, se há ou não regeneração.

São utilizados em sua totalidade motores de corrente contínua e alimentados por bateria. Divergem quanto ao tipo do motor, sendo divididos entre motores com e sem escovas (*brushed* e *brushless*). Os motores *brushless* são mais eficientes, sendo utilizados nas bicicletas híbridas atuais, porém é obrigatória a utilização de uma eletrônica de potência refinada e complexa para o acionamento. A potência do motor varia bastante, em sua maioria de 200 a 500 watts de potência, estando relacionada à velocidade final alcançada, capacidade de aceleração e inclinação máxima de subida.

Existem modelos utilizando-se de motores *brushed*, por seu baixo custo e facilidade de acionamento, porém há uma tendência a sua diminuição de uso em bicicletas híbridas.

Como bateria, são utilizados vários tipos variando sua densidade de energia em relação ao peso, como ácido-chumbo, NiCd, NiMh e lítio, respectivamente. Com a evolução e barateamento dos processos de produção, as baterias de lítio estão se tornando a maioria presente nos modelos. A capacidade e voltagem da bateria variam de modelo a modelo, influenciados pela potência do motor e autonomia de locomoção.

Existem várias configurações possíveis entre os subsistemas elétricos e mecânicos, variando principalmente a posição do motor, podendo esta ser localizada solidária à roda, nos pedais, entre o pedal e a roda ou acima dela. Os modelos mais atuais de bicicleta híbrida utilizam o motor solidário à roda, por esta configuração ter demonstrado, de acordo com os fabricantes, uma maior eficiência energética e menor complexibilidade mecânica.

São poucos os fabricantes que fornecem um sistema regenerador, alegando que o ganho em eficiência não equivaleria aos custos adicionais que acarretaria.

A configuração que mais é abordada nos modelos atuais é a de motor elétrico de corrente contínua, geralmente *brushless* com controlador de velocidades proporcional ao nível de aceleração. O motor é solidário à roda, não havendo nenhum tipo de redução mecânica em uma configuração visualmente parecida com uma bicicleta comum, como pode ser visto na figura 16.



Figura 16: Exemplo de bicicleta híbrida

Na figura 17, está presente modelo disponível comercialmente, o modelo 200W com bateria de NiMh do fabricante BionX [7]. O interessante nesse produto é a modularidade dos componentes, podendo ser instalado em qualquer bicicleta, tornando-a híbrida.

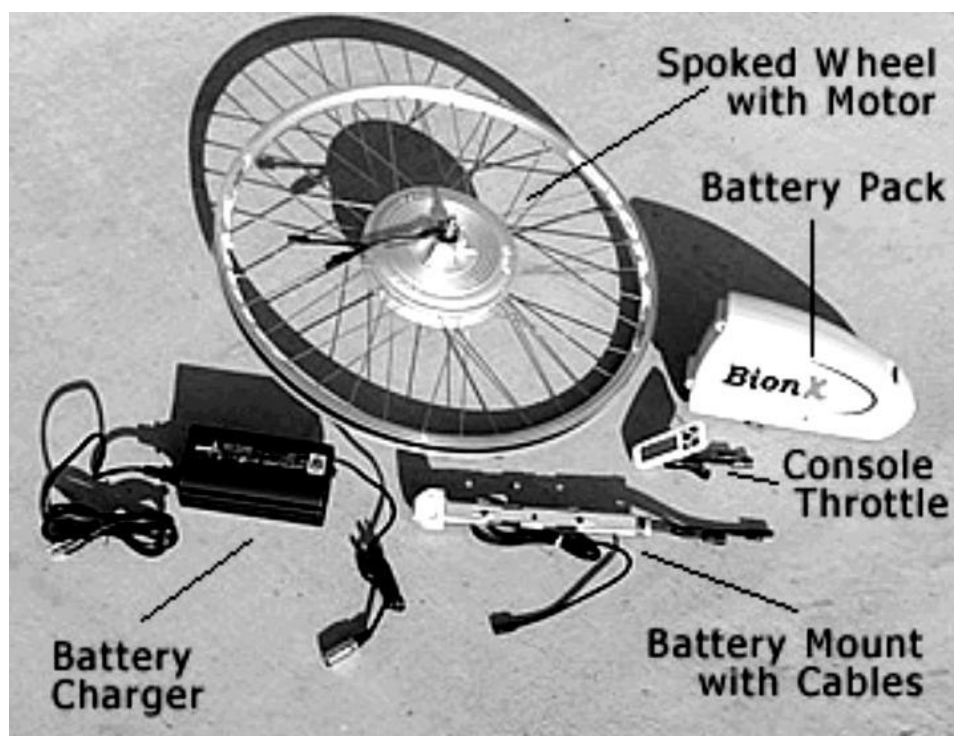


Figura 17: Kit de conversão BionX [7].

