

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO USO DE ALTERNADORES COMO  
MOTORES EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

**Windson Braga Pereira**

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

---

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

---

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

---

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

## Dedicatória

---

Ao verme que primeiro *roer* as frias carnes do meu cadáver dedico como saudosa lembrança este *Projeto Final de Graduação*. (adaptado – Machado de Assis)

## Agradecimentos

---

Agradeço, primeiramente, a Deus pela vida.

Agradeço aos meus pais Regina de Lourdes Braga Pereira e José Reinaldo da Costa Pereira por acreditarem no meu potencial e por me fortalecerem dia-a-dia com palavras de incentivo, amor e carinho durante toda a minha graduação.

Agradeço ao meu irmão Wanderson Braga Pereira e a todos os meus familiares que me apoiaram e contribuíram direta ou indiretamente para esta minha conquista.

Agradeço a minha namorada Larissa Quintanilha Pereira pelo amor, apoio nos momentos mais estressantes e incentivos que me fizeram superar muitas dificuldades.

Agradeço a todos os meus mestres da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ pelos ensinamentos técnicos de engenharia que levarei por toda a minha vida profissional de Engenheiro Eletricista. Em especial, agradeço ao meu orientador e mestre prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim pela dedicação e paciência na orientação deste trabalho de conclusão de curso.

## Resumo

---

Neste trabalho mostraremos os resultados, as análises e a conclusão do estudo da viabilidade da utilização do alternador BOSCH NCB1 28V 35-80A, utilizado em caminhões SCANIA, como motor elétrico de um veículo elétrico. Tal estudo foi realizado por meio dos resultados dos ensaios feitos no Laboratório de Máquinas Elétricas – LabMq da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ como trabalho de conclusão de graduação em Engenharia Elétrica na mesma instituição de ensino.

Três ensaios foram feitos no alternador, além de uma simulação computacional, a fim de obter e analisar suas características operacionais e seu desempenho frente às exigências para mobilidade de veículos elétricos.

Quanto às características operacionais, o alternador foi ensaiado como gerador onde pôde se verificar a forma de onda do estator para diferentes combinações de velocidade e corrente de campo. Além disso, foi feito um ensaio de circuito aberto, também a diferentes velocidades de rotação, a fim de se obter as curvas de magnetização da máquina e, conseqüentemente, sua corrente de campo máxima.

Quanto ao seu desempenho frente às exigências para mobilidade de veículos elétricos, foi feito ensaio sob carga a fim de analisar o comportamento do seu torque em relação à corrente de armadura para diferentes velocidades.

Para, finalmente, concluirmos se é possível mover um veículo elétrico utilizando alternadores como motores elétricos, foi feita uma modelagem do alternador no software PSIM e, posteriormente, uma simulação do funcionamento do alternador como motor elétrico no software Simulink do Matlab utilizando os parâmetros do modelo definido no PSIM e os dados coletados nos ensaios.

# Índice

---

## **Capítulo 1: Introdução, Objetivo e Histórico dos Veículos Elétricos**

1.1– Introdução	1
1.2– Objetivo	2
1.3– Histórico dos Veículos Elétricos	2
1.3.1– Carros Elétricos x Carros a Combustão	6
1.3.2– Os Veículos Híbridos	7
1.3.3– Carros Elétricos com Motores nas Rodas	8
1.3.4– O Futuro dos Veículos Elétricos	10

## **Capítulo 2: Máquinas Síncronas e Equipamentos da Bancada**

2.1– Máquinas Síncronas	11
2.1.1– Controle de Máquinas Síncronas	12
2.1.2– Acionamento de Motor Síncrono por Inversor PWM	14
2.2– Alternador	19
2.2.1– Principais Componentes de um Alternador	19
2.2.2– Alternador de Ensaio	21
2.3– Motor CC	22
2.4– Carga	23

## **Capítulo 3: Execução dos Ensaio no Alternador BOSCH**

3.1– Forma de Onda de Et	27
3.1.1– Resultados	28
3.1.2– Análise	31
3.2– Ensaio a Vazio	33
3.2.1– Resultados	34
3.2.2– Análise	35
3.3– Ensaio Sob Carga	36
3.3.1– Resultados	37

3.3.2– Análise	38
3.4– Simulação do Alternador como Motor	38
3.4.1– Modelagem do Alternador no PSIM	38
3.4.2– Acionamento do Alternador no Simulink	41

#### **Capítulo 4: Conclusão e Sugestões de Trabalhos Futuros**

4.1– Conclusão	48
4.2– Sugestão de Trabalhos Futuros	48

## Tabelas

---

Tabela 2.1 – Acionamentos eletrônicos de motores elétricos CA

Tabela 2.2 – Comparativo do peso do alternador com outros motores elétricos

Tabela 3.3 – Dados do ensaio de circuito aberto

Tabela 3.4 – Dados do ensaio de torque do alternador

## Figuras

---

Figura 1.1 – Le Jamais Contente no evento Michelin Challenge Bibendum

Figura 1.2 – Cadillac Touring 1912

Figura 1.3 – Chevrolet Corvair Elétrico

Figura 1.4 – Gurgel Itaipu

Figura 1.5 – EV1 da General Motors

Figura 1.6 – FCC II da Fiat Automóveis

Figura 1.7 – Motor Híbrido do Honda Civic Hybrid 2002

Figura 1.8 – Lohner-Porsche

Figura 1.9 – Ellica, o Supercarro Elétrico Japonês

Figura 1.10 – Resultados do Teste de Aceleração do Ellica

Figura 1.11 – Audi e-tron

Figura 2.1 – Acionamento Eletrônico de Máquinas Síncronas

Figura 2.2 – Motor Síncrono Alimentado por Inversor de Comutação Natural

Figura 2.3 – (a) Diagrama de blocos de um sistema de controle vetorial orientado pelo campo; (b) Diagrama de blocos de uma malha de controle de velocidade construída em torno de um sistema (a)

Figura 2.4 – (a) Sinal senoidal + Onda triangular; (b) Sinal PWM gerado

Figura 2.5 – Inversor CC-CA Monofásico

Figura 2.6 – Distribuição de Harmônicos

Figura 2.7 – Inversor Trifásico

Figura 2.8 – Diagrama Vetorial

Figura 2.9 – Alternador (corte interno)

Figura 2.10 - Componentes de um alternador

Figura 2.11 – Alternador BOSCH NCB1 28V 80A

Figura 2.12 – Motor CC EGC2-3A da Equacional

Figura 2.13 – (a) Suporte de madeira com as resistências (carga); (b) Régua de Bornes de madeira para interligação entre a carga e os terminais do estator do alternador

Figura 3.1 – Esquema da montagem base

Figura 3.2 – Montagem base sem alimentação (LabMaq)

Figura 3.3 – Esquema da montagem para obtenção das formas de onda de Et

Figura 3.4 – Formas de onda de Et para 900rpm (escala no eixo x: 4ms/div)

Figura 3.5 – Formas de onda de Et para 1200rpm (escala no eixo x: 4ms/div)

Figura 3.6 – Formas de onda de Et para 1500rpm (escala no eixo x: 4ms/div)

Figura 3.7 – Formas de onda de Et para 1800rpm (escala no eixo x: 4ms/div)

Figura 3.8 – Simulação e análise da forma de onda de Et para  $I_f = 1,4A$  e  $n = 1200$  rpm

Figura 3.9 - Curvas de Magnetização do alternador

Figura 3.10 – Esquema da montagem para o ensaio sob carga

Figura 3.11 – Curvas de  $T/I_a$  x  $I_f$  para análise do alternador sob carga

Figura 3.12 – Modelagem do Alternador no PSIM

Figura 3.13 – Resultado da simulação da forma de onda de Et

Figura 3.14 – Resultado da simulação do ensaio sob carga

Figura 3.15 – Parâmetros do alternador modelado

Figura 3.16 – Circuito para simulação do acionamento do alternador (motor)

Figura 3.17 – Circuito do demux

Figura 3.18 – (a) Parâmetros da Máquina Síncrona; (b) Parâmetros do Controlador

Figura 3.19 – Resultado da simulação do acionamento do alternador como motor (eixo x em segundos)

Figura 3.20 – Simulação de acionamento com aceleração máxima (eixo x em segundos)

# Capítulo 1

---

## Introdução, Objetivo e Histórico dos Veículos Elétricos

### 1.1 – Introdução

Houve uma época em que os veículos elétricos eram maioria nas ruas, segundo documentário em [5]. Eram carros silenciosos, porém a máxima velocidade atingida por eles não ultrapassava 50 km/h e a autonomia de suas baterias era de menos de 50 km. Com a descoberta do petróleo no início do século 20, os veículos a combustão interna, movidos a gasolina, evoluíram rapidamente e os elétricos foram ficando obsoletos até que sua produção parou.

