



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

DIFERENCIAL ELETRÔNICO
PARA O VEÍCULO ELÉTRICO UTILITÁRIO
DA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA UFRJ

Luiz Fernando Vieira Dias

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia de Controle e Au-
tomação da Escola Politécnica, Univer-
sidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à ob-
tenção do título de Engenheiro.

Orientadores:
Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.
Walter Issamu Suemitsu, Dr.-Ing.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil
Março de 2014

DIFERENCIAL ELETRÔNICO
PARA O VEÍCULO ELÉTRICO UTILITÁRIO
DA CIDADE UNIVERSITÁRIA DA UFRJ

Luiz Fernando Vieira Dias

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO.

Examinado por:

Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.
(Orientador)

Walter Issamu Suemitsu, Dr.-Ing.
(Orientador)

Afonso Celso Del Nero Gomes, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil
Março de 2014

Dias, Luiz Fernando Vieira

Diferencial Eletrônico para o Veículo Elétrico Utilitário da Cidade Universitária da UFRJ / Luiz Fernando Vieira Dias. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2014.

53 p.: il. color; 29,7 cm.

Orientadores: Luís Guilherme Barbosa Rolim e Walter Issamu Suemitsu.

Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica / Engenharia de Controle e Automação, 2014.

Referências bibliográficas: p. 34-35.

1. Veículos elétricos
 2. Acionamento
 3. Motor de ímãs permanentes com fluxo axial
 4. Sistemas de controle
 5. Diferencial eletrônico.
- I. Rolim, Luís Guilherme Barbosa e Suemitsu, Walter Issamu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Controle e Automação. III. Diferencial Eletrônico para o Veículo Elétrico Utilitário da Cidade Universitária da UFRJ.

Agradecimentos

Em 2008, início do curso de Controle e Automação, eu nutria a esperança ingênuia de que eu viria a me tornar o homem de ferro, afinal a Wikipedia em português diz que ele fez ECA. Na data deste projeto, concluído o curso, eu continuo a nutrir essa esperança. A diferença é que hoje não é mais ingênuia, pois eu (re)conheci, ao longo destes anos, os homens de ferro da vida real, engenheiros de extrema competência e personalidades únicas, muito mais legais que o fictício: meus orientadores. Ao Prof. Walter Issamu Suemitsu, agradeço por todo o apoio oferecido desde que nos conhecemos, viabilizando a realização de projetos sem os quais eu seria muito menor do que sou hoje, talvez nem engenheiro. Sua paciência, equilíbrio e produtividade são notáveis, espero alcançá-las um dia. Ao Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim eu agradeço também pelo apoio e por fazer-me sentir, ainda que inconscientemente, mais inteligente do que sou. A sua maneira de falar sobre conteúdo técnico como se fosse uma conversa entre iguais sempre me faz pensar “será que ele acha que eu já sabia tudo isso?”. A ambos, agradeço por me apresentarem a Eletrônica de Potência e pela ampla disponibilidade em atenderem, sanar dúvidas e orientar.

Ao Prof. Afonso Celso Del Nero Gomes, antes de agradecer, peço desculpas pelo sem-número de vezes que bati à sua porta, quase sempre para cobrar e reclamar, tirando-o das tarefas aprazíveis e entregando-lhe problemas. Agradeço, então, pela paciência e bom senso com que se esforçava para resolvê-los e, em particular, pelas orientações dadas no decorrer do curso. Não posso deixar de comentar também que nas aulas de Controle Realimentado eu não entendia o porque da leitura de frases, no lugar de contar qualquer historinha como os outros professores. Pouco tempo atrás, elegendo-o paraninfo da turma, eu percebi que as frases ficaram - as 10 regras do *root locus* também - mais do que qualquer historinha. “A abelhinha atarefada não tem tempo para mágoas” tornou-se uma espécie de mantra para me incentivar a estudar e deixar de pensar em problemas. Finalmente, agradeço ao Prof. Jomar Gozzi, com toda sua sensibilidade, atenção e didática indefectíveis que tornam os semestres consigo muito mais agradáveis. De nossas aulas e conversas eu guardo importantes lições técnicas e pessoais, além da inesquecível prova “de pai para filho único, com leucemia”. A todos, gostaria que soubessem que marcaram positiva e irreversivelmente minha formação, minha personalidade, e que seus exemplos sempre servirão de parâmetros ao longo da minha carreira.

Sorte tão grande quanto contar com bons orientadores foi contar com grandes companheiros de curso. O espírito de turma da T-12 foi muito além do que se poderia esperar, expressando-se desde pequenas marcas, como sen-

tarmos sempre juntos em sala de aula, até grandes demonstrações de cuidado, não permitindo que ninguém se isolasse. Foi uma experiência bastante valiosa representar este pessoal, retribuindo da minha forma todo o respeito e carinho dedicados. Agradeço, um a um, pela companhia, os bons momentos, o incentivo e a homenagem prestada: Alexandre Brandão, Alexandre Navarro, André Figueiró, André Milhorance, Eduardo Rizzo, Fábio Lopez, Fernanda Matias, Fernando Monteiro, Filipe Vital, Gabriel Alcantara, Gabriel Pacheco, Lucas Carvalho, Rafael Faria, Tiago Calmon e Victor Frangipani. Não apenas lá havia grandes personalidades: ao Gustavo Calzavara (T-11) e ao Bruno Hashimoto (T-13) eu registro meu agradecimento pela amizade, ajuda e aconselhamento ao longo do curso.

Fora da ECA também há pessoas importantes que me influenciaram, motivaram e ensinaram: Leonardo Malheiro, um irmão mais velho, um exemplo de disciplina, determinação e gosto pela engenharia e pela vida e, é claro, os “spartanos” - com especial carinho: Raphael, Laura, Camila, Paulo, Nocito e Rafaela - cuja intensa convivência rendeu enorme experiência e ótimas amizades.

*Navegadores antigos tinham uma frase gloriosa:
“Navegar é preciso; viver não é preciso”.*

*Quero para mim o espírito [d]esta frase,
transformada a forma para a casar como eu sou:*

*Viver não é necessário; o que é necessário é criar.
Não conto gozar a minha vida; nem em gozá-la penso.*

*Só quero torná-la grande,
ainda que para isso tenha de ser o meu corpo
e a (minha alma) a lenha desse fogo.*

*Só quero torná-la de toda a humanidade;
ainda que para isso tenha de a perder como minha.
Cada vez mais assim penso.*

*Cada vez mais ponho da essência anímica do meu sangue
o propósito impessoal de engrandecer a pátria e contribuir
para a evolução da humanidade.*

É a forma que em mim tomou o misticismo da nossa Raça.

Fernando Pessoa

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica da UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Diferencial Eletrônico para o Veículo Elétrico Utilitário
da Cidade Universitária da UFRJ

Luiz Fernando Vieira Dias

Março de 2014

Orientadores: Luís Guilherme Barbosa Rolim e Walter Issamu Suemitsu

Curso: Engenharia de Controle e Automação

Este trabalho é um apanhado dos conhecimentos acumulados na parte de Elétrica do Projeto Veículo Elétrico UFRJ, iniciado em 2010 com o objetivo de conceber um veículo elétrico utilitário para a Cidade Universitária da UFRJ. Revisam-se conceitos a respeito de baterias, motores elétricos, bem como estratégias de controle para máquinas elétricas. Propõe-se um controle orientado por campo, o qual servirá de base para a simulação do diferencial eletrônico, a verdadeira contribuição deste trabalho e que é um aditivo de importância para quando se desejar construir veículos elétricos com mais de um motor. As simulações são realizadas no ambiente do PSIM.

Palavras-chave: Veículos elétricos, Acionamento, Motor de ímãs permanentes com fluxo axial, Sistemas de controle, Diferencial eletrônico, PSIM.

Abstract of Final Project presented to Poli/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Electronic Differential for the UFRJ *campus'* Electric Utility Vehicle

Luiz Fernando Vieira Dias

March 2014

Advisors: Luís Guilherme Barbosa Rolim and Walter Issamu Suemitsu

Specialty: Control and Automation Engineering

This text is a resume of the major knowledge acquired in Electrical Devices in the context of the UFRJ Electric Vehicle Project, which started in 2010 and its product shall be an utility electric vehicle for the *Campus*. Concepts related to batteries and electric motors are revised, as well as control strategies for these machines. A field oriented control is proposed and used to validate the electronic differential simulations. This new feature, useful for vehicles with more than one motor, is the contribution of this paper to the Project. The simulations are run in PSIM's environment.

Keywords: Electric vehicles, Electric drives, Axial flux permanent magnet motor, Control systems, Electronic differential, PSIM.

Sumário

1	Introdução	1
I	Protótipo	3
2	Características gerais	4
3	Baterias	6
4	Motor	9
4.1	Motores de indução	9
4.2	Motores síncronos	10
4.3	VE/UFRJ: Motor síncrono com fluxo axial	11
5	Inversor e Controle	14
5.1	Transformada de Park e o controle orientado por campo (<i>FOC - Field Oriented Control</i>)	16
5.2	Resultados	20
II	Diferencial Eletrônico	23
6	Diferencial mecânico	24
7	Diferencial eletrônico	26
8	Considerações finais	32
III	Anexo	36

1 Introdução

A propulsão a partir de eletricidade é uma ideia antiga: em meados do século XIX surgiram os primeiros veículos elétricos (VEs), na forma de locomotivas e pequenas carroagens. Em 1901, Thomas Edison patenteou a bateria de Níquel-Ferro, uma das primeiras recarregáveis, enquanto que os VEs, nessa altura, já representavam 28% da frota norte-americana. Entretanto, o crescimento vindouro da indústria do petróleo e veículos a combustão mostrando-se mais vantajosos (na época) em termos de preço, velocidade e autonomia, fizeram com que estes se tornassem absolutos em adoção. A partir da crise do iniciada na década de 50, a “ideia” dos VEs passou a ser considerada novamente. Era interessante do ponto de vista das montadoras que seus produtos fossem menos sensíveis às variações no preço do óleo. Assim, em 1990, General Motors anuncia o EV1, seguida pelos seus principais pares ao longo da década: Chrysler (*TEVan*), Honda (*EV Plus*), Ford (*Ranger EV*), Nissan (*Altra EV*) e Toyota (*RAV4 EV*). Porém, mais uma vez, os veículos elétricos não vingaram.

O século XXI parece ser mais favorável aos VEs. O processo de conscientização ambiental da sociedade, a escalada dos preços do petróleo (continuidade da crise) e a evolução tecnológica estão sustentando lançamentos de veículos elétricos - as principais montadoras deste novo momento com os respectivos carros são a GM (*Chevy Volt*), Nissan (*Leaf*), Tesla Motors (*Roadster* e *Model S*) e BMW (*i3* e *i8*) - e tecnologias extremamente promissoras, envolvendo numerosos centros de pesquisa e universidades ao redor do globo. Na Universidade Federal do Rio de Janeiro, uma das iniciativas nesse sentido é o projeto Veículo Elétrico UFRJ (VE/UFRJ), mantido pela Decanato do Centro de Tecnologia, cujo objetivo é oferecer à Universidade um veículo elétrico utilitário, de pequeno porte (uma ou duas pessoas, mais carga), capaz de dar apoio a atividades de manutenção geral no *campus*, além de servir como base para o desenvolvimento de soluções próprias da UFRJ para VEs. É a este carro que o presente trabalho se refere. No escopo do projeto, ainda, foi desenvolvido o protótipo da Figura 1 para participação em competições de eficiência energética. Sua marca em 2012 foi de $194\text{km}/\text{kWh}$ ou, considerando o preço da eletricidade na cidade do Rio de Janeiro, R\$ 0,0021 por km .

O texto principal se divide em duas partes:

- Protótipo, na qual são apresentadas as características mecânicas, elétricas e uma proposta para o controle do VE/UFRJ;
- Diferencial Eletrônico, em que é explicado o princípio do diferencial

mecânico comum, sugerida uma configuração para fazê-lo eletrônico e apresentadas simulações que validem a proposta.

A principal referência é (MAGALLAN et al., 2008), da Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina. O grupo de eletrônica aplicada, ao qual os autores pertencem, e o departamento de mecânica da universidade desenvolveram um protótipo de veículo elétrico (*NEV - Neighborhood Electric Vehicle*, Figura 2) a fim de terem, tal como na UFRJ, uma plataforma de testes para novos controles e sistemas de automação. Existem diferenças técnicas entre os veículos da referência e deste trabalho, porém o desenvolvimento do diferencial eletrônico é bastante similar.



Figura 1: Protótipo do Projeto Veículo Elétrico UFRJ para competições de eficiência (2012).



Figura 2: Veículo elétrico da Universidad Nacional de Río Cuarto.

Parte I

Protótipo

Nesta Parte é apresentado o primeiro protótipo de veículo elétrico utilitário para a UFRJ, com maior ênfase no sistema elétrico de propulsão. O foco deste texto está sobre as tecnologias que são aplicadas no VE/UFRJ: baterias de íons de Lítio, motor de ímãs permanentes com fluxo axial e o inversor a MOSFET. Cada “bloco” destes é acompanhado de uma revisão das tecnologias similares e suas respectivas aplicações para veículos elétricos. A Parte II é dedicada ao desenvolvimento do diferencial eletrônico (DE). Contudo, como o Projeto não tem ainda definido um algoritmo de controle para o motor, sem o qual a proposta de um DE se torna vaga, esta primeira Parte termina com a apresentação de uma estratégia de controle orientado por campo.

2 Características gerais

Pela origem do Projeto Veículo Elétrico UFRJ, muito próximo da equipe de competição Minerva Baja (Figura 3a), decidiu-se que a primeira versão do utilitário seria baseada no veículo *off road* com estrutura em aço, o que reduz os custos com material e dificuldades com a usinagem das peças, se diferenciando do predecessor por ter apenas três rodas e, é claro, pela tração elétrica no lugar do motor a combustão interna (Figura 3b).



(a) Baja a combustão interna, 2013.



(b) Baja elétrico.