Existem outros produtos comerciais, com diferentes configurações de motor, acionamento e bateria. Nas figuras 18 e 19 estão ilustrados alguns outros modelos de bicicleta híbrida.



Figura 18: Modelo com motor acima da roda, transmitindo através do aro.



Figura 19: Motor solidário à transmissão, usando a mesma corrente.

Quanto ao sistema de baterias, a maioria das soluções, principalmente os *kits*, utilizam baterias de lítio ou NiMH, bastante eficientes e com alta densidade de energia, porém devido ao alto custo das mesmas são utilizadas baterias de chumbo-ácido em produtos com baixo custo.

Modelos mais simples não utilizam qualquer tipo de controle, valendo-se de comutadores mecânicos como relês e solenóides para a atuação do motor. Sistemas mais refinados utilizam-se de uma eletrônica de controle, que através de um *driver* de potência, fornece a alimentação necessária ao motor, podendo ser variada de acordo com a entrada do usuário.

A eletrônica de controle é um dos itens com maior variação entre os modelos, divergindo principalmente quanto ao nível de controle proporcionado. Divide-se em dois grandes grupos, os controladores *brushed* e os *brushless*. Estes últimos são mais complexos e necessários para efetuar o acionamento de um motor *brushless*.

Um outro item praticamente inexistente entre os controladores de velocidades é a regeneração ativa de energia. Entre todos a bibliografia estudada apenas o produto da empresa BionX [7] apresenta controle ativo de regeneração de energia.

Em alguns modelos existe a regeneração passiva de energia, situação que ocorre quando a força contra-eletromotriz do motor é superior ao nível de aceleração desejado, ou seja, quando a velocidade atual da bicicleta é superior aquela a qual estaria em uma situação estática com o mesmo nível de aceleração. Esse tipo de regeneração ocorre com eficiência bem inferior em comparação a regeneração ativa.

A regeneração atua em frenagens e em descidas, transformando o motor eletronicamente através do controlador em configuração de gerador, convertendo a energia que seria dissipada em calor pelos freios em energia elétrica, esta voltando para ser armazenada na bateria.

Bicicletas híbridas são difundidas amplamente em vários países, porém, essa situação é inversa no Brasil. Nacionalmente existem apenas modelos bem básicos, que são apenas adaptações elétricas em uma bicicleta comum. Não

apresentam controlador de velocidades, tendo para esse fim um interruptor que aciona o motor elétrico através de um relê mecânico.

Pela baixa tecnologia aplicada nos modelos disponíveis nacionalmente, é visível a oportunidade de se aplicar novos métodos para o projeto de uma bicicleta híbrida com eficiência alta e a custos aceitáveis.

7. Requisitos do projeto.

Para tal, é necessário apenas poucas variáveis a serem definidas. O que simplifica enormemente o projeto.

Quanto às variáveis que devem ser escolhidas, estão os valores empíricos como a potência do motor e a capacidade da bateria. Esse conjunto de informações não é possível de se obter precisamente por meio analítico, apenas estimativas, pois estão relacionados à capacidade de aceleração, velocidade máxima obtida e autonomia de percurso, valores estes que são relativos para o uso em uma bicicleta híbrida.

Muitos fabricantes dispõem de vários modelos com diferentes potências de motor e capacidades de bateria, cabendo ao usuário final escolher um modelo de acordo com o seu gosto. Geralmente variam entre potência de 200 a 500W e autonomia de 20 a 100Km.

Em muitos países, principalmente da União Européia, sua legislação limita a velocidade final em 40Km/h, porém a legislação brasileira não possui leis que limitem a velocidade máxima atingida.

A configuração entre os sistemas mecânicos manuais, o pedal e o motor é possível de se obter com algumas variações possíveis. É possível dividir essas variações em alguns grandes grupos funcionais.