Hoje há uma grande necessidade de se investir em veículos elétricos com o propósito de diminuir as emissões de gases poluentes na atmosfera e, como consequência, melhorar as condições de vida em nosso planeta. Com isso, novas pesquisas em baterias mais duráveis e em motores elétricos mais eficientes para uso veicular estão sendo feitas em todo o mundo. O conceito de sustentabilidade hoje é respeitado e praticado em muitos os países, visto que é de comum interesse preservar os recursos naturais do nosso planeta que atualmente se encontra em níveis preocupantes.

Seguindo essa linha de raciocínio, este trabalho mostrará os resultados do estudo da possibilidade de utilização de um alternador automotivo como motor para propulsão de um protótipo de veículo elétrico. A motivação para isso vem do fato de que alternadores são máquinas síncronas compactas, leves e baratas, quando comparadas aos tradicionais motores elétricos, tanto os síncronos como os de indução e os de Corrente Contínua, utilizados por montadoras que já se aventuram no segmento dos veículos elétricos vendo o promissor mercado que se mostra.

Nos itens subsequentes deste capítulo, será mostrada uma breve introdução teórica relacionada ao assunto em discussão. Os capítulos 2 e 3 destinam-se a descrever os equipamentos utilizados nos ensaios e os ensaios propriamente ditos, respectivamente, bem

como as discussões a respeito dos resultados. Finalmente, no capítulo 4 será finalizado este trabalho por meio de uma conclusão e de algumas sugestões de trabalhos futuros.

## 1.2 – Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é avaliar se um alternador, utilizado na linha de montagem de caminhões SCANIA, possui as características necessárias para movimentar um veículo elétrico de pequeno porte, como por exemplo, os carrinhos de golfe. Um único alternador deste tipo não possui potência e torque suficientes para mover um veículo elétrico porém, a ideia é levantar as características deste alternador, principalmente o seu torque, na intenção de utilizar um alternador em cada roda do veículo, o que significa, para carros comuns, quatro alternadores. A técnica de se usar motores elétricos nas rodas já foi desenvolvida e será mostrada neste capítulo.

Independentemente da conclusão acerca destes testes, o maior objetivo neste trabalho é mostrar que há uma gama de possibilidades a serem testadas e/ou aprimoradas de forma a minimizar o custo de produção dos veículos elétricos, contribuindo assim para a rápida aceitação, pela sociedade, de uma mobilidade sustentável, promovida por este tipo de propulsão veicular limpa.

## 1.3 – Histórico dos Veículos Elétricos

Embora não seja um objetivo deste trabalho pesquisar a história dos veículos elétricos, apresentam-se a seguir algumas referências históricas sobre sua produção e utilização, compiladas de T. Noce [3]. Desta forma pretende-se delinear o contexto em que está situado este trabalho.

Os veículos de tração puramente elétrica são anteriores aos veículos a combustão interna, conforme documentário em [5].

A história dos veículos elétricos pode ser dividida em quatro fases, que diferem entre si pela tecnologia empregada e pela sua inserção no contexto socioeconômico de cada época.

- ✚ **Primeira Fase (1837 a 1912)** – Em 1837, na Inglaterra, foi construída a primeira carruagem elétrica, quase 40 anos antes do primeiro automóvel a motor de combustão interna. Em 1897 surgiu a primeira frota de táxis elétricos em Londres. Em 1899, foi

quebrado o recorde de velocidade pelo belga Jenatzy, a bordo de um veículo elétrico, o “Le Jamais Contente”, que atingiu 106 km/h (Figura 1.1).



**Figura 1.1 – Le Jamais Contente no evento Michelin Challenge Bibendum**

- ✚ **Segunda Fase (1912 a 1973)** – Esta fase foi marcada pelo surgimento do primeiro carro com motor de combustão interna com partida elétrica ao invés da partida a manivela, o Cadillac Touring 1912 (Figura 1.2). Esta tecnologia se estendeu gradativamente a todos os outros fabricantes e em 1920 quase todos os automóveis dispunham de partida elétrica.



**Figura 1.2 – Cadillac Touring 1912**

Nesta época, até a década de 1950, poucos foram os carros elétricos presentes no mercado. Em 1959 a empresa americana Henney lançou o Kilowatt com baterias de chumbo-ácido e o primeiro veículo elétrico transistorizado. Também nesta época a

Chevrolet (General Motors) lançou o Corvair Elétrico (Figura 1.3), conhecido como Electrovair, com baterias de zinco e prata.



Figura 1.3 – Chevrolet Corvair Elétrico

Nesta fase surgiram alguns veículos não comerciais como o famoso Jipe Lunar da NASA de 1969 e o Silver Eagle de 1971, fabricado para superar o recorde de velocidade de veículos elétricos atingindo a marca de 245km/h.

Nesta época a tração elétrica foi fortemente aplicada em veículos de transporte de massa e de movimentação de cargas nas indústrias.

- ✚ **Terceira Fase (1973 a 1996)** – Com os choques do petróleo de 1973 e 1979, a ideia de substituir totalmente os motores a combustão interna dos veículos por motores elétricos se fortaleceu. Nesta fase, os carros voltaram a ser equipados com a tecnologia das baterias de chumbo-ácido dos carros da Primeira Fase. Em 1974 a Gurgel produziu o primeiro carro elétrico brasileiro, o Itaipu (Figura 1.4), com autonomia de 60 km.

Os esforços para produzir veículos elétricos com maior autonomia permaneceram até a década de 80, quando a crise do petróleo foi superada favorecendo a indústria de motores a combustão. Além disso, os avanços na eletrônica possibilitaram a criação de motores a combustão mais eficientes.



**Figura 1.4 – Gurgel Itaipu**

No Brasil, deve-se ressaltar o sucesso do programa governamental Proálcool. Estes fatores inviabilizaram comercialmente a produção de veículos elétricos.

✚ **Quarta Fase (1996 em diante)** – Nesta época, devido aos elevados níveis de poluição nos centros urbanos, ao aumento das emissões de gases causadores do efeito estufa na atmosfera, ao aquecimento global e a outras formas de degradação do meio ambiente, provocadas pelo homem e sinalizadas na Rio 92, foi assinado o protocolo de Kyoto em 1997 no Japão. A visão de projetar veículos elétricos a fim de substituir completamente os movidos a combustão interna foi substituída pela de projetar, paralelamente ao avanço da tecnologia dos veículos puramente elétricos, veículos a combustão interna que contribuam para a redução dos níveis de poluição atmosférica e sonora nos grandes centros, com emissão de dióxido de carbono nula ou quase nula, como por exemplo, os veículos movidos a etanol. Desta forma o veículo elétrico passa a ser um complemento da oferta de meios de transporte autônomos, diversificando assim a matriz energética do setor automobilístico.

Um marco desta época foi a criação do EV1 da General Motors em 1996 (Figura 1.5) que incorporava a tecnologia de motores de corrente alternada, inversor de frequência e baterias de alta energia. Este veículo nunca foi vendido, era alugado.

A tecnologia utilizada pela General Motors no EV1 permanece sendo a alternativa usada pelas montadoras atuais nos projetos de seus veículos elétricos.



**Figura 1.5 – EV1 da General Motors**

No Brasil pode ser citado, por exemplo, o Palio Elétrico de 2006 e o carro conceito FCC II (Figura 1.6) de 2008, ambos fabricados pela Fiat.



**Figura 1.6 – FCC II da Fiat Automóveis**

### **1.3.1 – Carros Elétricos x Carros a Combustão**

Os carros elétricos do século 20 não vibravam muito e eram silenciosos, durante um tempo eram em maior número do que carros com motores a combustão na Europa e na América.

Graças ao método de produção inventado por Henry Ford, carros a combustão cresceram em popularidade.

O sistema de linha de montagem de Ford tornou possível a produção em massa, diminuindo muito os custos. O desempenho dos motores também melhorou.

No início do século 20, o petróleo foi descoberto em várias partes do mundo, fornecendo combustível barato em grandes quantidades. Enquanto a quantidade de carros a combustão cresceu, não foram feitos avanços em baterias e motores elétricos e o interesse pelos carros elétricos enfraqueceu.

### 1.3.2 – Os Veículos Híbridos

Já faz 100 anos desde que os veículos a gasolina surgiram. Atualmente, a sociedade tem criticado os veículos a combustão. Com o agravamento da poluição e do aquecimento global, há um aumento na troca de motores a gasolina por carros ecológicos. Fabricantes precisam agora desenvolver carros da nova geração que não levam motores puramente a combustão. Surge então o carro híbrido, que combina uma máquina a combustão com um motor elétrico para conseguir uma redução na emissão de gases.

Veículo elétrico híbrido, de modo simplificado, é um veículo acionado por um motor elétrico cuja energia é suprida por um gerador e uma bateria instalados a bordo. O termo "híbrido" se deve ao fato de que no seu acionamento ele conta com um motor de combustão interna, usado nos veículos convencionais, alimentado por combustível líquido (gasolina, etanol, diesel, etc) e/ou gasoso (gás natural veicular, etc), e também motor(es) elétrico(s) que aciona(m) a(s) roda(s). O motor a combustão também ajuda a alimentar o(s) motor(es) elétrico(s) e recarrega a(s) bateria(s).