Figura 3: Baja elétrico (primeiro utilitário) e seu predecessor.

Tabela 1: Características mecânicas do primeiro protótipo.

Dianteira	
Freios	Hidráulicos a disco
Suspensão	Duplo A (<i>double wishbone</i>) com molas helicoidais e amortecedor a gás
Direção	Pinhão-cremalheira
Traseira	
Freio	Tambor acionado por cabo
Suspensão	Balança rígida com molas helicoidais e amortecedor a gás
Transmissão	Corrente e engrenagens, relação fixa

Para versões posteriores do veículo, melhorias desejáveis seriam: que a direção fosse do tipo elétrica, mais leve, compacta e confiável; a suspensão traseira com feixe de molas planas, ideal para veículos sujeitos a grandes

variações de carga (HEISLER, 2002), como um utilitário; e que fosse **eliminada a transmissão, instalando-se motores elétricos diretamente acoplados às rodas, com diferencial eletrônico**, objetivo deste Projeto.

Apresentadas as características mecânicas atuais e desejadas, segue um diagrama (Figura 4), qualitativo, de propulsão para um VE genérico, inclusive o da UFRJ. Outros veículos elétricos podem se apresentar de maneira diferente. O Toyota Prius (híbrido) tem um conversor elevador (*boost*) entre a bateria, de 200 V, e o inversor, que requer 650 V. Outro híbrido, o Chevrolet Volt, tem um motor a combustão interna que serve exclusivamente como gerador para a bateria, de maneira que em sua arquitetura encontram-se elementos como o próprio motor a combustão interna, um inversor e um retificador extras.

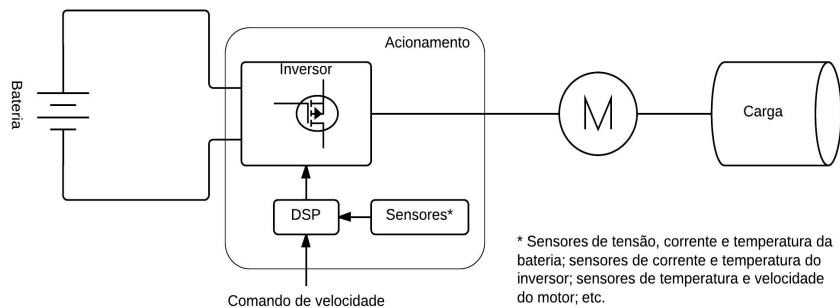


Figura 4: Sistema de propulsão elétrica para um VE genérico, baseado em (MOHAN, 2003). DSP é sigla para *Digital Signal Processor*.

Não estão sendo explicitados, porém existem e são necessários, os elementos de resfriamento/ventilação; de proteção contra surtos de corrente e/ou tensão e de filtragem no inversor - capacitores no elo de corrente contínua para evitar picos rápidos de tensão, devido ao rápido chaveamento (Ldi/dt), e filtros LC para reduzir harmônicos na saída, que causam sobreaquecimento e aumento das perdas em máquinas elétricas. Na Figura 5 um gráfico com o “peso” de cada componente no custo do veículo híbrido.

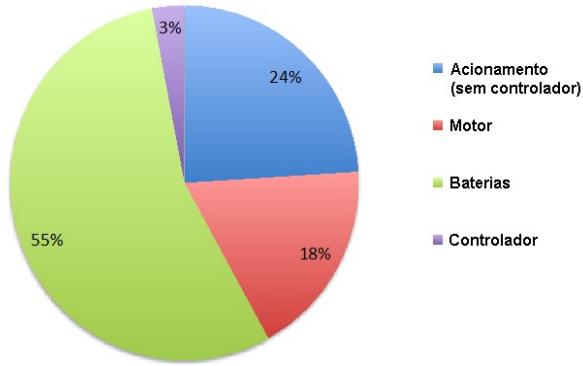


Figura 5: Participação de cada componente do diagrama anterior no custo do veículo híbrido (TECHNOLOGY..., 2011).

3 Baterias

Dos diversos tipos de bateria disponíveis no mercado, a citar: Chumbo-Ácido, Níquel-Cádmio (NiCd), Níquel-Metal-Hidreto (NiMH) e íons de Lítio, estas são as que apresentam a melhor relação entre densidade de energia, tensão por célula e quantidade de ciclos carga-descarga, tornando-as ideais para aplicações de alto desempenho. Demandam, todavia, um circuito de proteção (*BMS - Battery Management System*) e maiores cuidados em relação a níveis mínimos de carga¹. As de Chumbo-Ácido, comuns no mercado brasileiro, são menos exigentes quanto aos cuidados, porém a densidade de energia é baixa e o número de ciclos é limitado (BUCHMANN, b), tornando-as menos atraentes para aplicação em VEs de maior porte (em bicicletas elétricas ainda é comum encontrar este tipo de bateria). Em todos os tipos citados, a temperatura máxima de operação se dá na faixa de 60 °C (BUCHMANN, d).

Este Projeto adotou baterias de íons de Lítio. Antes de prosseguir, no entanto, convém observar a diferença entre baterias baseadas no metal Lítio e nos íons de Lítio. Nas primeiras, os ciclos produziam dendritos indesejados no anodo e que poderiam penetrar no separador, causando curtos elétricos. A temperatura da célula, então, se elevaria abruptamente e atingiria o ponto de fusão do metal, causando um descontrole térmico. Essa instabilidade inerente ao metal Lítio, especialmente durante a carga, conduziu a pesquisa a uma solução não-metálica aplicando os íons de Lítio. Apesar de menor energia específica que o metal, Li-íon é um tipo mais seguro, embora não

¹

dispense cuidados: uma bateria de íons de Lítio apresenta tensão por célula próxima a 3,3V e, em geral, os dispositivos de segurança interrompem o fluxo de corrente quando este nível de tensão chega a 3,0 V. Se a descarga prosseguir abaixo de 2,7 V por célula, o conjunto pode já não ser recarregável através do equipamento comum para tal (BUCHMANN, a). Na Figura 6, a estrutura de uma bateria baseada em íons de Lítio.

Compõe-se de um catodo (um óxido metálico), um anodo (Carbono poroso) e um eletrólito como condutor (Figura 6).

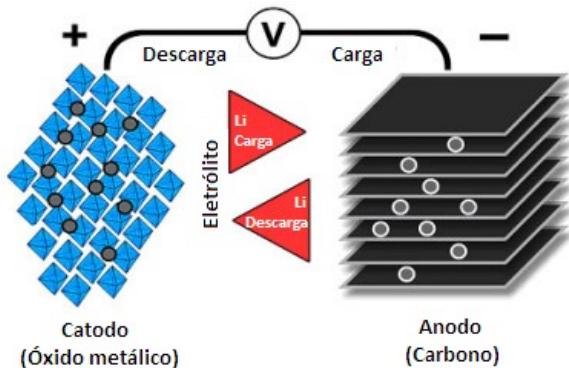


Figura 6: Fluxo de elétrons na bateria de íon-Lítio (traduzida de (BUCHMANN, c)).

Todos os materiais numa bateria possuem uma energia específica, e a chave para uma alta capacidade e uma grande entrega de potência reside, em princípio, no catodo, o qual passou a caracterizar a bateria Li-íon (BUCHMANN, c). Materiais comuns são: Óxido de LiNiCoAl, Óxido de LiNiMnCo, Manganato de Lítio, Titanato de Lítio, Fosfato de Ferro-Lítio e outros (Figura 7). Dada a crescente importância do armazenamento de energia para eletrônicos, VEs e as modernas redes de distribuição de energia, tornam-se cada vez mais frequentes as novidades, oriundas de pesquisas mundo afora, a respeito de tecnologia de baterias, especialmente Li-íon. Em 2013, a Tesla Motors depositou duas patentes, (STEWART et al., 2013a) e (STEWART et al., 2013b), sobre um arranjo com dois tipos de baterias, Li-íon e metal-alumínio (onde o metal pode ser Lítio, Zinco, Alumínio, Vanádio, entre outros), a ser desenvolvida em conjunto com a Panasonic de maneira a estender a autonomia de um carro como o *Model S* em até 40%, ou seja, seria possível percorrer mais de 600 km entre cargas.

A composição dos armazenadores do VE/UFRJ é Fosfato de Ferro-Lítio ($LiFePO_4$ ou simplesmente LFP). São dois conjuntos de 48 V e 20 Ah cada, ligados em série e portanto dobrando a tensão nominal para 96 V, mantendo

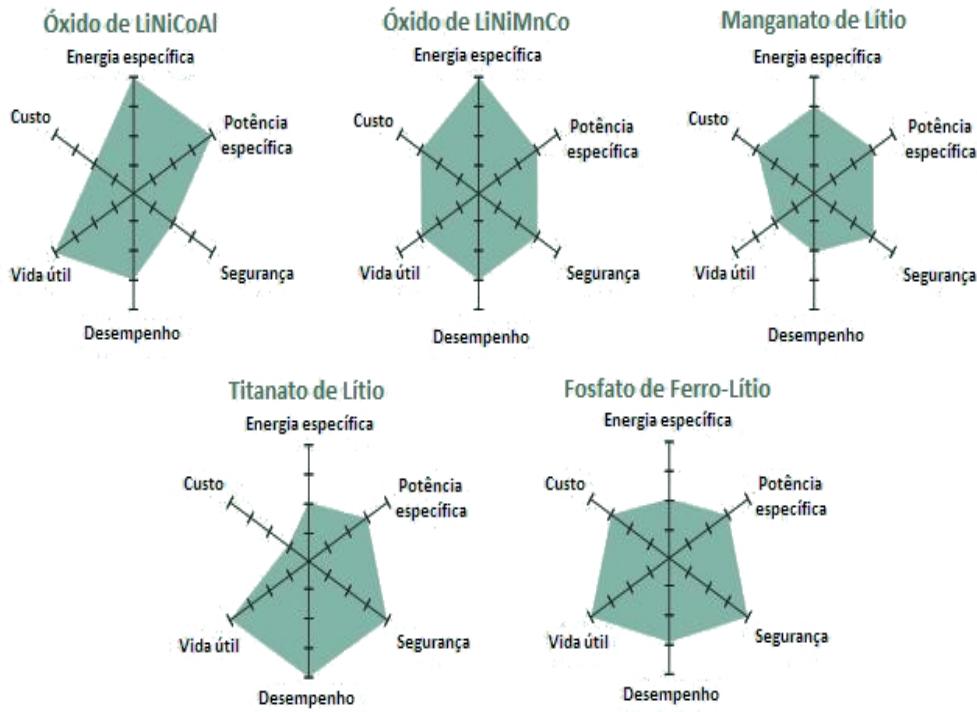


Figura 7: Comparativo das diversas composições químicas das baterias de íons de Lítio em relação à segurança, preço, desempenho, energia específica e vida útil (traduzida de (DINGER et al., 2010)).

a capacidade de 20 Ah , com taxa de descarga² 5 C . Esta última especificação significa que, dada uma bateria de capacidade igual a 20 Ah e descarga a 1 C , é possível drenar 20 A durante uma hora. A 5C , drena-se 100 A por aproximadamente 12 minutos (não é uma relação perfeitamente linear se considerar as perdas por resistência interna, por exemplo). Segundo os dados de venda, a corrente de pico é de 180 A . O custo de cada conjunto, enviados da China, foi de US\$ 856, sendo US\$ 528 pelas células (32), US\$ 283 pelo BMS e US\$ 45 pelo *case*. Impostos e frete não inclusos.

²A taxa de descarga remete ao trabalho de Charles Agustin de Coulomb (1736-1806). Convém observar, todavia, que essa unidade “C” para medir a taxa de descarga não é o Coulomb do SI, tampouco é uma unidade padronizada.

4 Motor

Os motores a combustão interna não são todos iguais. Existem os monocilíndricos, em linha, em V, W, H, U, etc. Para motores elétricos também existe uma extensa classificação, mas que em princípio pode ser reduzida para motores de indução e motores síncronos. Existem, é claro, os motores de corrente contínua com escovas, porém não serão abordados por não serem comumente aplicados a veículos. Além dos dois primeiros, esta Seção aborda o tipo específico do VE/UFRJ: motor síncrono com fluxo axial.

4.1 Motores de indução

Na segunda metade do século XIX, Nikola Tesla e Galileo Ferraris inventaram, separadamente, os primeiros motores a indução. Nestes o rotor não tem ímãs - apenas lâminas de aço “empilhadas” com condutores periféricos incrustados. As correntes que circulam nos enrolamentos do estator produzem um campo magnético girante que entra no rotor; a frequência desse campo magnético como “percebida” pelo rotor é igual à diferença entre a frequência elétrica aplicada e a frequência de rotação mecânica - conceito de escorregamento. Assim, há uma tensão induzida através da estrutura do estator que é proporcional à essa diferença de frequências. Em resposta a essa tensão, correntes são produzidas no interior dos condutores do rotor e estas interagem com o campo magnético, produzindo o torque desejado.

Quando um motor de indução trifásico é conectado a uma rede elétrica, torque é produzido e consequentemente a máquina pode ser partida com carga, sem a necessidade de um inversor. Com este dispositivo (mesmo em malha aberta) já se torna possível alimentar um motor de indução a partir de uma bateria e também operar com velocidade variável, apenas alterando a frequência de saída do conversor. Com laços de realimentação, a regulação de torque e velocidade é melhorada e os motores de indução tornam-se competitivos em relação aos de corrente contínua para aplicações veiculares. O EV1 (Figura 8), da General Motors, foi o primeiro produzido em grande escala para o público, e contava com um motor de indução de 102kW. O mais recente Tesla Model S, o híbrido Toyota Prius e o veículo elétrico da Universidad Nacional de Río Cuarto também dispõem deste tipo de máquina.



Figura 8: EV1, da General Motors.