Pode-se ter a configuração de motor solidário diretamente ao eixo da roda, situação essa teoricamente sendo a com maior eficiência mecânica, por não haver perdas na transmissão entre o motor e roda. O inconveniente desse método de configuração é que o motor deve ser estreito para caber no pequeno espaço presente no cubo da roda e possuir baixa rotação, por volta de 400RPM para uma velocidade de 40Km/h, o que limita a gama de opções de motores a serem utilizadas. Uma grande vantagem desse sistema é a facilidade de modularização dos componentes, sendo fácil a implementação de *kits* de montagem para ser utilizado em bicicletas normais.

Outra configuração é a do motor sendo solitário à transmissão do pedal ou acionando diretamente a corrente da bicicleta, assim diminuindo um pouco a

necessidade de grandes reduções e apresentando uma pequena perda na transmissão, porém para a implementação dessa solução, são necessárias uma grande modificação e troca de peças na bicicleta original, não sendo propícia a criação de *kits*.

O último grupo tipo de transmissão é a de utilizar a própria roda como elemento de transmissão, através de um motor acoplado em sua periferia. Esse método reúne as vantagens dos outros dois, por permitir a modularização, não necessitar de grandes alterações na bicicleta e o próprio tipo de transmissão já fornecer uma grande redução, possibilitando a utilização de motores com faixa de operação usual. A grande desvantagem é a baixa eficiência do método de transmissão, se comparado com os outros, porém é a solução que apresenta o menor custo e facilidade de implementação entre as outras.

O controle do acionamento do motor sempre é definido pelo usuário e pode ser efetuado por meio eletro-mecânicos ou eletrônicos. O primeiro método é apenas utilizado na comutação do motor, limitando sua operação em duas opções, a de ligado ou desligado, gerando impossibilidade da escolha da velocidade desejada e maior desgaste dos componentes.

O controle eletrônico de velocidade permite uma variação da velocidade desejada e uma aceleração gradual, com benefício ao conforto do usuário, menor desgaste do sistema mecânico e maior duração da bateria. O ponto negativo do sistema eletrônico é seu custo, aumentando consideravelmente o custo total da bicicleta híbrida.

Pode-se ter a regeneração da energia, em casos de frenagens, descidas ou através do esforço do usuário nos pedais, características presentes no controlador, porém são poucos os fabricantes que implementaram essas funcionalidades em seus produtos, devido ao grande aumento da complexibilidade apresentada por um sistema regenerativo de energia.

8. Soluções de propostas

Várias configurações podem ser obtidas, variando-se parâmetros como o motor, bateria, configuração da bicicleta, transmissão, entre outros.

Entre os vários tipos possíveis de motor, os que mais se aplicam a uma bicicleta híbrida são os de corrente contínua, com ou sem escovas. A escolha é limitada a esses dois casos por causa da necessidade da energia ser proveniente de baterias, ou seja, a necessidade do uso de um motor de corrente contínua.

Tais motores são disponíveis em uma ampla faixa de rotações e potência, porém é desejado que se tenha potência útil por volta de 300W, para a bicicleta híbrida conseguir velocidades de 40 a 50Km/h.

Os motores de corrente contínua com e sem escovas são equivalentes para a aplicação, diferindo na eletrônica de controle e na eficiência. Motores *brushless* são mais eficientes e apresentam várias outras vantagens, porém exigem uma eletrônica mais complexa e possuem um custo bem superior.

Para o fornecimento de energia, existem vários tipos de baterias recarregáveis, possuindo vantagens e desvantagens, entre as mais propícias para a aplicação estão:

- Ácido-chumbo: possui custo relativamente baixo, com alta capacidade de fornecimento de corrente elétrica, resistência a grandes variações de temperatura e grande durabilidade. Porém comparando-se a outros tipos de baterias, é pesada, demora bastante tempo a ser carregada, descarrega-se rapidamente, sofre uma diminuição (pequena, mas constante) de voltagem durante sua utilização e não pode ser recarregada totalmente com tanta frequência como os outros tipos.
- Níquel-cádmio (NiCd): Possui potencial energético maior do que o da de chumbo-ácido, o que faz com que seja de 20 a 50% mais leve, proporcionando um tempo de utilização superior para o mesmo peso. Não sofre queda de voltagem durante a utilização. Possui custo mais alto do que o da de chumbo-ácido, é muito tóxica para o meio ambiente (devido ao cádmio). Além disto, este tipo de bateria sofre mais com extremos de

temperatura, descarregando-se muito rapidamente em temperaturas muito baixas e não se carregando totalmente em temperaturas muito elevadas.