Há duas configurações básicas, a “série” na qual somente o(s) motor(es) elétrico(s) acionam diretamente a(s) roda(s), e a “paralela”, na qual o motor a combustão também contribui no acionamento direto das rodas, em paralelo com o motor elétrico, por meio de sistema de engrenagem apropriado.

Os motores híbridos (Figura 1.7) são menos agressivos ao meio ambiente que os motores convencionais e estão se tornando mais populares nos veículos elétricos. As emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são reduzidas em até 50% e as emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) são reduzidas em até 90%.

Estudos e pesquisas estão sendo feitos para trazer de volta o carro puramente elétrico. Avanços em motores elétricos e baterias estão próximos de tornar os carros elétricos mais práticos. Se carros elétricos conseguirem ultrapassar carros a combustão em potência e velocidade, terão o mercado, de acordo com os pesquisadores.

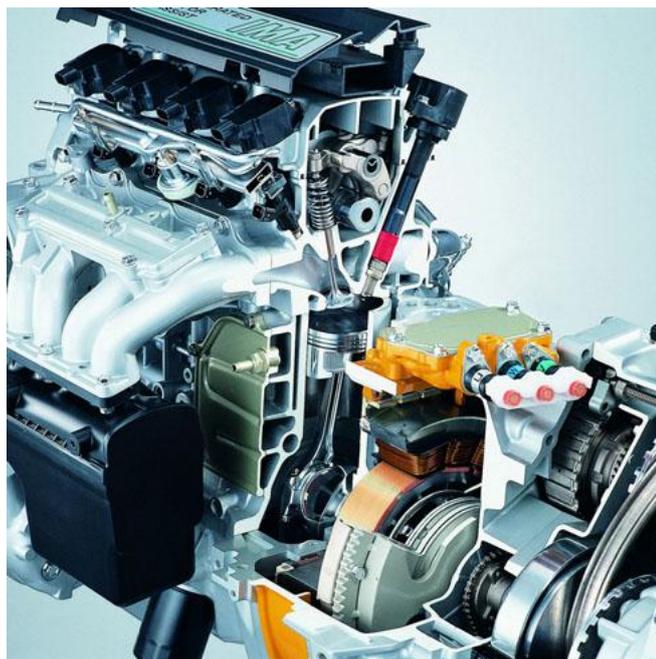


Figura 1.7 – Motor Híbrido do Honda Civic Hybrid 2002

### 1.3.3 – Carros Elétricos com Motores nas Rodas

Em 1900, Ferdinand Porsche, criou o primeiro carro elétrico com motores nas rodas, o Lohner-Porsche (Figura 1.8). Quando construiu o carro, Porsche não focou em carros a combustão, mas sim em carros elétricos.



Figura 1.8 – Lohner-Porsche

Uma grande exposição foi feita em Paris em 1900, foi lá que Porsche apresentou seu carro elétrico ao mundo. Tinha uma velocidade máxima de 50Km/h e podia andar 50Km com uma carga, um desempenho revolucionário para a época.

A tecnologia de motores elétricos nas rodas não evoluiu por muitos anos e poucos foram os carros elétricos lançados com esta tecnologia. Porém, em 2004, o professor Hiroshi Shimizu da Universidade de Keio no Japão, desenvolveu o primeiro supercarro elétrico denominado Eliica (Figura 1.9). O Eliica possui oito motores elétricos de 80HP e 12000rpm instalados nas suas oito rodas, o que o permite alcançar incríveis 400 km/h e acelerar de 0 a 160 km/h em 7 segundos. Possui uma autonomia de 300km e tempo de carga (70%) de 30min. O resultado do teste de aceleração do Eliica comparado com o Porsche 911 Turbo é mostrado na Figura 1.10.



Figura 1.9 – Eliica, o Supercarro Elétrico Japonês

### Results of Eliica Acceleration Test

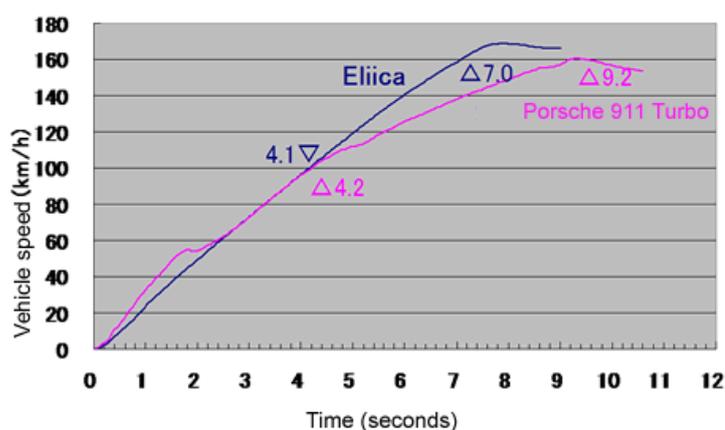


Figura 1.10 – Resultados do Teste de Aceleração do Eliica

Inicia-se a nova era dos veículos elétricos, onde os veículos elétricos superaram carros a gasolina em potência e velocidade conquistando cada vez mais seu espaço no setor automobilístico.

Hoje, muitas montadoras nacionais e importadas já possuem seus carros elétricos circulando nas ruas, alguns ainda em fase de testes. Entre as multinacionais que têm fábrica no Brasil, a Ford e a Chevrolet, por exemplo, investem em carros híbridos no Brasil (Fusion e Volt, respectivamente), talvez devido à grande dependência do país pelo uso de derivados do petróleo e da cana de açúcar como principais combustíveis veiculares, dada a sua abundância na natureza no território nacional, o que tem retardado o investimento em veículos de propulsão puramente elétrica. Entre as importadas, a BMW e a Audi, por exemplo, que também têm seus híbridos, já investem em carros com propulsão puramente elétrica e podemos chamá-los de supercarros elétricos devido a sua potência e velocidade máxima, a BMW com o carro conceito i3 de 170HP e a Audi com seu esportivo elétrico e-tron (Figura 1.11) que possui quatro motores elétricos (um em cada roda) conferindo-lhe uma potência total de 313HP, velocidade máxima de 200Km/h (limitada eletronicamente), aceleração de 0 a 100Km/h em 4,8s e autonomia de 248Km com carga total.



Figura 1.11 – Audi e-tron

### 1.3.4 – O Futuro dos Veículos Elétricos

Estamos perto de termos um número considerável de veículos elétricos circulando pelas ruas de nossas cidades. Os avanços e inovações nesta área vêm crescendo cada vez mais, principalmente devido ao esforço para diminuir as emissões de gases poluentes na atmosfera e à crescente utilização de energias renováveis e limpas.

Num futuro não muito distante os veículos elétricos dominarão de vez o mercado automobilístico sem perdas de potência, velocidade e conforto.

## Capítulo 2

---

### Máquinas Síncronas e Equipamentos da Bancada

Neste capítulo será explicado o funcionamento de uma máquina síncrona e técnicas de controle da mesma. Além disso, serão descritos os equipamentos principais utilizados na bancada de testes montada no Laboratório de Máquinas Elétricas (LabMaq) da UFRJ, bem como a função destes equipamentos nos ensaios. Os outros equipamentos utilizados na bancada de testes estão descritos no apêndice A.

#### 2.1 – Máquinas Síncronas

Uma máquina síncrona é aquela na qual uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura e uma excitação CC é fornecida ao enrolamento de campo. O enrolamento de armadura está quase invariavelmente no estator e usualmente é trifásico. O enrolamento de campo está no rotor. A construção de um rotor de polos lisos é usada para turbogeradores de dois e quatro pólos. A construção com pólos salientes é melhor adaptada aos geradores multipolares hidrelétricos de baixa velocidade, e à maioria dos motores síncronos. A potência CC necessária à excitação é fornecida pelo sistema de excitação.

Em máquinas mais antigas, a corrente de excitação era fornecida tipicamente por meio de *anéis coletores* (ou *deslizantes*) a partir de uma máquina CC, conhecida como *excitatriz* que frequentemente era montada no mesmo eixo que a máquina síncrona. Em sistemas mais modernos, a excitação é fornecida a partir de excitatrizes CA e retificadores de estado sólido (tanto pontes simples a diodos como retificadores de fase controlada). Em alguns casos, a retificação ocorre na parte estacionária da máquina, e a corrente de excitação é fornecida ao rotor por meio de anéis coletores. Em outros sistemas, conhecidos como *sistemas de excitação sem escovas*, o alternador da excitatriz CA está no rotor, assim como o sistema de retificação, e a corrente é fornecida diretamente ao enrolamento de campo sem a necessidade de anéis coletores.