4.2 Motores síncronos

Máquinas síncronas têm em seus rotores dois ou mais ímãs permanentes que geram um campo magnético o qual entra no núcleo do estator (nas direções radial, axial ou transversa) e interage com correntes fluindo no interior dos enrolamentos para produzir torque entre o rotor e o estator. Enquanto o rotor gira, é necessário que a magnitude e polaridade das correntes do estator sejam continuamente variadas - de uma maneira específica através de um inversor - de modo que o torque permaneça constante e a conversão de energia seja ótima. O Nissan Leaf, veículo elétrico líder de vendas no mundo, possui um motor síncrono de 80kW. O mais recente Chevrolet Volt também conta com este tipo de motor.

Entre as máquinas síncronas é possível encontrar as chamadas *PMSM* (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) e as *BLDC* (*Brushless DC*). A diferença entre elas está na forma de onda da força contraeletromotriz: o PMSM a tem senoidal, enquanto que o BLDC a tem trapezoidal. Caso se utilizasse controle escalar, para se reproduzir uma onda trapezoidal na excitação bastaria energizar duas fases por vez. Para se reproduzir uma senoide, as três fases deveriam ser energizadas simultaneamente. Neste projeto, contudo, utiliza-se uma estratégia de controle vetorial (Capítulo 7). O ME0913 é um PMSM.

Comparando-se máquinas de indução e síncronas, estas são mais fáceis de arrefecer, já que menos calor é gerado no rotor. Nos motores de indução, por sua vez, o campo magnético é ajustável (uma vez que é proporcional à razão entre velocidade e frequência) enquanto que os ímãs permanentes



Figura 9: Nissan Leaf.

impossibilitam isso. Em termos práticos, a eficiência média dos motores a indução pode ser melhor que a dos síncronos (dependendo da forma de acionamento), embora a eficiência máxima destes seja superior - o inversor pode operar com fator de potência unitário, o que não acontece com os outros. Por fim, ímãs permanentes são mais caros, bem como os conversores para essas máquinas. Ainda, as de indução requerem menos proteção, já que produzem pouca ou nenhuma tensão quando a excitação é retirada.

4.3 VE/UFRJ: Motor síncrono com fluxo axial

Em comparação às máquinas de fluxo radial, as de fluxo axial apresentam maior densidade de potência, resultando em menos material no núcleo e portanto menos perdas; menores proporções, com rotores e estatores na forma de disco, tornando-os atraentes para aplicações em que forma/espaço sejam fatores críticos, como veículos elétricos; menores vibração e ruído (CAVAGNINO et al., 2002). O motor ME0913 (Figuras 10 e 11), empregado no VE/UFRJ, pertence a esta subcategoria, com ímãs permanentes incrustados no rotor, que é montado entre dois estatores sem ranhuras.

As máquinas de fluxo axial são classificadas consoante ao rotor, podendo ser de indução, caso tenha uma estrutura do tipo gaiola de esquilo; ou de ímãs permanentes, internos ou sobre a superfície do rotor. Os estatores podem ser lisos ou segmentados, e as peças podem se dispor de várias maneiras: um estator e um rotor, dois estatores e um rotor, um rotor e dois estatores, etc. Estas configurações multiestágios, intercalando estatores e rotores, permitem o aumento do torque, proporcional ao diâmetro externo, em máquinas menores (AYDIN; HUANG; LIPO, 2004). Na configuração mais simples, de

um rotor e um estator, a máquina se sujeita a uma força axial, exercida pelos ímãs do rotor sobre o estator, a qual pode danificá-la estruturalmente. Ajustes no controle da máquina, como o proposto por (LIU et al., 2003), podem minimizar este problema.



Figura 10: ME0913. A foto da direita foi retirada do forum em *DIY Electric Car* onde era discutida a construção de uma motocicleta com este motor.

Os estatores do ME0913 são estruturas de aço enroladas em tiras. Enrolamentos distribuídos e ligados pelas extremidades são colocados ao redor do núcleo. Um material não magnético, como resina epóxica, é usado para preencher os espaços dos enrolamentos do estator para aumentar a robustez e melhorar a condução térmica. O rotor, por sua vez, é formado por ímãs permanentes de NdFeB e um eixo. Um material não-magnético (Alumínio, por exemplo) preenche o espaço entre os ímãs, formando a estrutura de sustentação da peça. A ausência de ferro no rotor permite uma relação elevada entre potência e inércia, uma outra vantagem (AYDIN; HUANG; LIPO, 2004).

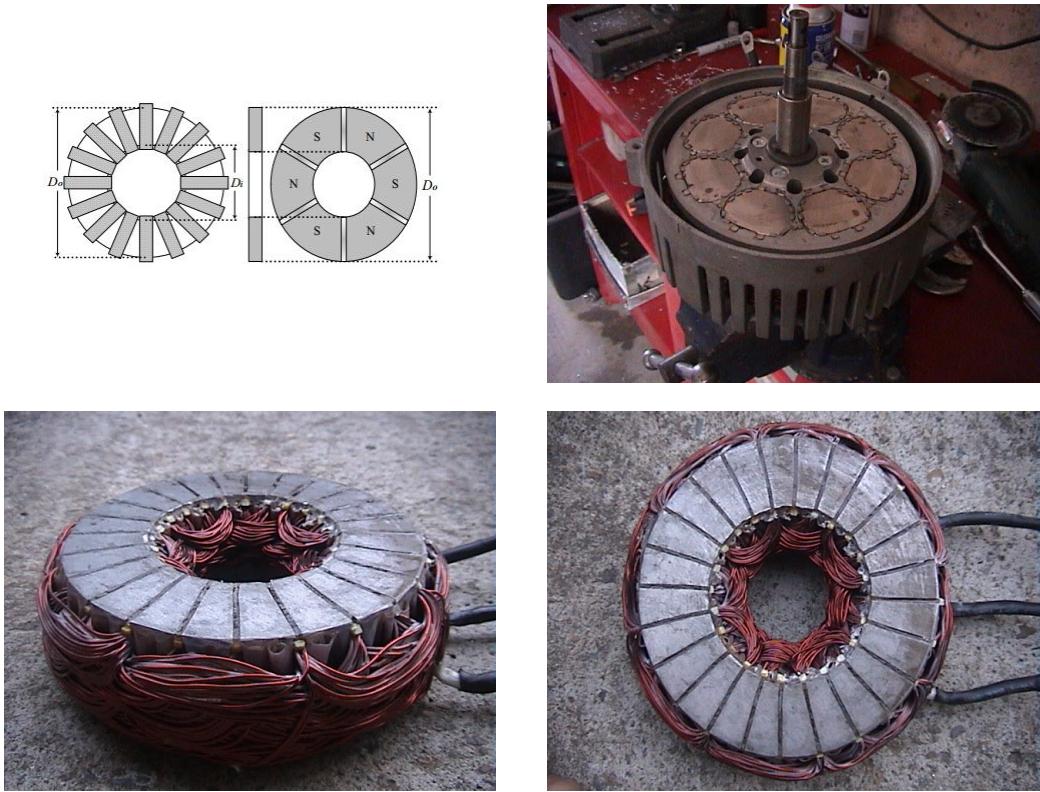


Figura 11: Visão mais detalhada do rotor e estatores da máquina do VE/UFRJ. A ilustração (AYDIN; HUANG; LIPO, 2004) mostra o estator e o rotor, respectivamente, e as fotos reais mostram com mais detalhes o rotor e os estatores. Foram retiradas do mesmo forum citado anteriormente.

Tabela 2: Características do motor ME0913.

Gerais		Elétricas	
Potência	$12kW$ ($30kW_p$) a $96V$	Polos	4
Velocidade	Zero a 5000 RPM	RPM/V	50
Eficiência	> 85%	Corrente	$125 A$ ($400 A_p$)
Sensores	Hall (3) e temperatura (KTY84/130)	Nm/A	0,18
Operação	-40 a 40 °C (ambiente)	Ligaçāo	Y
Peso	17 kg	$R_{fase-fase}$	0,0125 Ω
Preço	US\$ 749	$L_{fase-fase}$	100 μH

5 Inversor e Controle

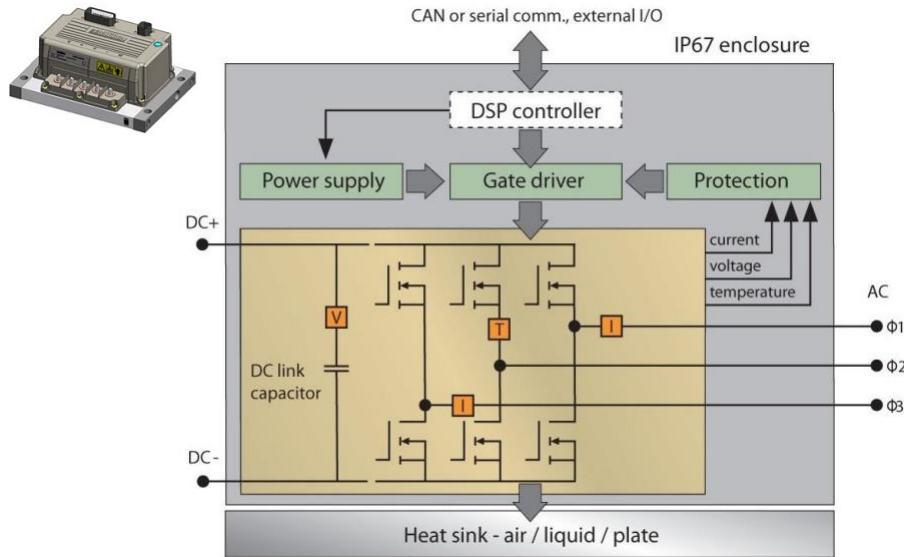


Figura 12: O protótipo atual dispõe de um inversor LV SKAI 2 que contém um inversor a MOSFET, um DSP Texas Instruments F28335, instrumentação própria e um dissipador de calor. Mais informações no Anexo.

O inversor, ou *drive*, de um motor elétrico é o equipamento responsável por transformar a energia acumulada nas baterias - ou tomar energia de uma rede de alimentação - de maneira a controlar velocidade e torque das máquinas conectadas a ele. Usualmente é composto por:

1. **Retificador**, caso a alimentação dele seja em corrente alternada;
2. **Inversor de potência** composto por chaves semicondutoras controladas que, a partir de um sinal de controle (PWM, a citar), geram pulsos de energia os quais na carga indutiva do motor se tornam a forma de onda apropriada;
3. **Controle**, usualmente um microprocessador, responsável por adquirir os sinais de referência e de estado, gerando os sinais de comando apropriados;
4. **Proteção contra surtos e Instrumentação**, em geral para leitura das correntes e tensão de alimentação para a máquina, velocidade, temperatura, entre outras variáveis.

A característica $V - I$ do MOSFET têm duas regiões distintas: uma de resistência constante ($R_{DS(on)}$) e uma de corrente constante. $R_{DS(on)}$ é um parâmetro importante pois determina a queda em condução, que para MOSFET's sob altas tensões é grande. No entanto, para essas aplicações, o MOSFET é, na verdade, uma conexão em paralelo de vários dispositivos menores. Em contrapartida às perdas de condução, as perdas de chaveamento são muito pequenas devido ao curto tempo de chaveamento. Por ser um dispositivo unipolar, não se verificam problemas de atraso por causa de portadores minoritários, sendo o tempo de chaveamento determinado pela capacidade do *drive* de carregar e descarregar a pequena capacitância de entrada (capacitância de Miller): $C_{ISS} = C_{GS} + C_{GD}$. Outra propriedade importante é o coeficiente de temperatura positivo: o efeito da resistência é distribuir a corrente por toda a área do dispositivo, reduzindo a possibilidade de dano por concentração de calor em uma determinada parte (BOSE, 2002). Alternativamente, o *drive* poderia ser baseado em IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), porém suas vantagens de poderem ser aplicados em potências mais elevadas e com maior frequência de chaveamento não são necessárias para o VE/UFRJ. Ainda, o uso de IGBT representa circuitos mais complexos, com a presença de (pré-)*drives* de corrente na base e sensores para a rápida detecção e proteção do dispositivo contra falhas de sobrecorrente (RASHID, 2001).

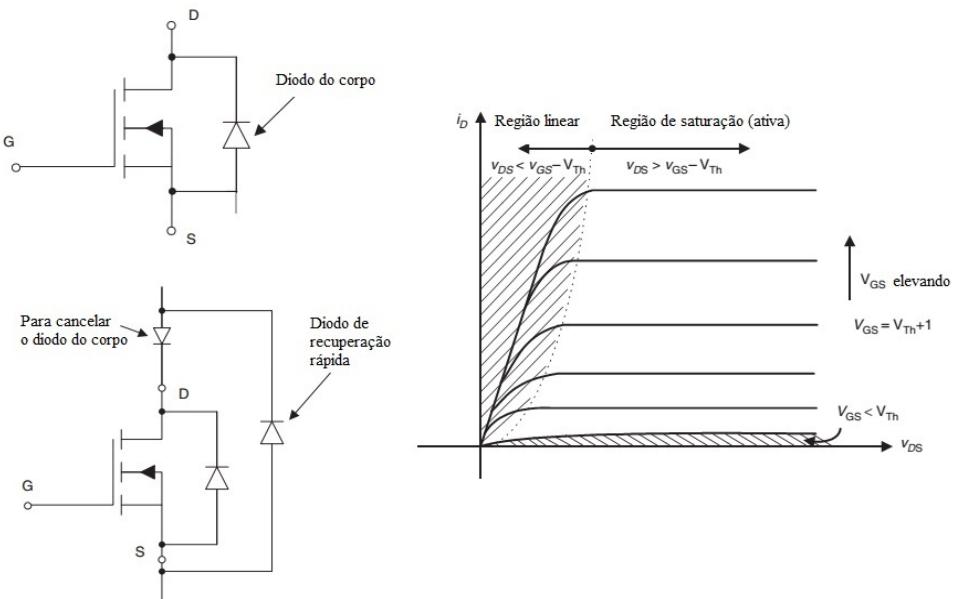


Figura 13: Representação de um MOSFET tipo N e sua curva V-I. Traduzido de (RASHID, 2001).