- Níquel Hidreto Metálico (NiMH): A bateria de níquel-metal-hidreto (NiMH) possui algumas vantagens em relação aos outros tipos: resiste a um número maior de cargas e descargas na sua vida útil do que as de NiCad, possuindo um potencial energético ligeiramente superior (20% em média). Ainda em comparação com as de NiCd, possui custo apenas ligeiramente superior, tempo de recarga inferior e maior resistência a variações de temperatura. Tem praticamente o mesmo peso que as de NiCd. Ambientalmente é mais amigável do que a de NiCd.

- Lítio: Destaca-se entre os demais tipos por descarregar-se muito lentamente quando armazenada carregada (em média 10% ao mês), e pelo tempo de recarga baixo. Entre todos os outros tipos, são as mais leves. Oferecem cerca do dobro da capacidade de uma bateria do tipo NiMH com o mesmo tamanho. O tempo de recarga também é o mais rápido quando comparados aos demais tipos. Possui grande densidade energética em comparação a todos os outros tipos de bateria. Sua grande desvantagem é o custo elevado e necessidade de uma eletrônica que regule sua corrente e voltagem, pois é bastante sensível.

Quanto à transmissão, são usadas em sua maioria duas abordagens distintas. A primeira é a localização do motor afastado da roda e possuindo uma transmissão ligando-os. A segunda é a localização do motor junto ao eixo da roda, sendo solidário a ela. Essa última configuração elimina o uso de transmissão, sendo mais eficiente do que o caso anterior.

Como discutido anteriormente, o uso de uma configuração de motor solidário ao eixo da roda seria o ideal, por causa da eficiência na transmissão. Porém como essa configuração implica em motores com rotação máxima de 400RPM.

A principal deficiência em ter um motor solidário à roda é o pequeno espaço disponível no cubo da roda, que implica no uso de um motor com pequena largura. Essa não é uma situação comum, portanto, somente existem

soluções comerciais específicas, todas elas constituídas de componentes importados.

O controlador eletrônico ideal seria aquele que possui controle linear da velocidade e controle ativo de regeneração.

Nenhum componente julgado ideal, nem substitutos similares existem disponíveis nacionalmente.

Foi encontrada uma solução que engloba todas as características citadas, possuindo bateria de lítio, motor brushless solidário à roda e controlador regenerativo [7]. É modular e aplicável em qualquer bicicleta comum.

De acordo com o fabricante, o modelo que possui motor de 250W de potência e bateria de 24V e 8Ah de capacidade, possui uma autonomia de 25Km se mantida a uma velocidade de 32km/h.

Porém é disponível unicamente através de importação, com custo estimado em US\$1.100,00, resultando em aproximadamente R\$ 4.220,00 considerando cotação do dólar, impostos de importação e taxas em setembro de 2007.

Essa estimativa de custo é irreal para o cenário brasileiro, mesmo se houvesse um grande incentivo fiscal e subsídios, dificilmente uma bicicleta híbrida altamente eficiente estaria disponível a todas as camadas sociais da população.

Uma proposta viável ao cenário nacional seria a busca de uma alternativa que resultasse em modelo mais simples, porém com eficiência aceitável. Se fossem utilizados componentes facilmente obtidos nacionalmente, o custo reduziria drasticamente, com isso, as chances de sucesso da bicicleta híbrida.

9. Escolha da proposta selecionada

Inicialmente, foi considerada a aquisição de um kit de motorização importado Bionx [7], o qual foi julgado como sendo o detentor da mais atual tecnologia. Esse kit faria com que se tivesse a disposição a solução mais próxima da julgada ideal, para seu estudo e posterior adequação para a situação nacional.

Por problemas de aquisição e importação, essa solução foi descartada, pois foi estimado que o tempo de espera para ter o kit em mãos seria muito grande e para não prejudicar o trabalho, uma nova solução foi adotada.

Para o projeto, foi considerado que a bicicleta híbrida projetada não seria uma solução comercial, ou seja, não é esperada que essa seja uma solução final e economicamente viável. Foi levada em consideração uma solução que tenha componentes de fácil aquisição e, agora, também foi buscada uma solução que fosse de baixo custo, para demonstrar todos os conceitos desenvolvidos o presente trabalho, finalmente obtendo através de testes a eficiência do protótipo e comparando com os dados da solução comercial julgada ideal.