Sob condições de operação em regime permanente, a imagem física do funcionamento de uma máquina síncrona polifásica é vista simplesmente em termos da interação de dois campos

magnéticos. As correntes polifásicas do estator produzem uma onda de fluxo magnético girante, ao passo que as correntes CC no rotor produzem uma onda de fluxo que é estacionária em relação ao rotor.

### 2.1.1 – Controle de Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas só produzem torque na chamada velocidade síncrona. Com o advento da eletrônica de potência, tornou-se possível empregar um conversor eletrônico que produz sinais CA de frequência ajustável para alimentar o motor, o que permite variar sua velocidade.

A Figura 2.1 ilustra as diferentes possibilidades de acionamento eletrônico de máquinas síncronas. Os sistemas de controle estão relacionados a estes acionamentos.

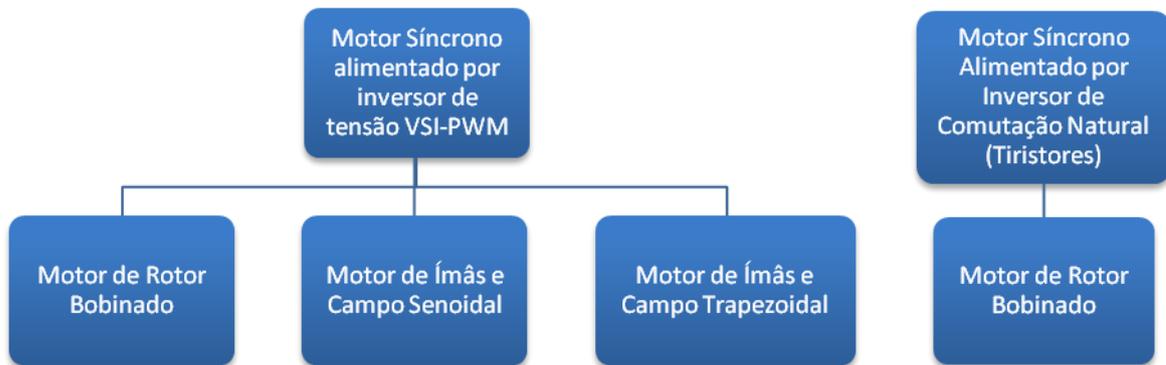


Figura 2.1 – Acionamento Eletrônico de Máquinas Síncronas

A variação da tensão e da frequência de alimentação do motor permite hoje o controle de velocidade sem perda da capacidade de torque. Como as máquinas síncronas operam sem escorregamento, o controle, a princípio, é mais simples. Para os motores de ímã permanente, a principal diferença com relação aos esquemas com motores de indução está no fato da referência nos esquemas de controle vetorial ser dada pela posição do rotor e não do fluxo enlaçado pelo rotor. Isto dispensa o estimador de fluxo e representa uma grande simplificação.

Nos motores com fluxo de entreferro senoidal, a determinação da posição do rotor necessita ser estabelecida com uma precisão maior do que no caso do fluxo trapezoidal. Em contrapartida, os motores de fluxo senoidal apresentam um desempenho melhor e são os preferidos para servoacionamentos.

O controle dos motores síncronos alimentados por inversores de comutação natural a tiristores fica restrito a aplicações de alta-potência. A topologia desta configuração é idêntica à da transmissão em corrente contínua ilustrada na Figura 2.2.

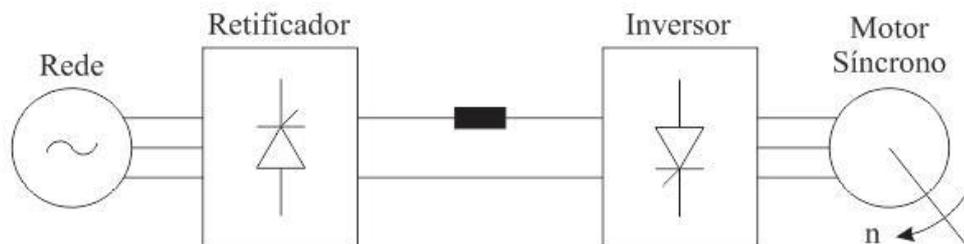


Figura 2.2 – Motor Síncrono Alimentado por Inversor de Comutação Natural

A ponte retificadora opera com ângulos de disparo inferiores a  $90^\circ$  e a ponte inversora com ângulos de disparo entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

O diagrama de blocos da Figura 2.3 mostra um sistema de controle vetorial orientado pelo campo, que é aplicado tipicamente no acionamento de motores síncronos alimentados por PWM (ver Figura 2.1). Um sistema desse tipo é usado nas simulações feitas neste trabalho.

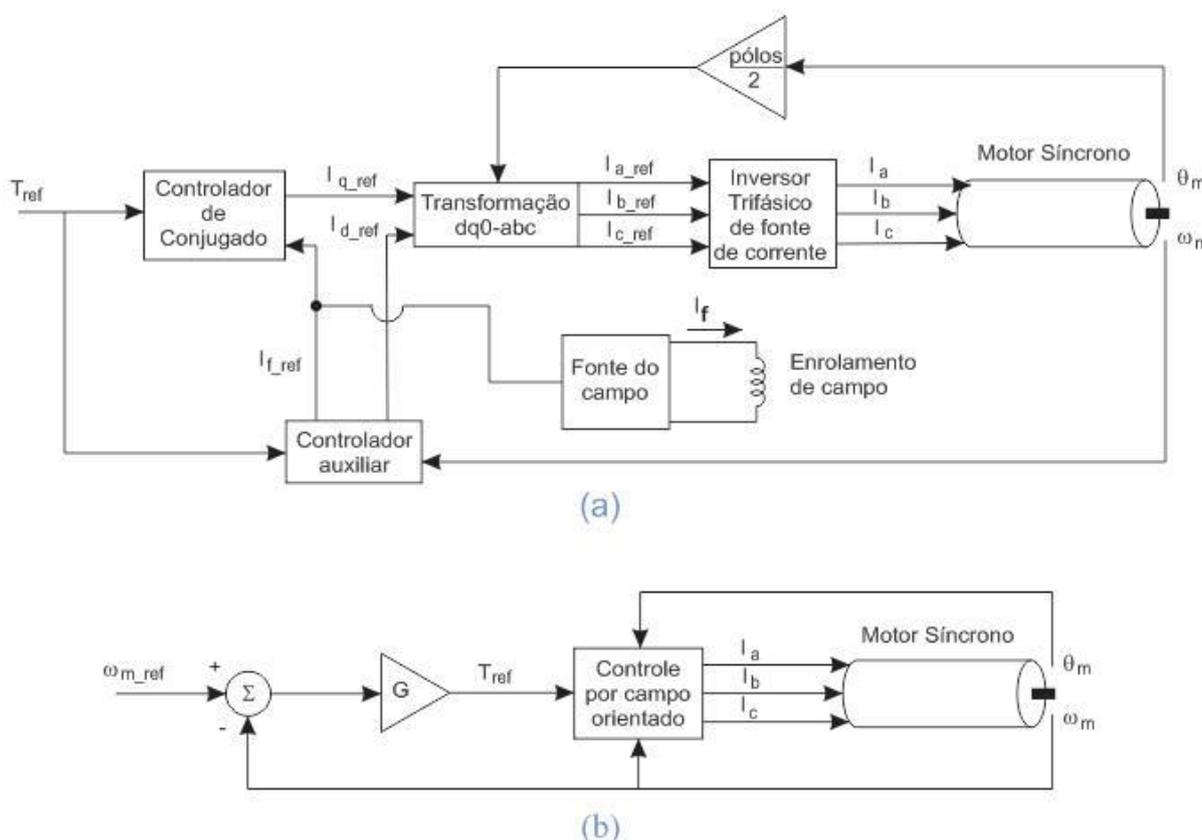


Figura 2.3 – (a) Diagrama de blocos de um sistema de controle vetorial orientado pelo campo; (b) Diagrama de blocos de uma malha de controle de velocidade construída em torno de um sistema (a)

No diagrama, o “Controlador de conjugado” possui como entradas os valores de referência do torque ( $T_{ref}$ ) e da corrente de campo ( $I_{f\_ref}$ ), que também é enviada à “Fonte de campo” responsável pelo fornecimento da corrente de campo  $I_f$  para o “Enrolamento de campo”. O “Controlador auxiliar” determina o valor de  $I_{f\_ref}$  e da corrente de referência de eixo direto ( $I_{d\_ref}$ ), baseado nos valores desejados de corrente e tensão de armadura. A função do “Controlador de conjugado” é calcular a corrente desejada de eixo em quadratura ( $I_{q\_ref}$ ) por meio da equação E2.1.

$$I_{q\_ref} = \frac{2}{3} \left( \frac{2}{\text{pólos}} \right) \frac{T_{ref}}{L_{af} I_{f\_ref}} \quad \text{E2.1}$$

onde:

$L_{af}$  = Indutância de campo da fase a

A “Transformação dq0-abc” necessita de um sensor de posição para determinar a posição angular do rotor de modo a implantar tal transformação.