Até a data deste texto não havia nenhuma estratégia de controle definida, porém, antes do veículo contar com dois ou mais motores e diferencial eletrônico, faz-se obviamente necessária uma proposta quanto ao controle para o caso-base (um motor). Cada motor extra contará, individualmente, com um *drive* e este mesmo esquema de controle, modificado em relação ao caso-base tão-somente pelo sinal de referência, que passa a considerar os efeitos de curva. Para máquinas síncronas de ímãs permanentes, as técnicas de controle orientado por campo e controle direto de torque são as que apresentam melhor desempenho. Desenvolvidas nas décadas de 70 e 80, respectivamente, são estratégias de controle vetorial, alternativas ao controle escalar (baseado em manter constante a relação V/f).

5.1 Transformada de Park e o controle orientado por campo (*FOC - Field Oriented Control*)

A modelagem matemática de máquinas elétricas não é algo simples: as equações guardam complexidade por levar em conta tanto as correntes de estator quanto de rotor e as indutâncias próprias e mútuas entre estes enrolamentos, sendo estas variantes no tempo. O tratamento usual para contornar este tipo de equacionamento é aplicar uma transformação de variáveis que conduz a uma simplificação do modelo. A primeira proposta foi apresentada por R. H. Park para máquinas síncronas e ficou conhecida como Transformada de Park. Nesta transformação, não-linear, o novo referencial (no caso, solidário ao rotor) desloca-se em relação ao referencial original (STEPHAN, 2008). Os eixos direto, quadratura e zero (este apenas um artifício matemático para permitir a inversão da transformada) são dados por:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta - \frac{2\pi}{3} & \cos \theta + \frac{2\pi}{3} \\ -\sin \theta & -\sin \theta - \frac{2\pi}{3} & -\sin \theta + \frac{2\pi}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Sendo a , b e c o referencial trifásico original e $\theta = \omega t + \delta$ o ângulo entre a parte rotativa e estacionária em cada instante de tempo; δ a defasagem inicial. A Figura 14 ilustra como se dispõem esses eixos para o ME0913. Os eixos vermelhos, $\alpha\beta$, são estacionários e definidos pela Transformada de Clarke a partir de abc (projeção). O eixo azul é solidário ao rotor. Matematicamente é intuitivamente plausível considerar que a Transformada de Park seja uma extensão da de Clarke, embora historicamente a de Park seja anterior - 1929, e Clarke de 1943.

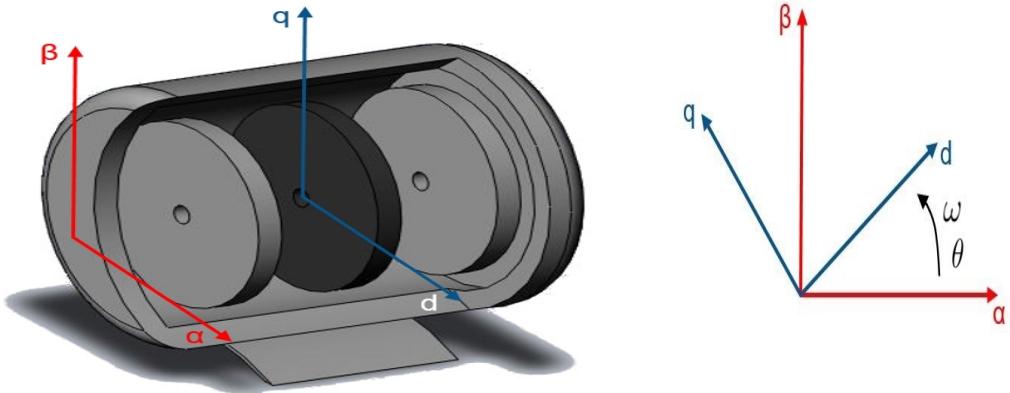


Figura 14: Definição dos eixos no motor. Os eixos $\alpha\beta$ são estacionários, enquanto que os eixos direto e de quadratura do rotor (disco mais escuro) movem-se solidários a este. As variáveis ω e θ indicam a velocidade e posição angulares do rotor em relação aos eixos estacionários.

Este “desvio” do assunto de controle foi necessário pois o controle orientado por campo, concebido por Blaschke, é a técnica adotada para este trabalho e é desenvolvida sobre a Transformada de Park. As equações, já nesta notação, para o motor síncrono:

$$\frac{d}{dt}i_d = -\frac{R_s}{L_d}i_d + \omega_r \frac{L_q}{L_d}i_q + v_d \quad (5.2a)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = -\frac{R_s}{L_d}i_q - \omega_r \frac{L_d}{L_q}i_d - \frac{1}{L_q}\phi_f\omega_r + v_q \quad (5.2b)$$

$$\phi_d = L_d i_d + \phi_f \quad (5.2c)$$

$$\phi_q = L_q i_q \quad (5.2d)$$

A variável ϕ_f é o campo magnético dos ímãs permanentes. Pela equação 6.2c, se i_d for igual a zero, então o fluxo enlaçado ϕ_d torna-se fixo (devido aos ímãs permanentes) e o torque, por sua vez, máximo (MERZOUG; NACERI, 2008):

$$\tau_e = \frac{3}{2}P\phi_f i_q \quad (5.2e)$$

Outra forma de interpretar isso é lembrando que, com um campo magnético fixo dos ímãs permanentes, o torque é produzido a partir da interação deste

com o campo magnético gerado pelas correntes que circulam na armadura. Será máximo quando os campos forem ortogonais entre si (STEPHAN, 2008).

Modificações dessa estratégia de controle, como o controle vetorial do fluxo direto (BOJOI et al., 2010), podem ser menos sensíveis em relação à parametrização da máquina, tal como o DTC, mais estável - variações rápidas de tensão no elo de corrente contínua, como as causadas por uma frenagem, podem produzir instabilidade com outros controles - e com uma melhor característica de torque, numa operação chamada de enfraquecimento *profundo* de campo. Mesmo assim, o FOC em sua forma mais usual é suficiente para este texto. Para a simulação, optou-se pelo *software* PSIM, que já dispõe de um circuito-exemplo para aplicação muito similar à deste texto, cuja simulação (Figura ??) será detalhada a seguir.

Representação das baterias, inversor e motor (com os parâmetros do ME0913):

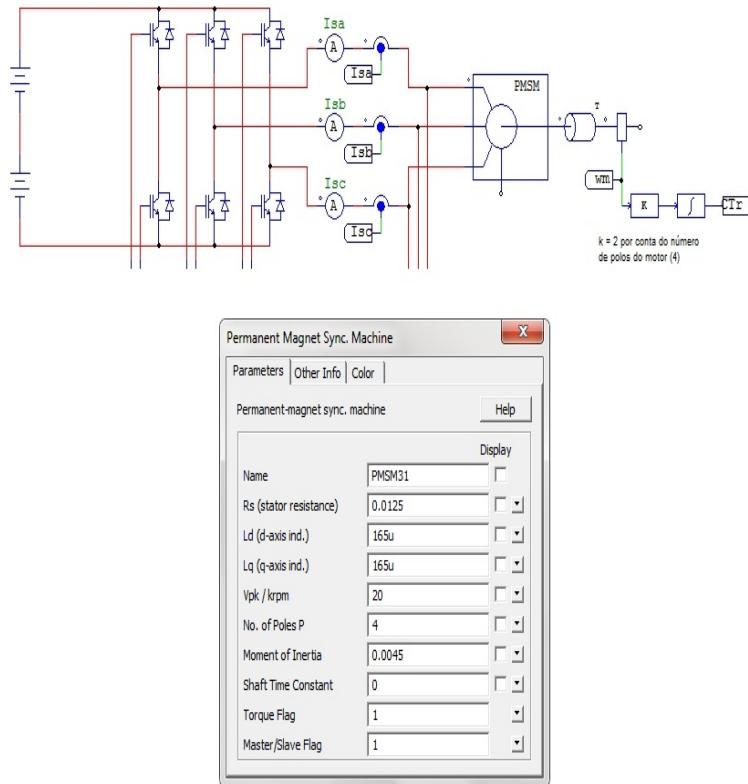


Figura 15: Baterias (96 V), inversor e motor.

A medida de velocidade para o caso real também não é realizada exatamente como da forma ilustrada. Na verdade, aplicam-se encoders para tal.

Transformada de Park. O *drive* SKAI fornece apenas a leitura de corrente de duas das fases (Figura 15). Embora a terceira possa ser deduzida, nesta simulação será assumido que há leitura direta:

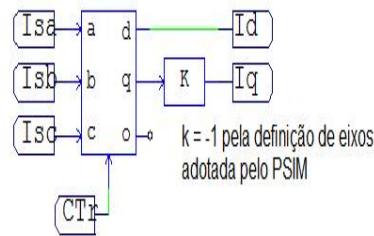


Figura 16: Transformação da leitura das correntes em abc para $dq0$ no PSIM..

Controle para o eixo direto:

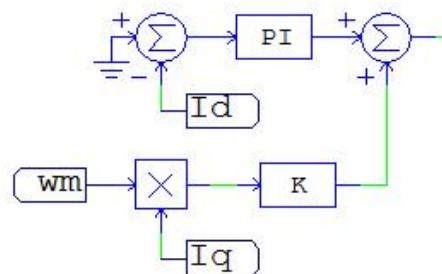


Figura 17: Referência de tensão no eixo direto no PSIM. Notar a referência nula para a corrente.

Controle para o eixo de quadratura e transformada inversa de Park nas Figuras ?? e ??, respectivamente.

Em circuitos eletrônicos muitas vezes é difícil construir um modelo matemático fiel e que ajude na determinação analítica dos ganhos dos controladores. As chaves de potência são absolutamente não-lineares e pode-se contar como certa a presença de incertezas nas fontes, cargas e outros parâmetros do circuito, além de contar com os tempos de recuperação dos componentes, que podem não ser negligenciáveis.

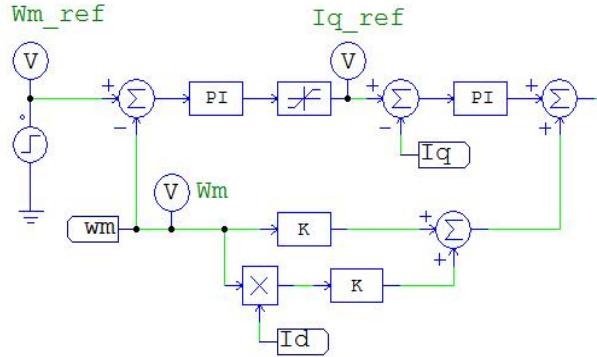


Figura 18: Referência de tensão no eixo quadratura no PSIM.

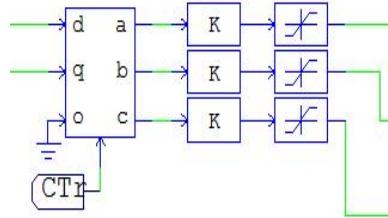


Figura 19: Transformação da leitura das correntes em $dq0$ para abc no PSIM. CTr é o θ do modelo matemático, posição instantânea dos eixos móveis em relação aos eixos estacionários - ver Figura 14.

5.2 Resultados

É possível observar que os blocos exibidos anteriormente simulam um controle contínuo. Porém, como este será executado por um DSP, é de interesse verificar se o mesmo controle, agora digitalizado, permanece funcional. O PSIM dispõe da ferramenta *s2z converter*, que auxilia neste processo, um dos primeiros necessários para a codificação automática dos blocos em linguagem C para o microprocessador, através da ferramenta *SimCoder*. Para o caso de interesse, a conversão consiste na modificação dos PI's e introdução de *Zero-Order Holders*, com frequência de amostragem de 16 kHz em função do DSP F28335.

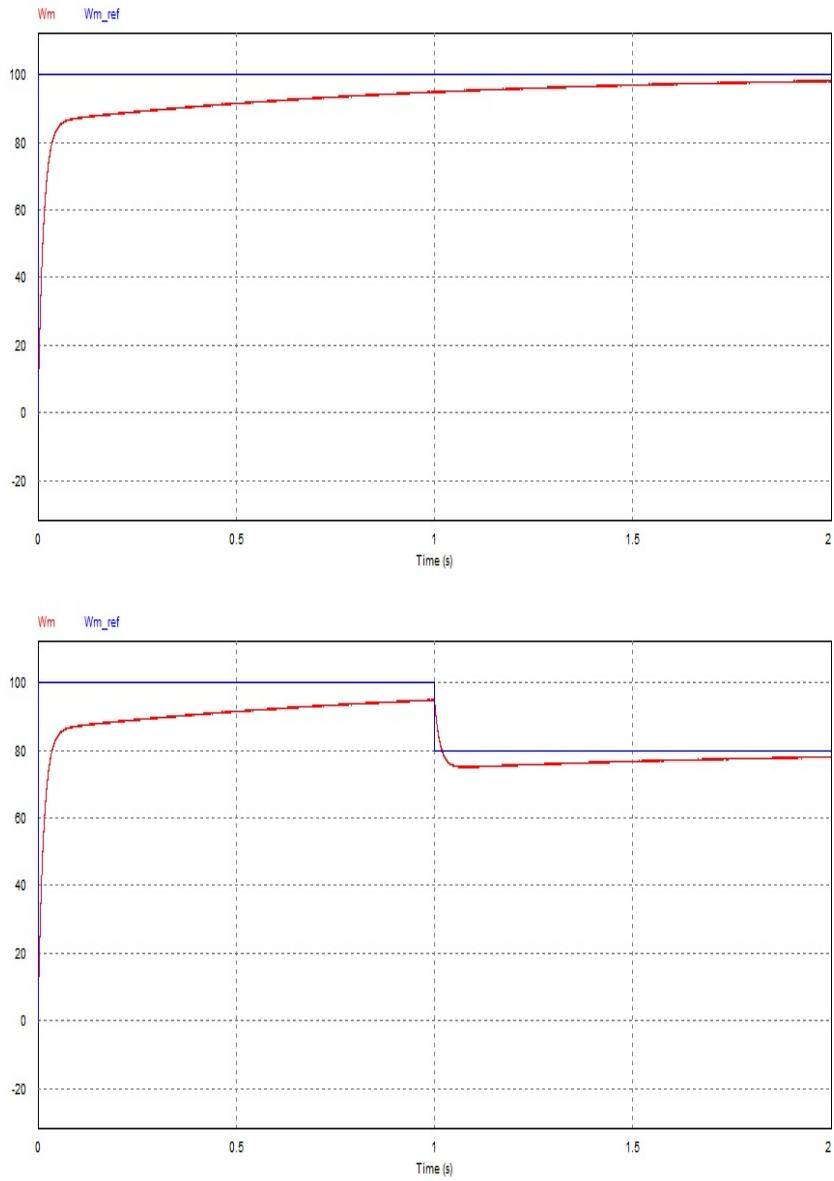


Figura 20: Exemplo de simulação com o controle descrito.