O projeto de um protótipo de uma bicicleta híbrida envolve basicamente a criação de um subsistema mecânico acionado por um acionamento elétrico e controlado eletro-mecanicamente ou eletronicamente.

A principal limitação presente é o motor de locomoção e sua eletrônica de controle. Foi decidido o uso de um motor com escovas, devido à disponibilidade imediata de seu controlador de velocidade.

Não existem soluções comerciais nacionais adequadas para o controlador de velocidade, apenas modelos importados como o Victor [25]. Uma alternativa encontrada foi o empréstimo da eletrônica de controle fabricada e utilizada pela equipe POLI ThundeRatz de competição de robôs.

O acionamento por meio de controlador de velocidade é inédito como solução nacional. Todas as soluções comerciais nacionais disponíveis são inadequadas, pela baixa tecnologia aplicada ou o alto custo.

A montagem dos componentes é feita na própria bicicleta, através de conexões removíveis, para não alterar ou danificar a bicicleta usada como base.

A transmissão é realizada por meio de uma polia do motor ligada diretamente a região externa da roda. Essa configuração foi escolhida por permitir grandes relações de redução e não necessitar de alterações nos pedais e cubo da bicicleta.

Devido ao atrito presente no motor e transmissão, quando não é desejado o acionamento elétrico para locomoção pode-se desconectar mecanicamente a transmissão entre o motor e a roda, realizado através de uma alavanca operada pelo usuário.

Serão seguidas duas grandes características para o projeto.

Primeiramente a construção deve ser totalmente modular, com a adaptação na bicicleta com o mínimo de mudanças possível. Isso se torna necessário para atender a parcela da população que já possui sua própria bicicleta e para não limitar a bicicleta híbrida a soluções totalmente adaptadas, o que aumentaria o custo.

A segunda característica desejada é a manutenção das características de uma bicicleta híbrida com eficiência aceitável aliada ao baixo custo. O custo total se dará principalmente pelo motor, controlador e bateria.

9.1. Detalhamento da proposta selecionada

Por razões de segurança e conceituação do protótipo, foi definida a velocidade máxima como sendo de 20Km/h.

A seguir encontra-se o dimensionamento do motor e bateria.

De acordo com o fabricante Optbike [26], o consumo para uma velocidade de 32Km/h é estimado em 380W. Considerando que a força resistiva ao movimento da bicicleta varia com o quadrado da velocidade (arrasto puro), a potência requerida varia com o cubo da velocidade. Para a velocidade máxima de 20Km/h, resulta em uma potência mecânica necessária de cerca de 95W. Esse valor é apenas uma estimativa, pois varia com o arrasto da bicicleta e demais perdas desconsideradas.

Estimando as perdas não consideradas em 20% do valor da potência necessária para a velocidade de 20km/h, resulta em 110W, por tanto, para uma bateria de 9Ah a 12V, para a eficiência de 60% (descarga em cerca de 1 hora), a bicicleta híbrida teria sua bateria com duração de aproximadamente 35 minutos, ou seja, com autonomia de cerca de 11,5Km, valor apropriado para o uso do protótipo.

O motor escolhido foi o motor GPB da fabricante Bosh, figura 20, possuindo as seguintes características: voltagem de 12V, nominalmente 250W de potência, rotação de 3000RPM. Essas informações aliadas à potência de pico de cerca de 320W torna esse motor ideal para a aplicação.



Figura 20: Motor GPB Bosh.

Para a eletrônica de controle do motor foi utilizada a placa de controle produzida e gentilmente emprestada pela equipe POLI ThundeRatz de competição de robôs. A placa é baseada no projeto *open source* OSMC [18], adequada para o motor escolhido, por ter capacidade de voltagem até 24V e corrente nominal de 120A.

Segue o princípio de controle de potência utilizando PWM, utilizando MOSFETs como elementos de chaveamento. Na placa é usado elementos de alta qualidade, proporcionando à eletrônica de controle um altíssimo rendimento. Na figura 21 é demonstrada uma imagem da placa de controle.