A Figura 2.3 (b) mostra como o sistema de controle de conjugado da Figura 2.3 (a) pode ser usado como componente de uma malha de controle de velocidade, onde a realimentação de velocidade forma uma malha externa de controle em torno da malha interna de controle de conjugado.

### 2.1.2 – Acionamento de Motor Síncrono por Inversor PWM

Os inversores, necessários no acionamento de máquinas de corrente alternada, produzem sinais de amplitude e frequência a partir de fontes CC. Isto é possível com o emprego da chamada modulação por largura de pulso PWM (“Pulse Width Modulation”).

Para produzir uma tensão de saída senoidal com determinada amplitude e frequência, um sinal senoidal de controle ( $V_s$ ) é comparado com uma onda triangular ( $V_t$ ), conforme mostrado na Figura 2.4 (a). A frequência da onda triangular, chamada de onda portadora, determina a frequência de chaveamento.

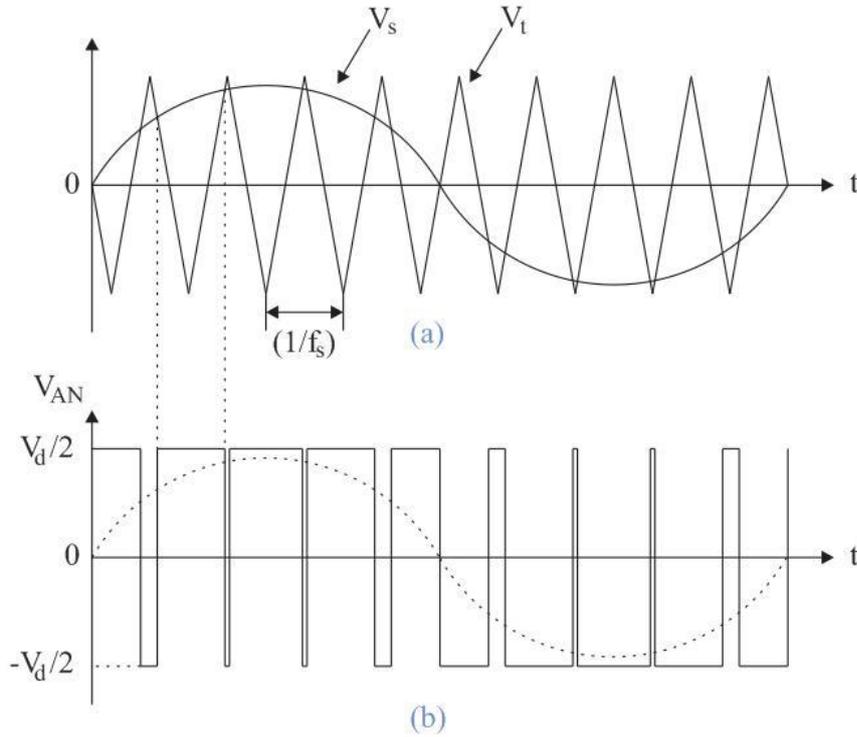


Figura 2.4 – (a) Sinal senoidal + Onda triangular; (b) Sinal PWM gerado

A geração de um sinal chaveado com a predominância de uma componente de primeiro harmônico de frequência  $f_1$  e amplitude  $V_1$  pode ser obtida a partir de uma tensão contínua  $V_d$  aplicando a seguinte lógica de operação ao circuito da Figura 2.5:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Se } V_s > V_t, T_{A+} \text{ fechada, } T_{A-} \text{ aberta} \Rightarrow V_{AN} = V_d/2 \\ \text{Se } V_s < V_t, T_{A+} \text{ aberta, } T_{A-} \text{ fechada} \Rightarrow V_{AN} = -V_d/2 \end{array} \right.$$

As chaves  $T_{A+}$  e  $T_{A-}$  são complementares e não podem estar simultaneamente fechadas, pois levariam a um curto circuito da fonte de alimentação.

O resultado desta operação está mostrado na Figura 2.4 (b). Em tracejado está indicada a componente fundamental ou de primeiro harmônico.

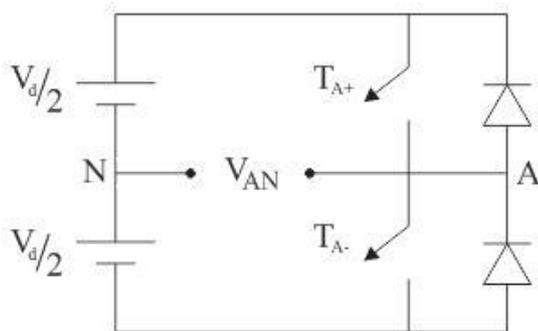


Figura 2.5 – Inversor CC-CA Monofásico

Seja  $f_t$  e  $V_t$  a frequência e a amplitude da onda triangular portadora e  $f_1$  e  $V_1$  a frequência e a amplitude da onda de referência. Define-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{razão de modulação de amplitude, } m_a = V_1/V_t; \text{ e} \\ \text{razão de modulação de frequência, } m_f = f_t/f_1. \end{array} \right.$$

A distribuição de harmônicos, obtida pela série de Fourier, segue a configuração mostrada na Figura 2.6. As componentes harmônicas aparecem em torno das frequências múltiplas de  $m_f$ , segundo a relação:

$$h = jm_f \pm k \quad \text{E2.2}$$

onde:

$h = 1$  corresponde à frequência fundamental

$$j, k \in \mathbb{N}$$

para  $j$  ímpar,  $k$  assume valores pares;

para  $j$  par,  $k$  assume valores ímpares.

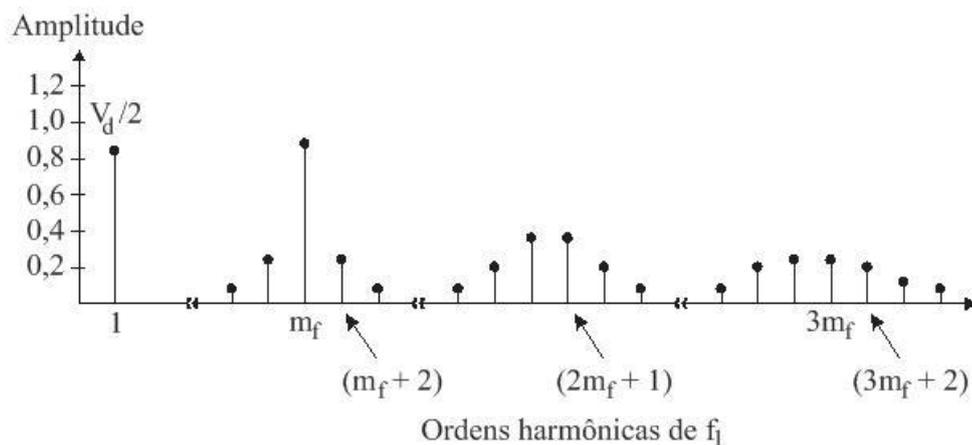


Figura 2.6 – Distribuição de Harmônicos

Para que o sinal gerado só tenha harmônicos ímpares,  $m_f$  deve ser escolhido como um número ímpar. Quanto maior for  $m_f$ , maiores serão as frequências das componentes harmônicas e, portanto, mais fácil será a filtragem desses sinais. Por outro lado, valores elevados de  $m_f$  implicam em chaveamentos mais frequentes e, com isso, maiores serão as perdas de chaveamento.

Para a obtenção de um sinal trifásico, em lugar de três circuitos independentes defasados de  $120^\circ$ , pode-se pensar de forma integrada com o objetivo de minimizar o número de chaveamentos e, com isso, aumentar o rendimento do inversor. A Figura 2.7 esquematiza o inversor trifásico.

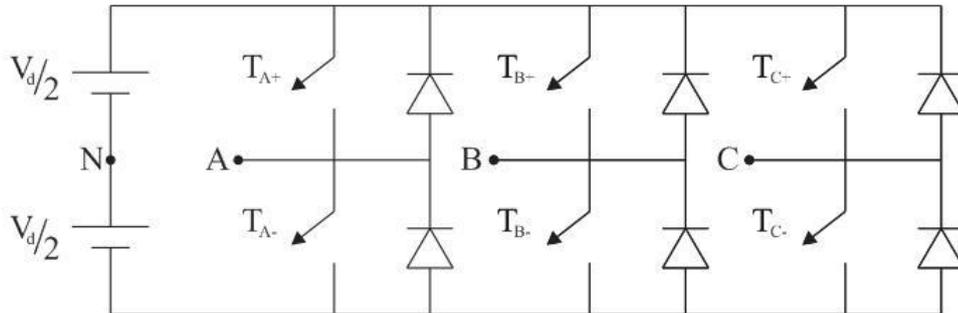


Figura 2.7 – Inversor Trifásico

Definindo-se o vetor espacial  $\vec{V}$  por:

$$\vec{V} = V_{AN}e^{j0} + V_{BN}e^{j2\pi/3} + V_{CN}e^{j4\pi/3}$$

E2.3

a combinação dos possíveis chaveamentos ( $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ) resulta no diagrama vetorial da Figura 2.8, em que “1” corresponde a uma chave superior fechada e “0” a uma chave inferior fechada.