As figuras acima são apenas um exemplo para comprovar a funcionalidade do controle. Convém observar que o sensor de velocidade nesta simulação tem ganho próximo de $1/10$, ou seja, em $2s$ o motor atinge cerca de 1000 RPM, uma aceleração bastante brusca, talvez sequer possível de realizar. Neste ponto reside a principal crítica a este trabalho: como o objetivo final é

propor um diferencial eletrônico, a parte de controle recebeu menos atenção do que o devido. Para que fosse bem feita deveriam ser realizados diversos ensaios com o motor, considerações sobre as condições operacionais, rampa de aceleração ideal, etc. Porém, independente do controlador adotado ser o melhor ou não, ou mesmo factível, a proposta de diferencial eletrônico não é alterada, pois na configuração detalhada na próxima Parte o diferencial é anterior ao controle, ele é quem fornece as referências de velocidade.

Parte II

Diferencial Eletrônico

Na descrição das características gerais do VE/UFRJ, afirmou-se a conveniência de se eliminar a transmissão, instalando-se motores elétricos diretamente acoplados às rodas traseiras, motivando o desenvolvimento de um diferencial eletrônico. Esta parte, então, começa com uma revisão do que é o diferencial num veículo qualquer e como pode ser um diferencial eletrônico, baseado em (MAGALLAN et al., 2008). Em seguida é proposto e simulado um DE para o utilitário da Cidade Universitária, aproveitando o controle implementado na Parte anterior.

6 Diferencial mecânico

Em sistemas de tração convencionais o motor (a combustão interna ou elétrico, caso este seja unitário no veículo) transmite a força de propulsão através do diferencial mecânico. Esse mecanismo consiste em um conjunto de engrenagens que basicamente aplicam o mesmo torque em ambas as rodas de tração, permitindo que assumam diferentes velocidades para balancear o torque opositor. As principais desvantagens do sistema são as perdas por fricção e a incapacidade de controlar o torque em cada roda de maneira independente (MAGALLAN et al., 2008).

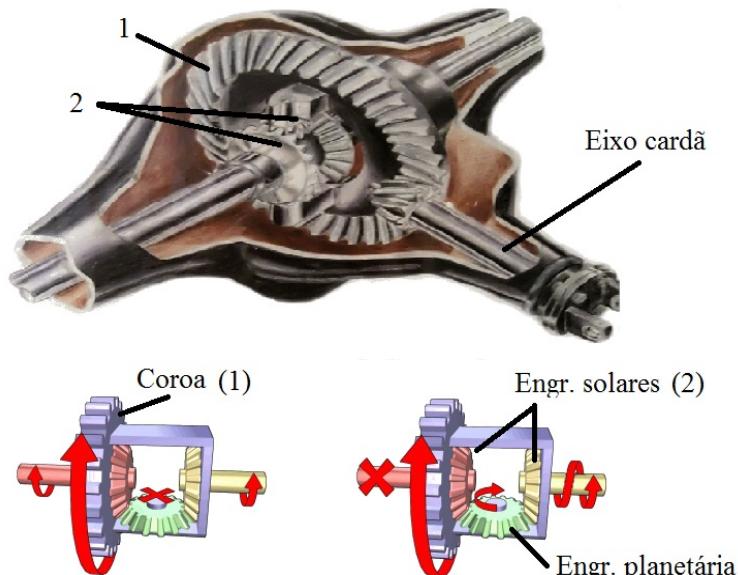


Figura 21: Modelo de diferencial mecânico comumente encontrado em automóveis.

No diagrama inferior esquerdo da Figura 21: o eixo cardã aplica o torque à coroa, girando toda a peça (azul). Esta, e portanto a transmissão, se conecta aos eixos vermelho e amarelo - engrenagens solares, conectadas às rodas esquerda e direita, respectivamente - através da engrenagem planetária (verde). Se a resistência sobre ambas as rodas é idêntica, caso de uma linha reta, a coroa gira sem virar sobre seu próprio eixo, e as rodas giram na mesma velocidade. Caso alguma roda encontre resistência ao movimento, a engrenagem planetária gira permitindo que a roda sob resistência diminua sua velocidade em relação à roda oposta.

Considerando que o veículo realiza a curva a baixa velocidade, sendo

possível negligenciar forças laterais e derrapagens das rodas de tração, o modelo geométrico proposto por Ackerman e Jeantad na Figura 22 pode ser utilizado.

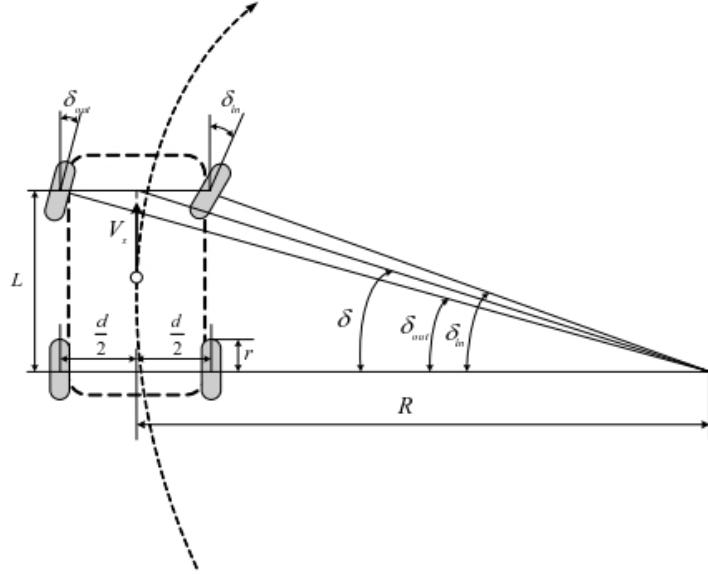


Figura 22: Geometria de Ackerman e Jeantad. Retirado de (MAGALLAN et al., 2008).

O modelo permite determinar o raio da curva (R) a partir dos ângulos de direção (δ_{in} e δ_{out}) e então as velocidades angulares que cada roda de tração deve alcançar (ω_{in} e ω_{out}):

$$\tan \delta_{out} = \frac{L}{R + \frac{d}{2}} \quad (6.1a)$$

$$\tan \delta_{in} = \frac{L}{R - \frac{d}{2}} \quad (6.1b)$$

Para pequenos ângulos δ , pode-se considerá-los um único parâmetro, chamado de ângulo de Ackerman:

$$\delta = \frac{\delta_{out} + \delta_{in}}{2} \quad (6.1c)$$

$$\tan \delta = \frac{L}{R} \quad (6.1d)$$

A velocidade angular para cada roda de tração pode ser expressada como funções da velocidade linear (V_x) e o ângulo de Ackerman (δ):

$$\omega_{in} = \frac{V_x}{r} \left(1 - \frac{d \tan \delta}{2L} \right) \quad (6.1e)$$

$$\omega_{out} = \frac{V_x}{r} \left(1 + \frac{d \tan \delta}{2L} \right) \quad (6.1f)$$

7 Diferencial eletrônico

Inspirado em (MAGALLAN et al., 2008), um diagrama de blocos para o diferencial eletrônico seria:

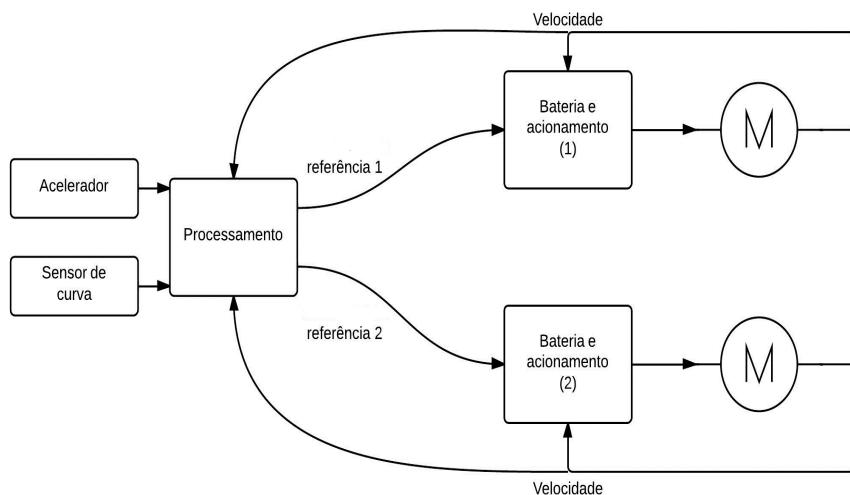


Figura 23: Diagrama de blocos para um diferencial eletrônico.

Supõe-se que os dois motores são iguais (não necessariamente iguais ao ME0913), bem como os blocos de bateria e acionamento para cada máquina. O que é modificado em relação ao esquema de controle original é a procedência do sinal de referência de velocidade: o acelerador eletrônico e o sensor de curva estão conectados a uma unidade de processamento que dispara o sinal de referência de velocidade para cada bloco de acionamento. Se o sinal do sensor de curva for nulo, a referência de velocidade é igual para as duas máquinas. Caso contrário, o sinal de referência é diferenciado entre as duas. O pesquisador argentino argumenta que centralizar as variáveis em

um único DSP, que aciona os dois inversores, aumenta a confiabilidade e robustez. No entanto, o *drive* SKAI, adotado para o VE/UFRJ, aciona apenas um motor e tem seu próprio DSP. Com dois motores seriam necessários dois *drives* e, consequentemente, dois DSP's. A contextualização do diferencial eletrônico acima para o caso de interesse poderia ser "sobrecarregando" um dos DSP's (por exemplo o número 1) com a tarefa de receber o sinal do sensor de curva e disparar a referência de velocidade tanto do seu motor (1) quanto do motor complementar (2). Uma segunda solução seria adicionar um terceiro processador, que poderia ser muito menos poderoso e caro que o F28335, cuja tarefa seria a do bloco de processamento, disparando as velocidades de referência para os DSP's do acionamento de cada máquina. Uma terceira solução, enfim, é fazer com que ambos os DSP's obrigatoriamente presentes calculem tanto a sua velocidade quanto a do seu complementar. Para aumentar a segurança, estas são comparadas e, caso os cálculos estejam coincidentes - ou pelo menos dentro de uma faixa de tolerância de 1 ou 2% - as velocidades são impostas aos motores, desde que não ultrapassando um valor limite, dado pela especificação da máquina, que não permitiria, por exemplo, que uma roda bloqueada (atolada) fizesse a outra girar acima de um valor seguro. Esta será a solução adotada por este texto. Na Figura 24 a representação gráfica desse esquema.

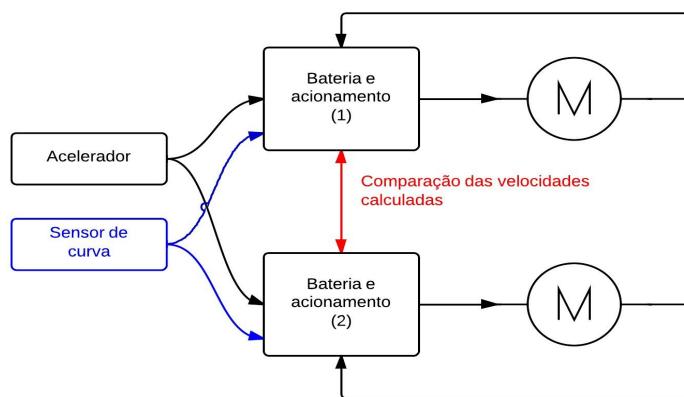


Figura 24: Diagrama de blocos para o diferencial eletrônico do VE/UFRJ (proposta).

O sensor de direção costuma ser baseado no princípio da magnetorrelatividade, isto é, a propriedade de um material em mudar sua resistência elétrica consoante ao campo magnético presente. Quando o volante é girado ele rotaciona uma engrenagem a qual aciona duas outras engrenagens me-

nores e que são dotadas de ímãs. Elementos magnetorresistentes registram, então, a posição angular dos ímãs. A combinação das medidas torna possível o cálculo do ângulo de rotação total. Na próxima página, um exemplo de dispositivo da Bosch.

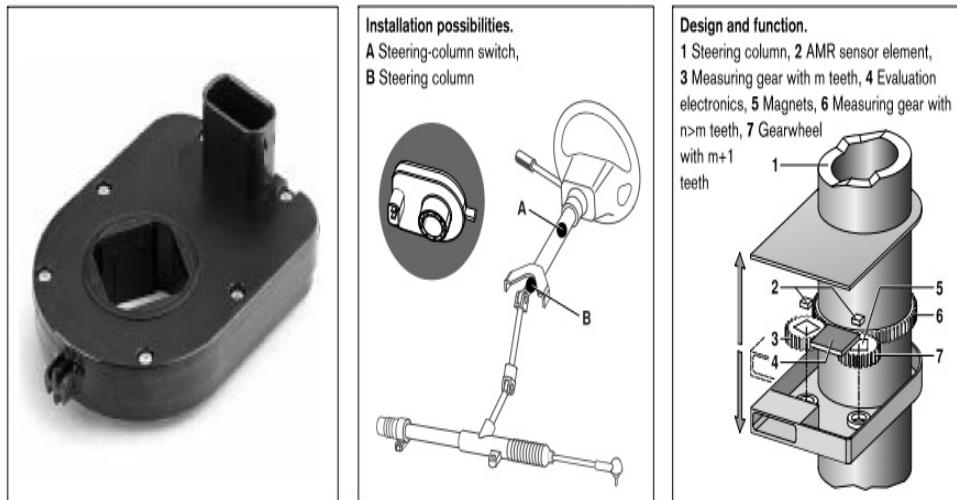


Figura 25: Sensor para direção veicular da Bosch. Dispositivos como este podem ser encontrados por preços a partir de 30 dólares, variando de acordo com o modelo do carro.