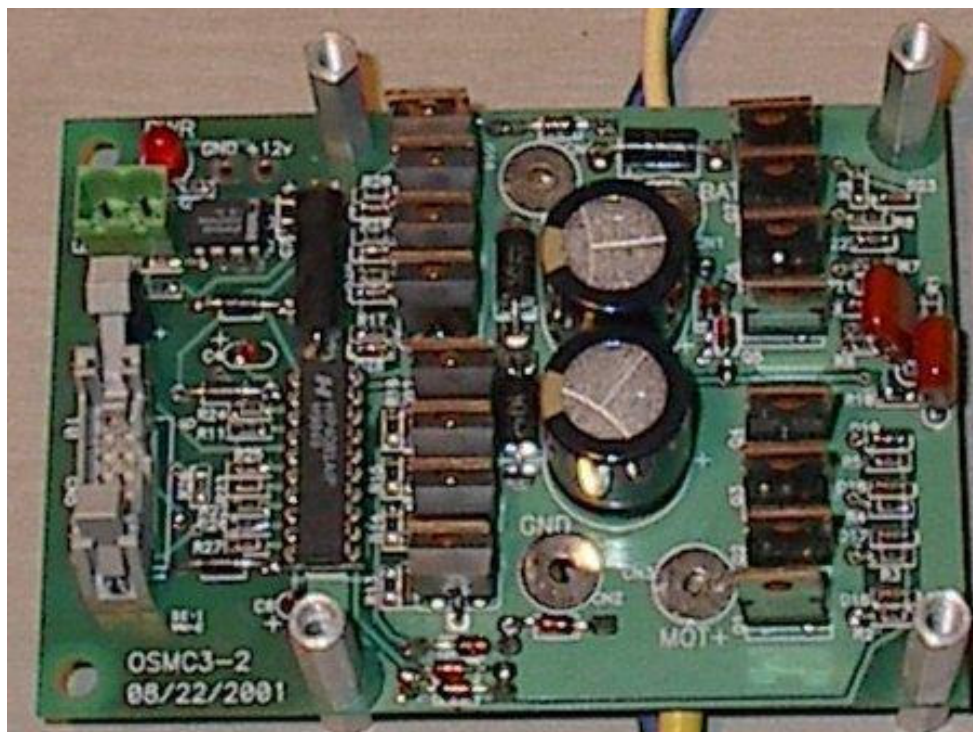


Figura 21: Eletrônica de controle

A bateria utilizada será do tipo ácido-chumbo selada 12V 9Ah (figura 22). Esse tipo de bateria foi escolhido principalmente pelo custo e facilidade de manuseio, já que não precisa de carregadores especiais e é bastante robusta, podendo fornecer picos de corrente bem superior à sua capacidade nominal. Além de ser selada e possuir o eletrólito em forma de gel, ou seja, sem perigo de vazamento do ácido da bateria.

10. Conclusão

Com o presente trabalho, é feita uma proposta de um novo meio de transporte para atuação no país, em possível substituição aos meios de transportes convencionais, como automóveis.

Bicicletas híbridas são amplamente utilizadas no exterior, principalmente na Europa e Estados Unidos. Uma adequação ao cenário é possível, com margem viável a uma solução comercial.

Atualmente para a execução de um projeto altamente eficiente é necessário de aquisições de componentes importados. Foi mostrado que é possível a construção de uma bicicleta híbrida de baixo custo e inteiramente fabricada a partir de componentes de fácil aquisição, porém com uma redução aceitável na sua eficiência de transporte.

REFERÊNCIAS

[1] **Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2007).** Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>> , acessado em 05/04/2007.

[2] **Back, N. (1983).** "Metodologia de projeto de produtos industriais", Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, 1983.

[3] **Código de Trânsito Brasileiro (1997).** Lei n.º 9503, de 23/09/97. Polícia Rodoviária Federal.

[4] **Esposito A., Thrower J. R. (1991).** "Machine design" Albany, N.Y. : Delmar Publishers, c1991

[5] **Floresta do Futuro (2007).** Disponível em <<http://www.florestas dofuturo.org.br/paginas/home.php>> , acessado em 15/05/2007.

[6] **Lourenço, Sérgio R. (2003).** "Gás natural: perspectivas e utilização". Tese(Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.

[7] **Bionx (2007).** Disponível em <<http://www.bionx.ca/en/main/default/1.shtml>> , acessado em 15/05/2007.