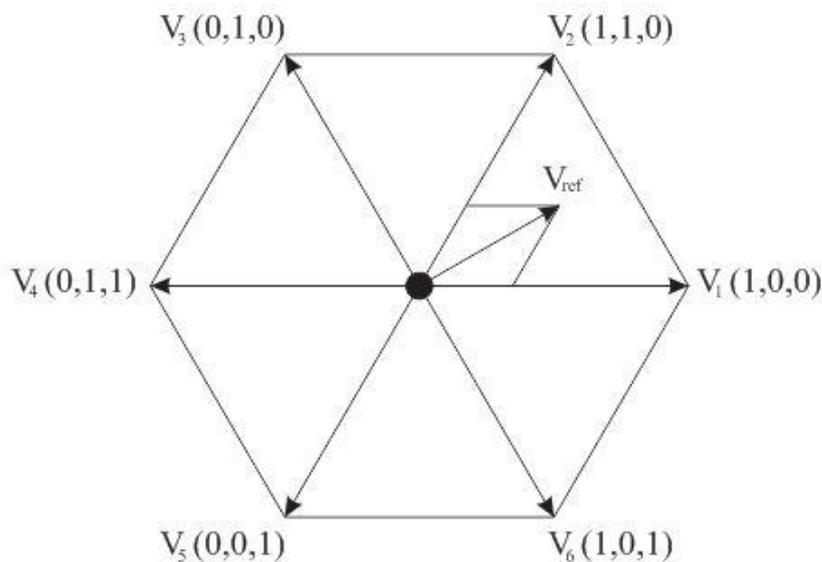


Figura 2.8 – Diagrama Vetorial

Pode-se aproximar qualquer vetor espacial ( $V_{ref}$ ) a partir das seis extremidades do hexágono da Figura 2.8 e vetores intermediários resultantes da combinação de dois adjacentes.

A amplitude pode ser alterada com a ajuda das combinações (0,0,0) ou (1,1,1) que levam a um vetor de amplitude zero. Este método de modulação é conhecido como PWM-vetorial.

É importante ressaltar que a passagem de qualquer vetor para o seu adjacente, bem como para o vetor de amplitude zero, pode se dar com a mudança de estado de apenas um ramo. Isto é que faz com que o chaveamento vetorial conduza a um menor número de transições se comparado com a operação de três comandos independentes para cada ramo (fase).

Para o acionamento de motores elétricos CA existe uma gama de possibilidades para a sua alimentação. Dentre elas está o uso do inversor VSI-PWM (Voltage Source Inverter - PWM) que será usado no acionamento do alternador em estudo (motor síncrono). Neste caso, o inversor fica responsável pelo controle da amplitude e da frequência do sinal alternado de saída. Isso é possível graças ao chaveamento tipo PWM.

A Tabela 2.1 mostra as principais diferenças entres os diversos tipos de acionamentos eletrônicos, inclusive o VSI-PWM, bem como a faixa de utilização.

<b>Conversor de frequência</b>	VSI – PAM	VSI – PWM	CSI Comutação Natural	CSI Comutação Natural
<b>Motor</b>	Síncrono – IP Indução	Síncrono – IP Indução	Síncrono – EI	Indução
<b>Faixa típica de variação de velocidade</b>	1:10	1:1000	1:10	1:10
<b>Faixa típica de potência</b>	10KVA a 300KVA	0,5KVA a 3MVA	1MVA a 20MVA	60KVA a 3MVA
<b>Principais Aplicações</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Máquinas têxteis</li> <li>✓ Ventiladores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Robótica</li> <li>✓ Extrusoras</li> <li>✓ Bombas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Compressores</li> <li>✓ Ventiladores</li> <li>✓ Extrusoras</li> <li>✓ Esteiras Rolantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bombas</li> <li>✓ Ventiladores</li> <li>✓ Centrífugas</li> <li>✓ Esteiras Rolantes</li> </ul>

*PAM – Pulse Amplitude Modulation*

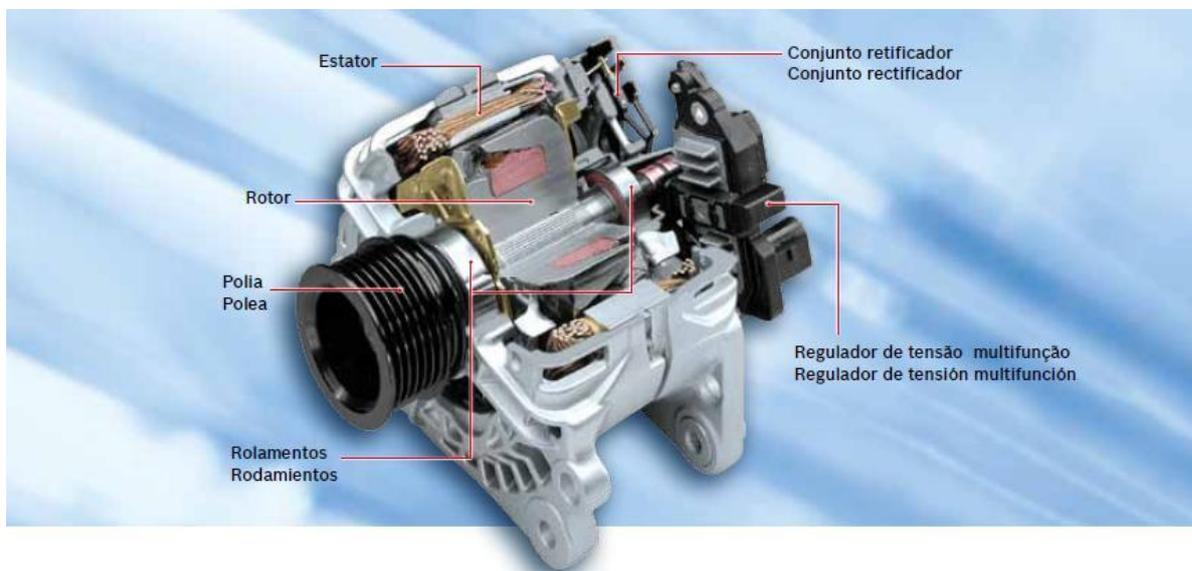
*CSI – Current Source Inverter*

*IP – Ímã Permanente*

*EI – Excitação Independente*

**Tabela 2.1 – Acionamentos eletrônicos de motores elétricos CA**

## 2.2 – Alternador



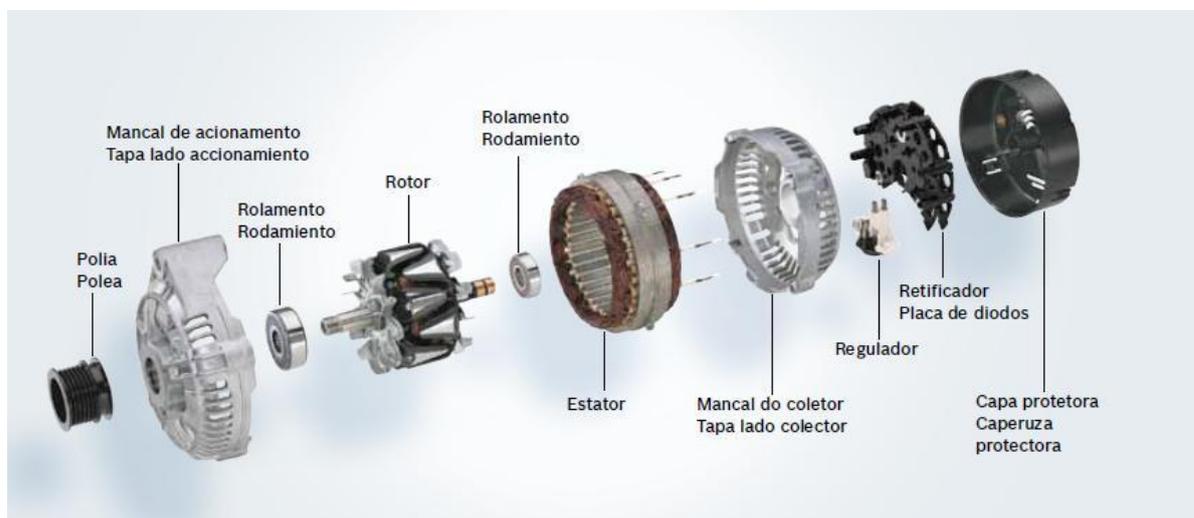
**Figura 2.9 – Alternador (corte interno)**

O alternador, como o mostrado na Figura 2.9, é um gerador síncrono que utiliza o giro do motor do veículo a combustão para gerar energia para carregar a bateria do mesmo. Em outras palavras, ele transforma a energia cinética (mecânica) do motor em energia elétrica necessária para alimentar as cargas como os sistemas de ignição, injeção e os demais equipamentos elétricos. Para isso ele utiliza um conjunto retificador e um regulador eletrônico de velocidade, acoplados em seu corpo na parte posterior que retifica a tensão alternada trifásica produzida nas bobinas da armadura (também conhecida popularmente como “induzido”) do alternador. A tensão gerada pelo alternador poderia variar amplamente, devido às variações da velocidade do motor, mas o regulador controla a corrente de excitação (campo) do rotor de modo a impedir que tais variações sejam propagadas para a tensão retificada nos terminais do alternador, transformando-a em tensão CC aproximadamente constante aceita pela bateria do carro.