Intervalo de medição (ângulo)	-780° a 779,9°
Intervalo de medição (aceleração)	0 a 1016°/s
Resolução (ângulo)	0,1°
Resolução (aceleração)	4°/s
Não-linearidade	-2,5° a 2,5°
Histerese	0° a 5°
Tensão de operação nominal	12 V
Consumo a 12 V	< 150 mA

Tabela 3: Dados do sensor para direção veicular da Bosch.

Mais dados do carro, necessários para a aplicação das fórmulas para ω_{in} e ω_{out} :

$$d = 1,40m, \quad L = 1,80m, \quad V_x = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}r = \omega_{ref}$$

E sua implementação em PSIM:

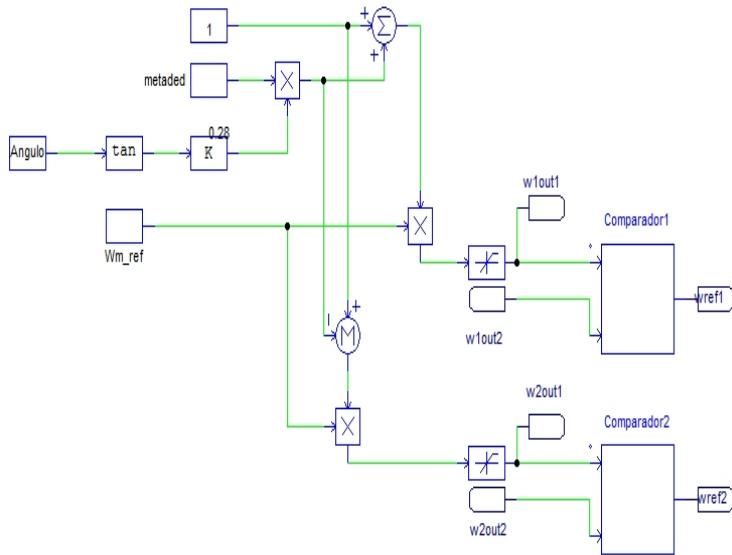


Figura 26: Esquemático de diferencial eletrônico no PSIM. Cada *drive* teria implementada esta função de maneira que, por segurança, ele leria o cálculo de velocidade do *drive* complementar e compararia as respostas. Caso sejam iguais, as velocidades de referência são utilizadas, do contrário, a referência se torna nula e o carro para.

A função acima não passa de uma realização direta das equações para ω_{in} e ω_{out} . Note que destas equações o próprio ângulo define qual é a roda externa e interna, pois se para um lado a contagem angular é positiva e para o outro negativa, a tangente também o será, modificando o sinal da equação. Duplicando-se o circuito da seção 5.3 e adicionando o diferencial a cada parte, obtém-se os resultados das Figuras 36, 37 e 38. Uma observação: discute-se que o controle orientado por campo pode não apresentar um bom desempenho em baixas velocidades. Na prática, isso pode comprometer o desempenho do diferencial, como por exemplo um desbalanceamento na variação das velocidades diferenciais. São necessários, no entanto, ensaios para que se possa verificar se isso ocorre de fato.

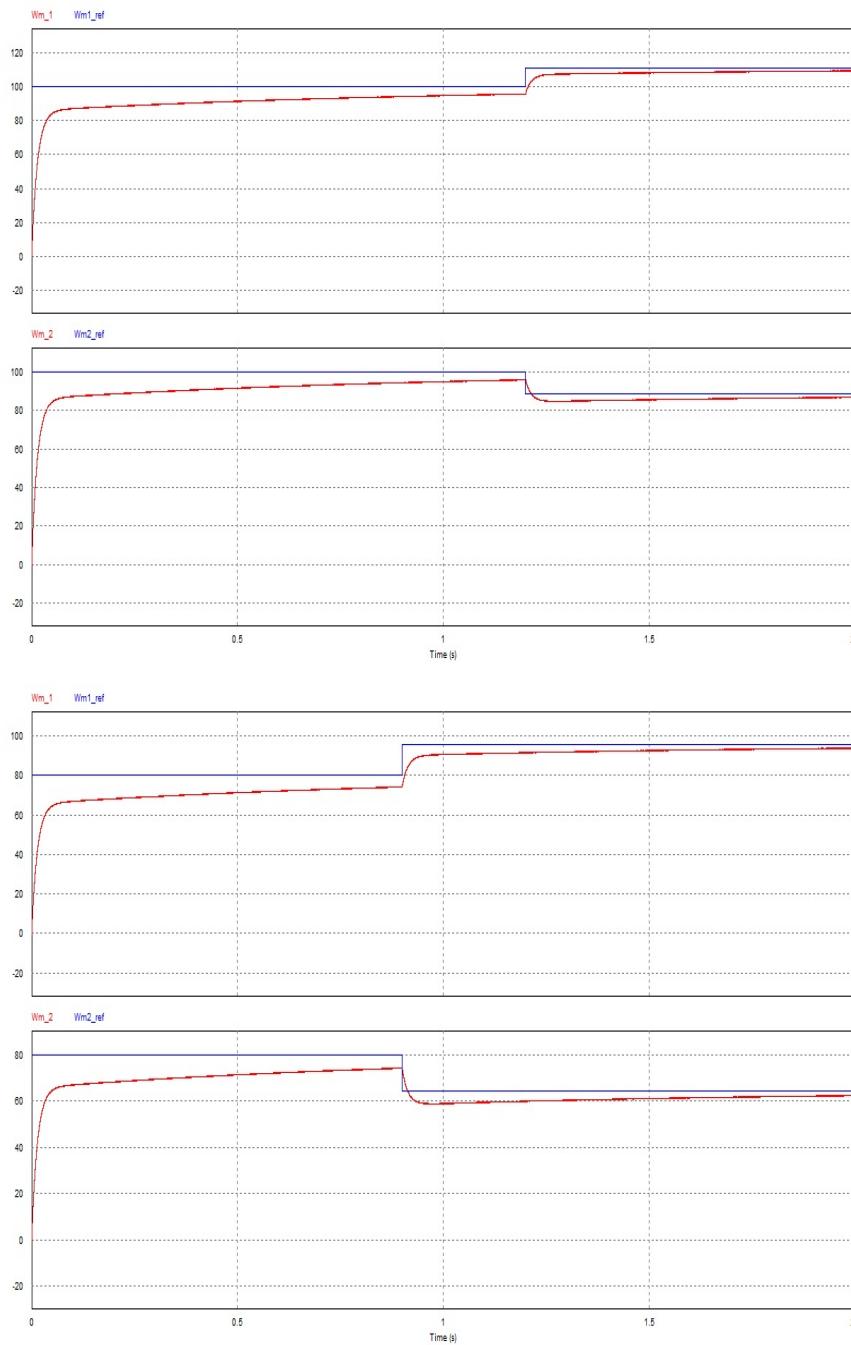


Figura 27: Resultado das simulações para os ângulos $\pi/6$ e $\pi/4$. Para o ângulo de direção zero (direção reta), as velocidades são iguais.

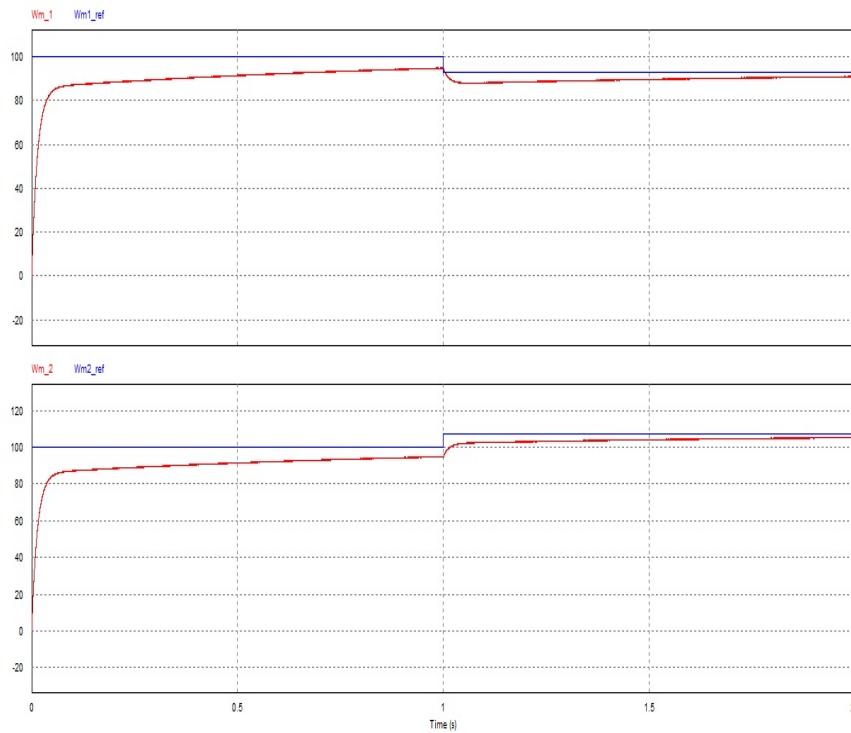


Figura 28: Resultado das simulações para o ângulo $-\pi/9$.

Nas Figuras 27 e 28 sempre são visualizados gráficos aos pares: um para a velocidade da roda interna e outro para a velocidade da roda externa. Quando é dado um degrau no ângulo de giro da direção, cada roda assume sua nova velocidade - a externa aumenta e a interna reduz equivalentemente.

8 Considerações finais

Diferencial Eletrônico para o Veículo Elétrico Utilitário da Cidade Universitária da UFRJ é um apanhado de grande parte do aprendizado acumulado pelo autor desde o início do Projeto VE/UFRJ, seguido de uma contribuição para além do estágio atual de desenvolvimento do veículo. Atualmente, conta-se com todos os dispositivos - baterias, motor e *drive*. Para as baterias, uma proposta de BMS próprio da UFRJ é tema de outro Projeto Final dentro da equipe; o motor já tem seu suporte (que une com a carroceria), porém ainda nunca foi sequer ligado, uma vez que o *drive* impôs complicações imprevistas ao grupo acerca de sua comunicação com dispositivos externos e, consequentemente, sua programação. Esta questão é tratada com prioridade agora, de maneira que um controle possa ser desenvolvido e enfim testado. O controle mostrado neste texto pode até ser aproveitado para um primeiro ensaio, de maneira que o comportamento real (especialmente com carga) possa ser analisado e então, com cuidado, serem melhor estudadas a estratégias, os ganhos, o comportamento desejado e as ações de segurança. É um processo que requer tempo, organização e representará um relevante salto de experiência para o grupo.

O diferencial eletrônico propriamente dito será um problema que se apresentará muito depois do primeiro protótipo (que conta apenas com um motor) estiver funcional. No entanto, quando for necessário, o proposto neste trabalho poderá ser quase que prontamente aplicado, já que independe da estratégia de controle adotada. O “quase” é por conta da incerteza discutida anteriormente quanto ao comportamento em baixa velocidade e mesmo os critérios de segurança operacional (limitação da velocidade máxima quando a roda complementar estiver bloqueada, por exemplo), que só poderão também ser plenamente ajustadas com ensaios.

Desde o início do Projeto VE/UFRJ fiz questão de acompanhar as novidades nesse meio, os obstáculos e as expectativas. Passei a tomar gosto não só pela Eletrônica de Potência, quanto também pelo assunto de redes elétricas inteligentes, o qual parece indissociável e até mais urgente que os próprios VE's. A integração de fontes alternativas às redes elétricas, além de um desafio de engenharia muito interessante e com bastante Controle envolvido, é também um meio para tornar os VE's cada vez mais limpos em relação às suas emissões - é aquela discussão: “o carro não polui, mas a geração de eletricidade sim”. Pois bem, a evolução tecnológica nesse caso em particular vai tornar essa crítica cada vez mais fraca. Fontes intermitentes, como eólica e solar, não são despacháveis, isto é, não se pode programar um período para que se gere mais energia. Ainda, a própria intermitência é um

problema para a integração delas às redes elétricas, que se soluciona com armazenamento de energia. Ora, se VE's carregam dentro de si baterias com dezenas de kWh (um Tesla *Model S* tem 85 kWh de armazenamento), por que não aproveitá-las também para a integração de fontes limpas e auxílio à estabilidade das redes elétricas? Não sei ainda se é uma ideia viável, mas estudar o *Vehicle-to-Grid* é certamente um passo que desejo dar.

Referências

- AYDIN, M.; HUANG, S.; LIPO, T. Axial flux permanent magnet disc machines: a review. In: *Conf. Record of SPEEDAM*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 61–71.
- BOJOI, R. et al. Direct flux vector control of axial flux ipm motors for in-wheel traction solutions. In: *IEEE. IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2010. p. 2224–2229.
- BOSE, B. K. *Modern power electronics and AC drives*. [S.l.]: Prentice Hall USA, 2002.
- BUCHMANN, I. *Charging Lithium-ion*. [S.l.]. Disponível em: <http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries>.
- BUCHMANN, I. *Lead-based Batteries*. [S.l.]. Disponível em: <http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries>.
- BUCHMANN, I. *Lithium-based Batteries*. [S.l.]. Disponível em: <http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries>.
- BUCHMANN, I. *What's the Best Battery?* [S.l.]. Disponível em: <http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery>.
- CAVAGNINO, A. et al. A comparison between the axial flux and the radial flux structures for pm synchronous motors. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, v. 38, n. 6, p. 1517–1524, 2002. ISSN 0093-9994.
- DINGER, A. et al. Batteries for electric cars: Challenges, opportunities, and the outlook to 2020. *Boston Consulting Group*, 2010.
- HEISLER, H. *Advanced vehicle technology*. [S.l.]: Access Online via Elsevier, 2002.
- LIU, C.-T. et al. Field-oriented control evaluations of a single-sided permanent magnet axial-flux motor for an electric vehicle. *Magnetics, IEEE Transactions on*, v. 39, n. 5, p. 3280–3282, 2003. ISSN 0018-9464.
- MAGALLAN, G. A. et al. A neighborhood electric vehicle with electronic differential traction control. In: *IEEE. Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*. [S.l.], 2008. p. 2757–2763.