[8] **H-Bridges : Theory and Practice.** Disponível em <<http://www.mcmanis.com/chuck/robotics/tutorial/h-bridge/index.html>>. Acesso em 01.07.2007

[9] **Apostila sobre motores DC,** disponível em <<http://www.dca.fee.unicamp.br/~jro/ea079/2005/projetosAlunosMotorCC.pdf>>. Acesso em 01.07.2007

[10] **Apostila sobre modulação PWM.** Disponível em <http://www.eletronica.org/arq_apostilas/apostila_pwm.pdf> Acesso em jul. 2007

[11] **Princípios de funcionamento de comando por modulação de largura de pulso.** Disponível em: <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/PO/realisations/ElectroniquePuissance/Onduleurs/CdeMLI/Principe/1_cours.htm> Acesso em 02.07. 2007

- [12] **Eletricidade: acionamento de motores elétricos.** Disponível em
 <http://www.bibvirt.futuro.usp.br/textos/tem_outros/cursprofissionalizante/tc2000/automacao/autoa04.pdf> Acesso em 02.07.2007
- [13] **Apostila Máquina CC - Prof. Luís Alberto Pereira - PUCRS-DEE.**
 Disponível em
 <diana.ee.pucrs.br/~lpereira/Eletrotecnica/Apostila_MCC.pdf> Acesso em
 02.07.2007
- [14] **Curso Pós-técnico em Automação Industrial Prof. Valdir Noll.**
 Disponível em
 <<http://lab.etfto.gov.br/~augusto/Apostilas/Motores.pdf>> Acesso em
 02.07.2007
- [15] **Máquina de Corrente Contínua PUCRS- FENG - DEE - Disciplina de Eletrotécnica (ME) - Profs. Luís Alberto Pereira - Sílvio Bernardes.**
 Disponível em <<http://diana.ee.pucrs.br/~lpereira/Eletrotecnica/Resumo.pdf>>
 Acesso em 02.07.2007
- [16] **Principles of Mosfet,** disponível em:
 <http://info.tuwien.ac.at/theochem/si-srtio3_interface/mosfet.jpg> Acesso em
 02.07.2006
- [17] **Basic of motor control,** disponível em
 <<http://homepages.which.net/~paul.hills/>> Acesso em 30.06.2006
- [18] **Robot Power motor control.** Disponível em
 <<http://www.robotpower.com/>> Acesso em 02.04.2007
- [19] **Golden Motor.** Disponível em <<http://www.goldenmotor.com/>> Acesso
 em 14.05.2007
- [20] **Projeto de Lei Ordinária 05.00065.2007.** Proposição em trâmite no na
 câmara do governo municipal de Curitiba.
- [21] **Lourenço, Sérgio R. (2003).** "Gás natural: perspectivas e utilização",
 Campinas, UNICAP, 2003.

[22] **Fairley, Peter (2005).** "China's cyclists take charge", IEEE Spectrum, June 2005.

[23] **Escola SENAI Roberto Somonses.** "Máquinas elétricas".

[24] **Yedamale, Padmajara (2003).** "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals", Microship Technology Inc, 2003.

[25] **IFI Robotics.** Disponível em <<http://www.ifirobotics.com>> Acesso em 11.10.2007

[26] **Optbike.** Disponível em <<http://www.optibike.com>> Acesso em 16.11.2007

Anexo A

Trechos da lei Nº 9503, de 23 de setembro de 1997.

CAPÍTULO I

DISPOSIÇÕES PRELIMINARES

Art. 1º O trânsito de qualquer natureza nas vias terrestres do território nacional, abertas à circulação, rege-se por este Código.

§ 1º Considera-se trânsito a utilização das vias por pessoas, veículos e animais, isolados ou em grupos, conduzidos ou não, para fins de circulação, parada, estacionamento e operação de carga ou descarga.

§ 2º O trânsito, em condições seguras, é um direito de todos e dever dos órgãos e entidades componentes do Sistema Nacional de Trânsito, a estes cabendo, no âmbito das respectivas competências, adotar as medidas destinadas a assegurar esse direito.

§ 3º Os órgãos e entidades componentes do Sistema Nacional de Trânsito respondem, no âmbito das respectivas competências, objetivamente, por danos causados aos cidadãos em virtude de ação, omissão ou erro na execução e manutenção de programas, projetos e serviços que garantam o exercício do direito do trânsito seguro.

Parágrafo único. Quando uma via comportar duas ou mais faixas de trânsito e a da direita for destinada ao uso exclusivo de outro tipo de veículo, os ciclomotores deverão circular pela faixa adjacente à da direita.