### 2.2.1 – Principais Componentes de um Alternador

Com o objetivo de nos familiarizarmos com nosso objeto de estudo, o texto a seguir irá descrever cada parte que compõe um alternador veicular e explicar, de forma sucinta, a atividade que cada uma exerce no funcionamento do mesmo. Como foi dito no capítulo 1, os alternadores são máquinas síncronas compactas e leves. Sua função nos automóveis é de carregar a bateria com a energia extraída do giro do motor, convertendo energia mecânica em energia elétrica.

A Figura 2.10 mostra todas as partes de um alternador veicular da BOSCH em sua sequência de montagem.



**Figura 2.10 - Componentes de um alternador**

- ✚ **Polia:** A polia tem a função mecânica de transmitir o torque do motor do veículo para o eixo do rotor por meio da correia.
- ✚ **Mancais:** Os mancais são responsáveis pela sustentação do eixo do rotor. Além disso, funcionam como um escudo que protege o sistema interno do alternador contra a entrada de resíduos e objetos estranhos que poderiam danificá-lo.
- ✚ **Rolamentos:** Os rolamentos possibilitam ao alternador atingir altas rotações sem que haja ruídos, aquecimento ou desgaste prematuro de seus componentes. Os rolamentos são indispensáveis para o bom funcionamento do alternador.
- ✚ **Rotor:** É no rotor que começa o processo de produção de energia elétrica. Construído sobre um eixo de aço, possui em seu interior uma bobina de cobre fixada em seu eixo. No momento em que a chave de ignição é ligada, o rotor, por meio do coletor, recebe da bateria uma corrente elétrica. Essa corrente, por sua vez, produz o campo magnético que é potencializado pela construção das garras polares de aço. Este campo magnético é que induzirá a produção de corrente elétrica no estator. A quantidade de voltas e o diâmetro dos fios da bobina definem a potência que varia de acordo com a necessidade de corrente elétrica de cada aplicação.

- ✚ **Estatador:** No estator é produzida a energia elétrica necessária ao funcionamento do veículo. As bobinas de fios de cobre são fixadas sobre um núcleo constituído de aço. A corrente elétrica nos fios do estator é induzida pelo campo magnético do rotor.
- ✚ **Regulador:** Por meio dos contatos das escovas de carvão com o coletor, o regulador monitora e regula eletronicamente a tensão do alternador, adequando os níveis de tensão e corrente às condições ideais para o bom funcionamento do alternador. A tensão necessária à produção de corrente deve estar de acordo com o sistema elétrico do alternador, caso contrário todo o sistema pode ser danificado.
- ✚ **Retificador:** A tensão e corrente produzidas no alternador são alternadas e não servem para alimentar os equipamentos elétricos do veículo, nem para carregar a bateria, assim é necessário que sejam retificadas e filtradas. Também conhecida como placa de diodos, o conjunto retificador tem a função de transformar corrente e tensão alternadas em contínuas. Os conjuntos retificadores, em sua maioria, são equipados com diodos Zenner que protegem os equipamentos elétricos das cargas de retorno e são montados de forma a bloquear correntes reversas, impedindo que a bateria se descarregue.

### 2.2.2 – Alternador de Ensaio

Neste projeto será utilizado o Alternador BOSCH NCB1 28V 80A (Figura 2.11) utilizado nos caminhões SCANIA.



Figura 2.11 – Alternador BOSCH NCB1 28V 80A

A motivação para o uso de alternadores como motores elétricos provém do fato de se tratar de máquinas síncronas compactas e mais leves quando comparadas a outras máquinas elétricas

de mesma potência, o que contribuiria para a redução de peso e volume nos projetos de veículos elétricos proporcionando-lhes melhor desempenho. A Tabela 2.2 mostra o comparativo do peso do alternador BOSCH com alguns motores elétricos de mesma potência (3 HP).

Tipo	Marca	Modelo	Peso (Kg)
Alternador	BOSCH	NCB1	7,3
Motores Elétricos	Kohlbach	IP-21	20
	Voges	LT00016	16
	Weg	IP55	26

**Tabela 2.2 – Comparativo do peso do alternador com outros motores elétricos**

No caso do alternador em questão, sua potência máxima pode ser calculada pela fórmula mostrada na equação E2.4:

$$P = V I \quad \text{E2.4}$$

onde os valores de V e I, informados pelo fabricante, são:

$$V = 28V \text{ (Tensão retificada do alternador)}$$

$$I = 80A \text{ (Corrente máxima na saída do retificador)}$$

Substituindo estes valores temos que a potência máxima do alternador é de 2240 W, isto é, 3 HP. Esta seria, teoricamente, a potência máxima que o alternador poderia fornecer para movimentar o veículo quando utilizado como motor elétrico, desconsiderando as perdas mecânicas e elétricas.

### 2.3 – Motor CC

Para levantar as características do alternador, o mesmo foi acionado como gerador por meio de um Motor CC da EQUACIONAL Elétrica e Mecânica (Figura 2.12), tipo EGC2-3A de 0,75 kW, 5A e 1800 rpm. As tensões aplicadas no campo (rotor) e no estator são reguladas por meio de reostatos, ligados a conversores CA-CC, de forma a variar e regular a velocidade de rotação do mesmo como será visto no capítulo 3.



**Figura 2.12 – Motor CC EGC2-3A da Equacional**

Acoplado ao eixo do motor, está um sensor de velocidade como podemos verificar no lado esquerdo do motor da Figura 2.12 e à frente do motor está um sensor de força que mede a força aplicada ao eixo do motor sob carga que multiplicada pela distância do sensor ao eixo nos forneceria o seu torque.

Porém, neste trabalho, não mediremos a velocidade pelo sensor do motor e sim pelo Tacômetro Digital MDT-2238A da fabricante Minipa, pois para utilizarmos o sensor do motor precisaríamos de um encoder que fizesse a interfase entre o mesmo e um computador. Já o torque do alternador será medido pelo Sensor de Torque 1104 da Honeywell por ser mais preciso logo, também não utilizaremos as leituras do sensor de força do motor CC.

## 2.4 – Carga

A carga utilizada para medir o torque do alternador foi feita artesanalmente por meio de 3 resistências de  $3\Omega$ , as mesmas usadas em chuveiros residenciais, ligadas em estrela. Esta configuração foi fixada em um suporte de madeira e mergulhada num tanque cheio d'água conforme mostrado a Figura 2.13 (a).



(a)

(b)

**Figura 2.13 – (a) Suporte de madeira com as resistências (carga); (b) Régua de Bornes de madeira para interligação entre a carga e os terminais do estator do alternador**

A ligação em Y (estrela) foi feita por meio de uma régua de bornes acoplado ao tanque onde estão ligados, também em Y, os terminais do estator do alternador como mostrado na Figura 2.13 (b).

## Capítulo 3

---

### Execução dos Ensaios no Alternador BOSCH

Para se obter as características operacionais do alternador analisado neste trabalho, foram feitos alguns ensaios no Laboratório de Máquinas (LabMq) da UFRJ. Estes ensaios são importantes porque nos dão informações acerca de seu funcionamento e capacidade para que, com os resultados, possamos tirar conclusões sobre a possibilidade de utilizá-lo como motor elétrico em um veículo elétrico, que é o objetivo deste trabalho.

Para estudar a viabilidade da utilização de alternadores deste tipo como motores elétricos para propulsão em veículos foram feitos, no alternador citado, os seguintes ensaios: Determinação da forma de onda da tensão terminal  $E_t$  para diversas correntes de campo  $I_f$ , Ensaio de Circuito Aberto e Ensaio Sob Carga.

Além dos ensaios, o alternador foi modelado no software PSIM, tomando como base, para as características do mesmo, a análise dos resultados dos ensaios acima mencionados, ajustando os parâmetros para obter aproximadamente as mesmas características de tensão induzida e de torque medidos nos ensaios, para simular sua operação como motor elétrico em um veículo elétrico.

De posse das informações a respeito das características e funcionalidades de cada equipamento da bancada apresentados no anexo, podemos agora esquematizar a montagem da mesma.