MERZOUG, M.; NACERI, F. Comparison of field-oriented control and direct torque control for permanent magnet synchronous motor (pmsm). *Proceedings of World Academy of Science: Engineering & Technology*, v. 47, 2008.

MOHAN, N. *Electric drives: an integrative approach*. [S.l.]: Minnesota Power Electronics Research & Education (MNPERE), 2003.

RASHID, M. H. *Power electronics handbook*. [S.l.]: Academic Press, 2001.

STEPHAN, R. M. *Controle de Máquinas Elétricas*. [S.l.]: WEG, 2008.

STEWART, S. G. et al. *Electric Vehicle Extended Range Hybrid Battery Pack System*. 2013. US Patent App. 13/787,421.

STEWART, S. G. et al. *Electric Vehicle Extended Range Hybrid Battery Pack System*. 2013. US Patent App. 13/845,161.

TECHNOLOGY and Market Intelligence: Hybrid Vehicle Power Inverters Cost Analysis. *Synthesis Partners, LLC*, 2011.

Parte III

Anexo

O núcleo da unidade de controle do inversor LV SKAI 2 é formado por dois circuitos (Figura 29):

- Uma unidade lógica de controle (LCU), não programável pelo usuário e que constitui a interface com a seção de potência e gerencia as funções de proteção;
- Um DSP TI F28335, programável pelo usuário, que atua como unidade de controle do motor (MCU) e gerencia toda a comunicação interna e externa. O DSP é conectado a uma EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory*) através de uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface*). As funções de proteção, na unidade lógica de controle, são independentes e preemptivas em relação ao DSP.

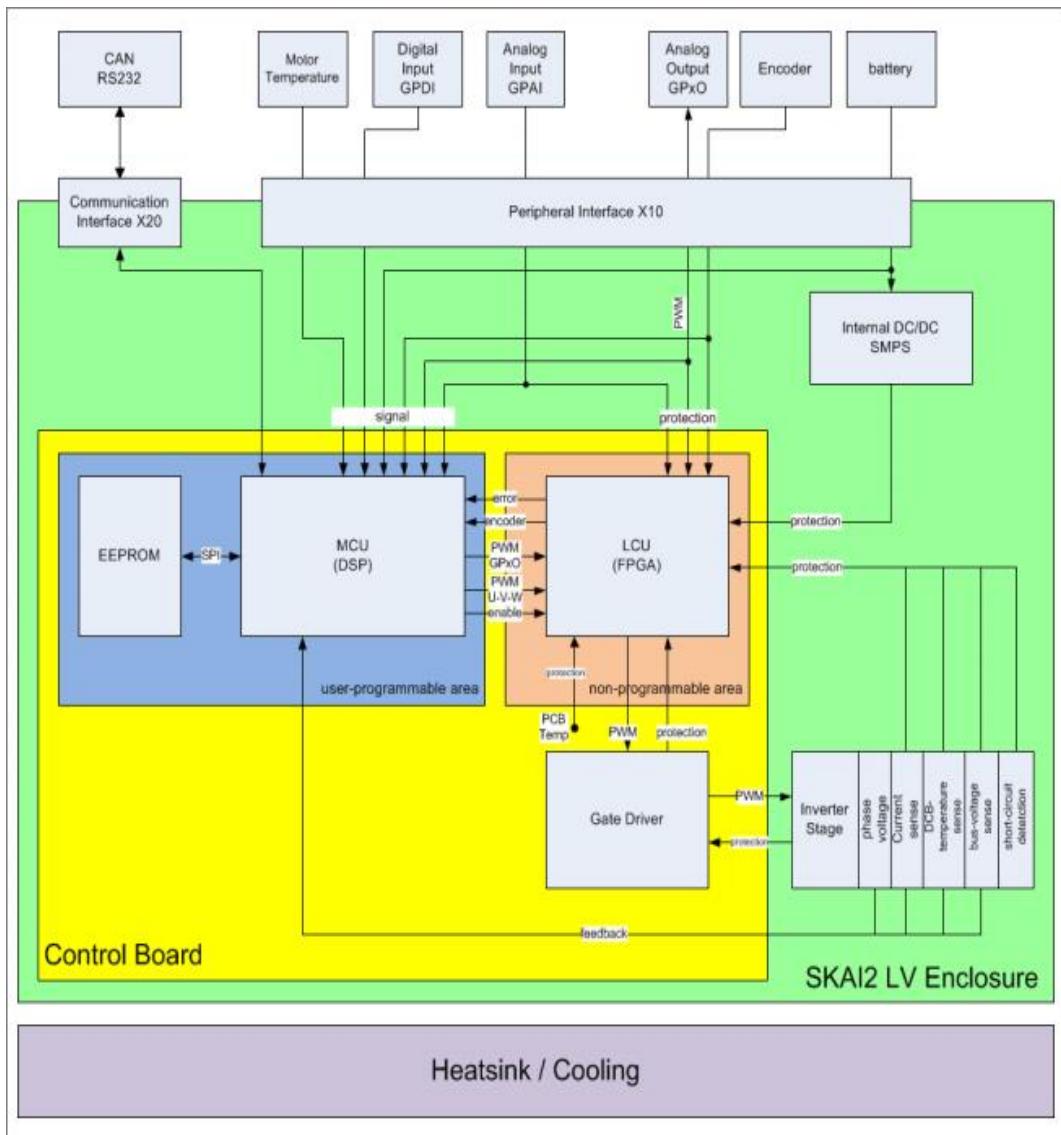


Figura 29: Arquitetura da unidade de controle do inversor LV SKAI 2.

A interface com o motor se dá através da leitura de um encoder e sensor de temperatura:

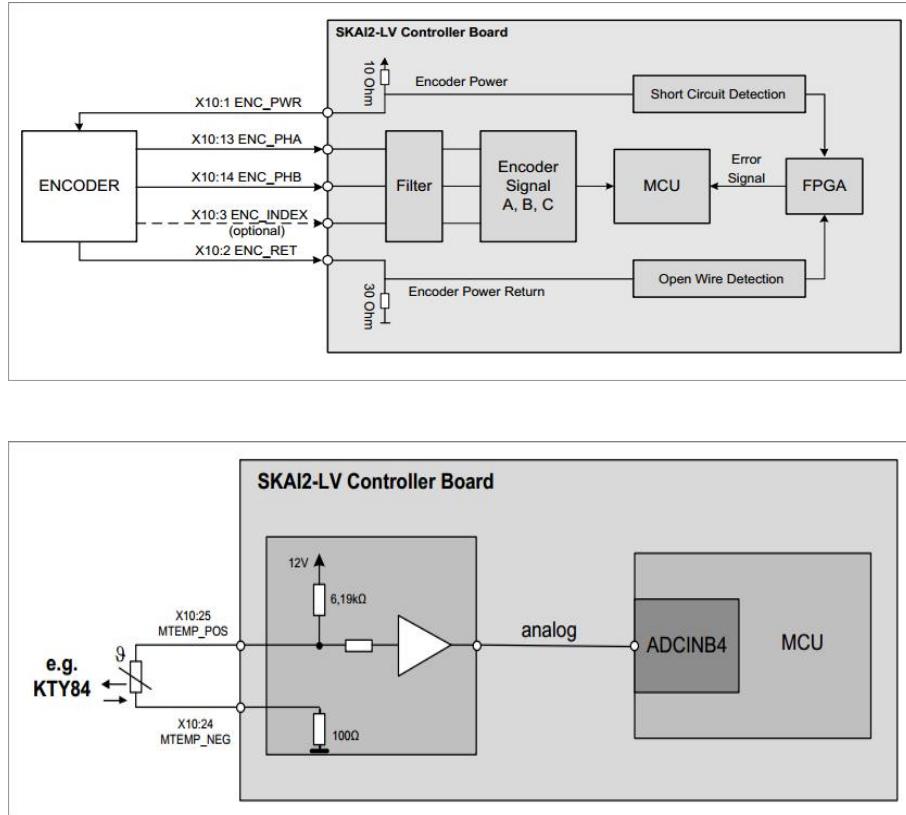


Figura 30: Diagramas de leitura do encoder e do sensor de temperatura do motor. No diagrama do encoder, note as proteções contra curto-circuito e falta de alimentação (*Short Circuit Detection* e *Open Wire Detection*, respectivamente), ambas podendo ativar sinais de *trip* para o sistema de proteção.

A instrumentação interna (Figura 31) consiste em:

- Sensores de corrente nas fases U e W, para fins de controle e segurança;
- Um sofisticado sistema de gerenciamento de temperatura, tanto dos MOSFET, que param e retomam a operação em 140 e 120 °C, respectivamente, quanto da unidade de controle, que pára a 120 °C;
- Detecção da tensão do elo de corrente contínua, desligando o dispositivo quando esta tensão estiver abaixo de 90 V (para a operação em 100 V), preservando a bateria.

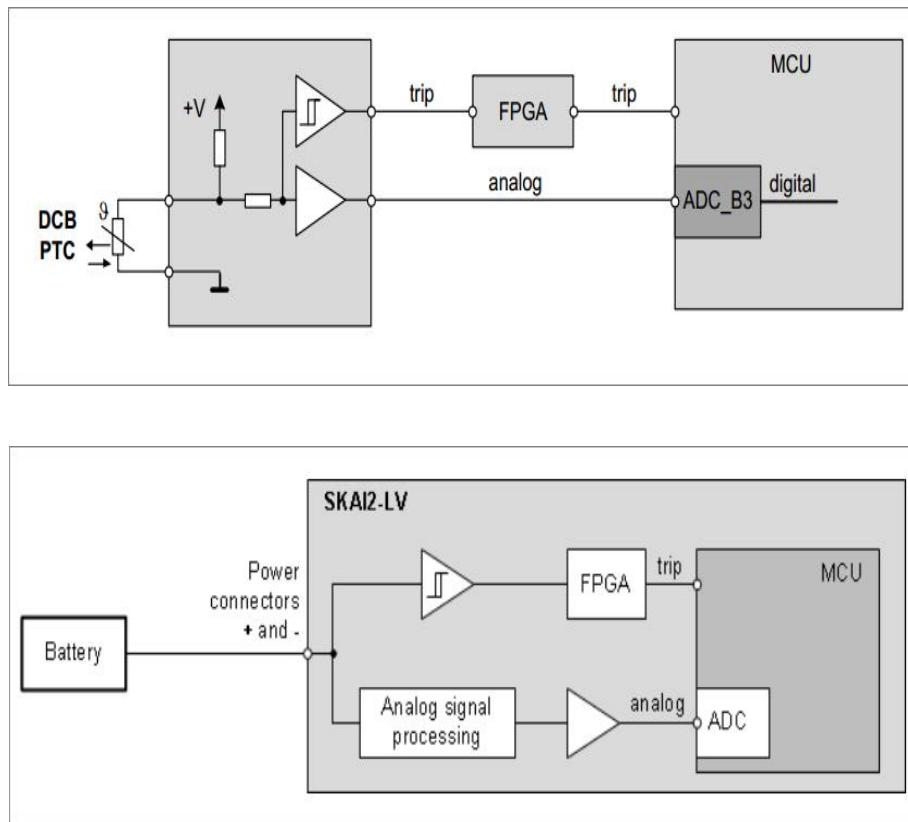


Figura 31: Diagramas dos sistemas de proteção contra temperatura nos MOSFET e de monitoramento da tensão de alimentação.

SKAI 50 A2 MD20-W



LV SKAI 2

Single three-phase MOS inverter

SKAI 50 A2 MD20-W

Target Data

Features

- Optimised for HEV and EV
- High power density
- High Overload capability
- Compact integration

Enclosure:

- V, I, T sensors
- Integrated Controller
- Gate driver with protection features
- Fully programmable digital signal processor TMS320F28335
- Liquid cooling
- DC link capacitors

Typical Applications*

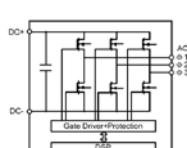
- Forklift
- Hybrid vehicle
- Battery driven vehicle
- Neighbourhood vehicles

No. 14283009

Footnotes

Please note: No galvanic insulation between power section and driver section.