Art. 21. Compete aos órgãos e entidades executivos rodoviários da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, no âmbito de sua circunscrição:

II - planejar, projetar, regulamentar e operar o trânsito de veículos, de pedestres e de animais, e promover o desenvolvimento da circulação e da segurança de ciclistas;

Art. 38. Antes de entrar à direita ou à esquerda, em outra via ou em lotes lindeiros, o condutor deverá: (...)

Parágrafo único. Durante a manobra de mudança de direção, o condutor deverá ceder passagem aos pedestres e ciclistas, aos veículos que transitem em sentido contrário pela pista da via da qual vai sair, respeitadas as normas de preferência de passagem.

Art. 39. Nas vias urbanas, a operação de retorno deverá ser feita nos locais para isto determinados, quer por meio de sinalização, quer pela existência de locais apropriados, ou, ainda, em outros locais que ofereçam condições de segurança e fluidez, observadas as características da via, do veículo, das condições meteorológicas e da movimentação de pedestres e ciclistas.

Art. 58. Nas vias urbanas e nas rurais de pista dupla, a circulação de bicicletas deverá ocorrer, quando não houver ciclovia, ciclofaixa, ou acostamento, ou quando não for possível a utilização destes, nos bordos da pista de rolamento, no mesmo sentido de circulação regulamentado para a via, com preferência sobre os veículos automotores.

Parágrafo único. A autoridade de trânsito com circunscrição sobre a via poderá autorizar a circulação de bicicletas no sentido contrário ao fluxo dos veículos automotores, desde que dotado o trecho com ciclofaixa.

Art. 59. Desde que autorizado e devidamente sinalizado pelo órgão ou entidade com circunscrição sobre a via, será permitida a circulação de bicicletas nos passeios.

Art. 68 (...) § 1º O ciclista desmontado empurrando a bicicleta equipara-se ao pedestre em direitos e deveres.

Capítulo IX

Dos Veículos

Art. 96. Os veículos classificam-se em:

I - quanto à tração: (...)

c) de propulsão humana;

II - quanto à espécie: (...)

a) de passageiros:

1 - bicicleta;

Art. 105. São equipamentos obrigatórios dos veículos, entre outros a serem estabelecidos pelo CONTRAN:

VI - para as bicicletas, a campainha, sinalização noturna dianteira, traseira, lateral e nos pedais, e espelho retrovisor do lado esquerdo.

Capítulo XV

Das Infrações

Art. 181. Estacionar o veículo:

VIII - no passeio ou sobre faixa destinada a pedestre, sobre ciclovia ou ciclofaixa, bem como nas ilhas, refúgios, ao lado ou sobre canteiros centrais, divisores de pista de rolamento, marcas de canalização, gramados ou jardim público:

Infração - grave;

Penalidade - multa;

Medida administrativa - remoção do veículo;

Art. 193. Transitar com o veículo em calçadas, passeios, passarelas, ciclovias, ciclofaixas, ilhas, refúgios, ajardinamentos, canteiros centrais e divisores de pista de rolamento, acostamentos, marcas de canalização, gramados e jardins públicos:

Infração - gravíssima;

Penalidade - multa (três vezes).

Art. 201. Deixar de guardar a distância lateral de um metro e cinquenta centímetros ao passar ou ultrapassar bicicleta:

Infração - média;

Penalidade - multa.

Art. 220. Deixar de reduzir a velocidade do veículo de forma compatível com a segurança do trânsito:

XIII - ao ultrapassar ciclista:

Infração - grave;

Penalidade - multa;

Art. 255. Conduzir bicicleta em passeios onde não seja permitida a circulação desta, ou de forma agressiva, em desacordo com o disposto no parágrafo único do art. 59:

Infração - média;

Penalidade - multa;

Medida administrativa - remoção da bicicleta, mediante recibo para o pagamento da multa.

ANEXO I

DOS CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Para efeito deste Código adotam-se as seguintes definições:

ACOSTAMENTO - parte da via diferenciada da pista de rolamento destinada à parada ou estacionamento de veículos, em caso de emergência, e à circulação de pedestres e bicicletas, quando não houver local apropriado para esse fim.

BICICLETA - veículo de propulsão humana, dotado de duas rodas, não sendo, para efeito deste Código, similar à motocicleta, motoneta e ciclomotor.

CICLO - veículo de pelo menos duas rodas a propulsão humana.

CICLOFAIXA - parte da pista de rolamento destinada à circulação exclusiva de ciclos, delimitada por sinalização específica.

CICLOVIA - pista própria destinada à circulação de ciclos, separada fisicamente do tráfego comum.