Characteristics		min.	typ.	max.	Unit
Symbol	Conditions				
Electrical Data					
V _{isol} ¹⁾	AC (Sinus 50Hz), t = 60 s		1500		V
V _{CC}	DC supply voltage	80	120	160	V
I _{nom}	rms @ rated conditions: V _{CC} = 120V, f _{out} = 50Hz, f _{sw} = 8kHz, T _r ≤ 75°C	Operation mode: rms t = 180sec	350		A
I _{ovl}		t = 10sec	385		A
f _{sw}	Switching frequency		8	16	kHz
C _{DC}	DC Bus Capacitance	6.6	8.2	9.8	mF
I _s	Supply current gate driver section at no load (f _{sw} = 0)		46	68	mA
t _{POR}	Power-on reset completed		0.4	0.48	s
Mechanical Data					
Weight			6.45		kg
Height	Height including signal connectors X10, X20		124		mm
Width			205		mm
Length			290		mm
M _t	AC / DC terminals (M8 screw)	8	9	10	Nm
M _s	Mounting torque to ground, M8 screw with flat washer	18	20	22	Nm
Environmental Data					
T _a	Ambient temperature	-40	55		°C
T _{no}	Non-operating temperature range	-40	105		°C
IP	Enclosure protection level (except power connectors)		IP67		
Altitude			3000		m



LV SKAI 2

SKAI 50 A2 MD20-W



LV SKAI 2

Single three-phase MOS inverter

SKAI 50 A2 MD20-W

Target Data

Features

- Optimised for HEV and EV
- High power density
- High Overload capability
- Compact integration

Enclosure:

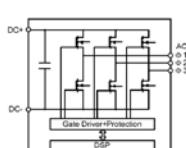
- V, I, T sensors
- Integrated Controller
- Gate driver with protection features
- Fully programmable digital signal processor TMS320F28335
- Liquid cooling
- DC link capacitors

Typical Applications*

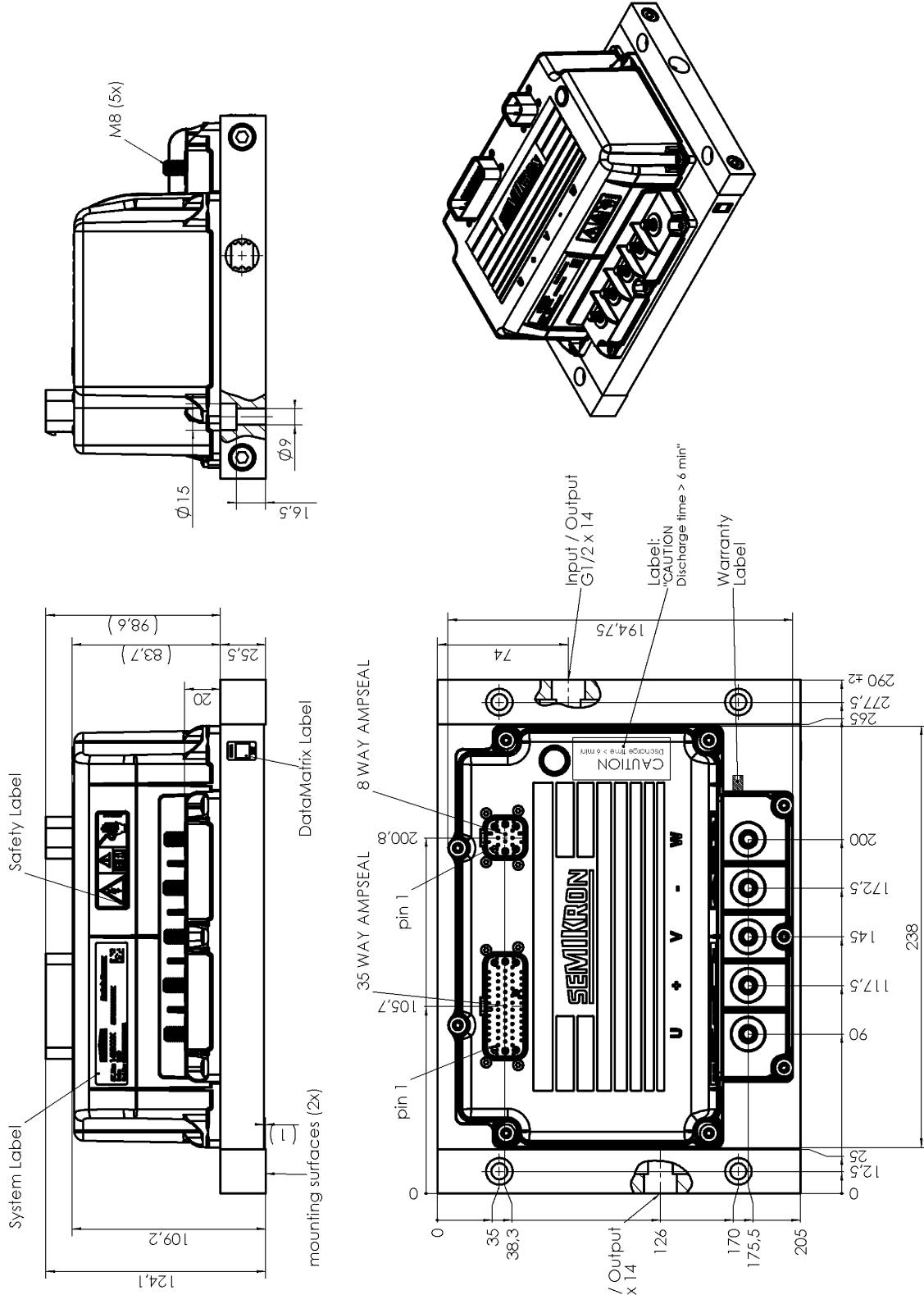
- Forklift
- Hybrid vehicle
- Battery driven vehicle
- Neighbourhood vehicles

No. 14283009

Characteristics		min.	typ.	max.	Unit
Symbol	Conditions				
Controller switching parameters					
$t_{d(on)IO}$	Input-output turn-on propagation time		1.9	2.5	μs
$t_{d(off)IO}$	Input-output turn-off propagation time		5.9	6.5	μs
$t_{d(err)}$	Error input-output propagation time		16.6	17.5	μs
t_{TD}	Top-Bot interlock dead time		4.0		μs
t_{bl}	VCE monitoring blanking time		3.2	3.5	μs
Protection functions					
T_{CStrip}	Over temperature protection trip level on ceramic-substrate	132			°C
$T_{RelCStrip}$	Release temperature for ceramic substrate overtemperature trip level	114			°C
BW_{TBsens}	Bandwidth of temperature sensing on driver board		630		Hz
V_{DCtrip}	Trip level of DC-link voltage monitoring	162			V
$V_{RelDCtrip}$	Release voltage for DC link overvoltage trip level	152			V
I_{TRIPSC}	Overcurrent trip level	760			A _{PEAK}
$I_{loutsens}$	AC sensing range (rms)		600		A
$m_{loutsens}$	Gradient of output current sensing		2.048		digits/A
$OS_{loutsens}$	Offset of AC current sensing		2048		digits
$BW_{loutsens}$	Bandwidth (3 dB) of AC current sensing		8		kHz
V_{DCsens}	Measurable DC-link-voltage	0	190		V
$m_{VDCsens}$	Gradient of DC-link voltage sensing		21.553		digits/V
$BW_{VDCsens}$	Bandwidth (3 dB) of DC-link voltage sensing		2.3		kHz



LV SKAI 2

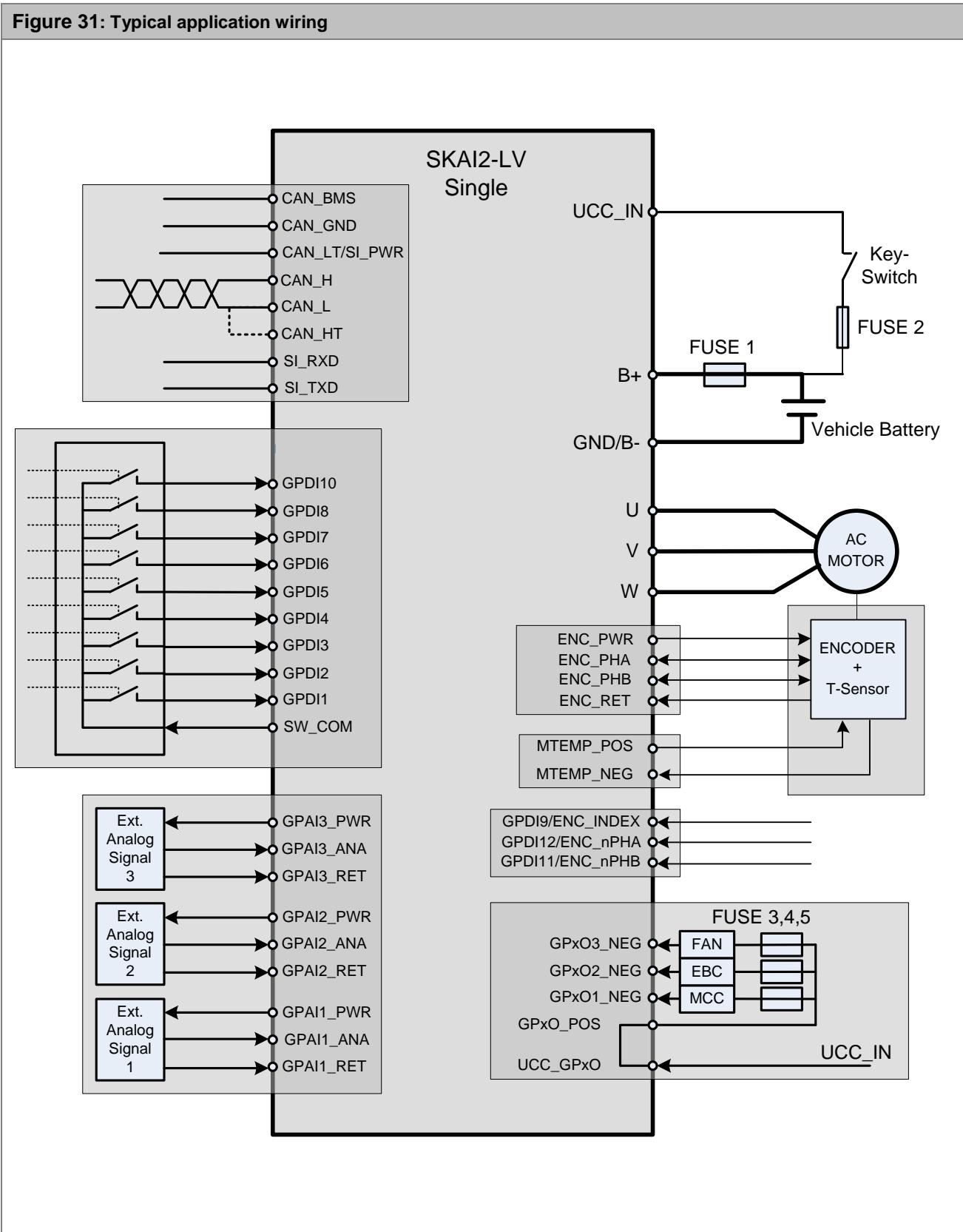


This is an electrostatic discharge sensitive device (ESDS), international standard IEC 60747-1, Chapter IX

* The specifications of our components may not be considered as an assurance of component characteristics. Components have to be tested for the respective application. Adjustments may be necessary. The use of SEMIKRON products in life support appliances and systems is subject to prior specification and written approval by SEMIKRON. We therefore strongly recommend prior consultation of our staff.

10. Application Example

Figure 31: Typical application wiring



Digital Signal Controllers (DSCs)

Check for Samples: [TMS320F28335](#), [TMS320F28334](#), [TMS320F28332](#), [TMS320F28235](#), [TMS320F28234](#), [TMS320F28232](#)

1 TMS320F2833x, TMS320F2823x DSCs

1.1 Features

- High-Performance Static CMOS Technology
 - Up to 150 MHz (6.67-ns Cycle Time)
 - 1.9-V/1.8-V Core, 3.3-V I/O Design
- High-Performance 32-Bit CPU (TMS320C28x)
 - IEEE-754 Single-Precision Floating-Point Unit (FPU) (F2833x only)
 - 16 x 16 and 32 x 32 MAC Operations
 - 16 x 16 Dual MAC
 - Harvard Bus Architecture
 - Fast Interrupt Response and Processing
 - Unified Memory Programming Model
 - Code-Efficient (in C/C++ and Assembly)
- Six-Channel DMA Controller (for ADC, McBSP, ePWM, XINTF, and SARAM)
- 16-Bit or 32-Bit External Interface (XINTF)
 - Over 2M x 16 Address Reach
- On-Chip Memory
 - F28335, F28235:
256K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM
 - F28334, F28234:
128K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM
 - F28332, F28232:
64K x 16 Flash, 26K x 16 SARAM
 - 1K x 16 OTP ROM
- Boot ROM (8K x 16)
 - With Software Boot Modes (via SCI, SPI, CAN, I2C, McBSP, XINTF, and Parallel I/O)
 - Standard Math Tables
- Clock and System Control
 - Dynamic PLL Ratio Changes Supported
 - On-Chip Oscillator
 - Watchdog Timer Module
- GPIO0 to GPIO63 Pins Can Be Connected to One of the Eight External Core Interrupts
- Peripheral Interrupt Expansion (PIE) Block That Supports All 58 Peripheral Interrupts
- 128-Bit Security Key/Lock
 - Protects Flash/OTP/RAM Blocks
 - Prevents Firmware Reverse Engineering
- Enhanced Control Peripherals
 - Up to 18 PWM Outputs
 - Up to 6 HRPWM Outputs With 150 ps MEP Resolution
 - Up to 6 Event Capture Inputs
 - Up to 2 Quadrature Encoder Interfaces
 - Up to 8 32-Bit Timers (6 for eCAPs and 2 for eQEPs)
 - Up to 9 16-Bit Timers (6 for ePWMs and 3 XINTCTRs)
- Three 32-Bit CPU Timers
- Serial Port Peripherals
 - Up to 2 CAN Modules
 - Up to 3 SCI (UART) Modules
 - Up to 2 McBSP Modules (Configurable as SPI)
 - One SPI Module
 - One Inter-Integrated-Circuit (I2C) Bus
- 12-Bit ADC, 16 Channels
 - 80-ns Conversion Rate
 - 2 x 8 Channel Input Multiplexer
 - Two Sample-and-Hold
 - Single/Simultaneous Conversions
 - Internal or External Reference
- Up to 88 Individually Programmable, Multiplexed GPIO Pins With Input Filtering
- JTAG Boundary Scan Support ⁽¹⁾
- Advanced Emulation Features
 - Analysis and Breakpoint Functions
 - Real-Time Debug via Hardware
- Development Support Includes
 - ANSI C/C++ Compiler/Assembler/Linker
 - Code Composer Studio™ IDE
 - DSP/BIOS™
 - Digital Motor Control and Digital Power Software Libraries

(1) IEEE Standard 1149.1-1990 Standard Test Access Port and Boundary Scan Architecture



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.
MicroStar BGA, Code Composer Studio, DSP/BIOS, TMS320C28x, Delfino, PowerPAD, TMS320C54x, TMS320C55x, C28x are trademarks of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.