Na montagem base (utilizada em todos os ensaios) o Motor CC, cujas tensões no rotor e no estator são variadas por reostatos e convertidas pelos conversores CA-CC como mencionado no item 2.5, é acoplado ao Alternador por meio do Sensor de Torque de forma a fazer com que todo o conjunto gire na mesma velocidade. A Fonte CC Digital alimenta o campo do rotor do alternador de forma a criar um campo magnético que, ao girar, faz variar o enlace de fluxo magnético nas bobinas do estator e, conseqüentemente, induz tensão nas mesmas, de acordo com a equação E3.1.

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{E3.1}$$

onde:

$\lambda$  = fluxo magnético enlaçado pelas bobinas do estator

$e$  = tensão elétrica induzida nos terminais do estator

A relação entre o campo magnético criado pelo rotor e o fluxo magnético induzido no estator é mostrada na equação E3.2.

$$\lambda = N \cdot B \cdot S \quad \text{E3.2}$$

onde:

$N$  = número de espiras enlaçadas

$B$  = campo magnético induzido no entreferro

$S$  = superfície periférica da expansão polar

A Figura 3.1 mostra, esquematicamente, a montagem básica descrita acima e a Figura 3.2 mostra uma fotografia da montagem base, ainda sem as conexões para alimentação do campo e para interligação das bobinas do estator na bancada de ensaio do LabMaq.

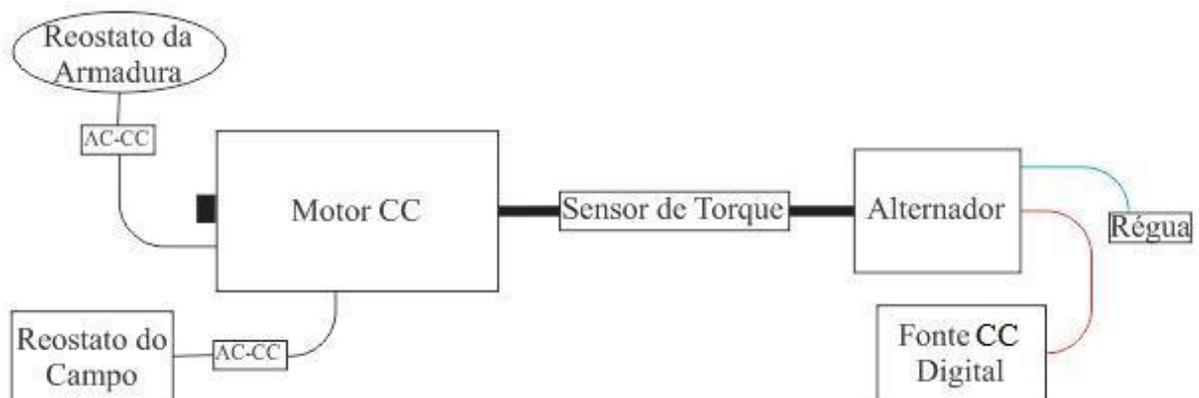


Figura 3.1 – Esquema da montagem base

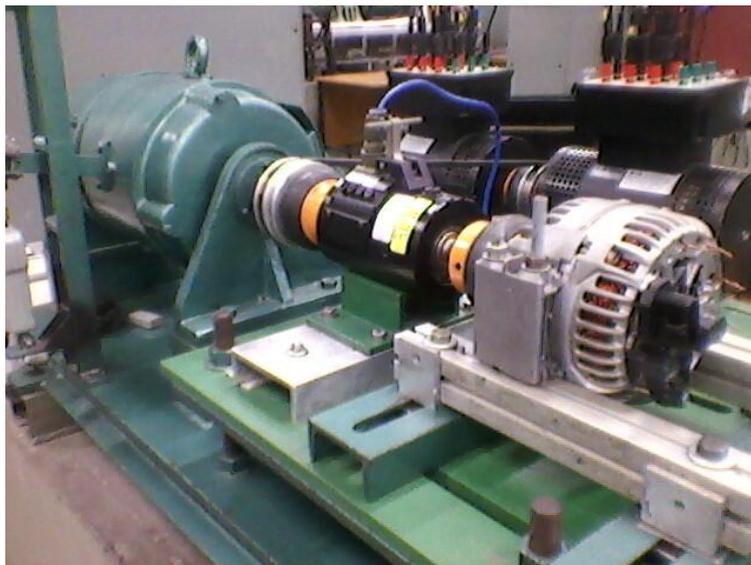


Figura 3.2 – Montagem base sem alimentação (LabMaq)

### 3.1 – Forma de Onda de $E_t$

A fim de estudar o comportamento da tensão de terminal “ $E_t$ ” (tensão do estator) do alternador, foi levantada uma gama de curvas para 4 velocidades diferentes, 900rpm, 1200rpm, 1500rpm e 1800rpm. Para cada velocidade foram aplicadas ao rotor correntes de campo nos valores de 0,2A, 0,6A, 1,0A e 1,4A.

O ensaio foi realizado da seguinte forma: Conectou-se o osciloscópio ao computador e sua ponteira nos terminais de uma fase do estator. Fixando cada velocidade de rotação acima mencionada, variou-se a corrente de campo aplicada por meio da fonte CC conectada ao mesmo.

O esquema desta ligação é mostrado na Figura 3.3.

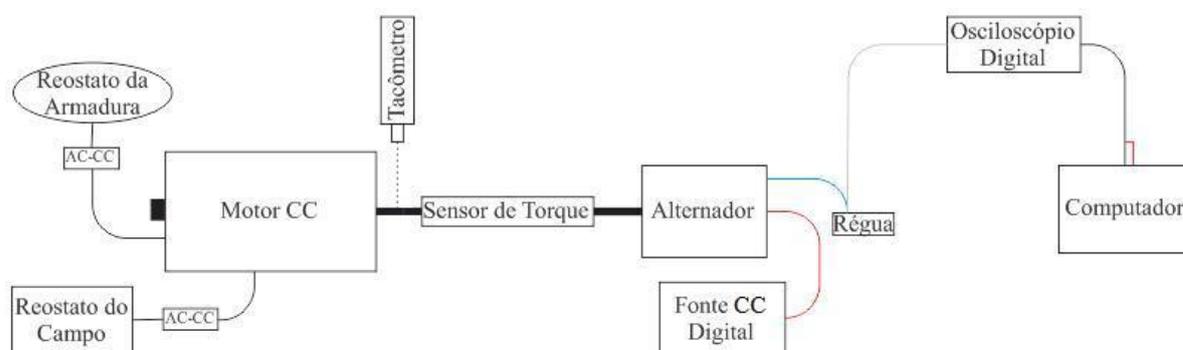
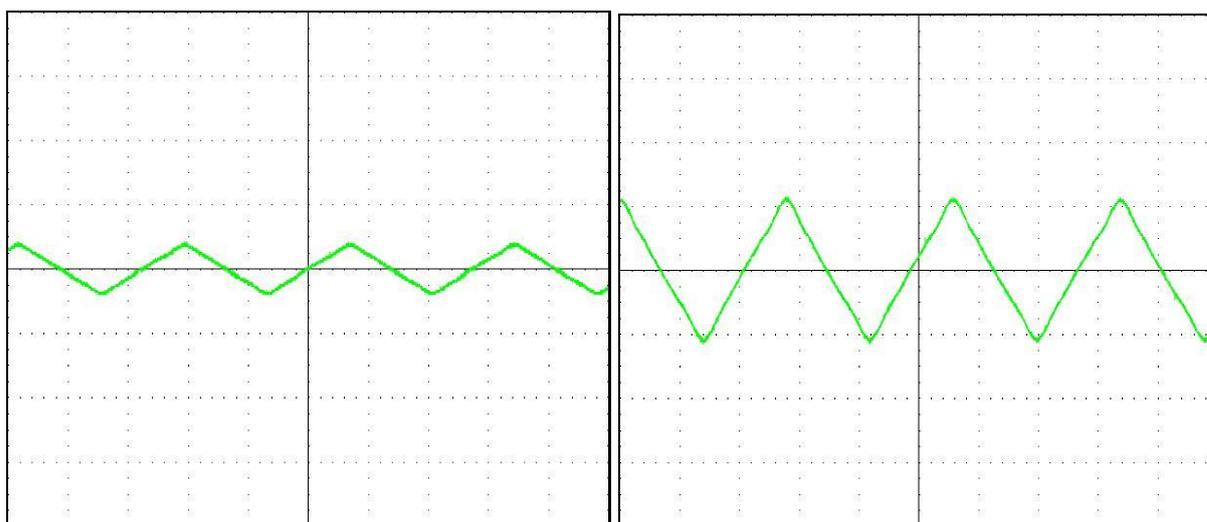


Figura 3.3 – Esquema da montagem para obtenção das formas de onda de  $E_t$

### 3.1.1 – Resultados

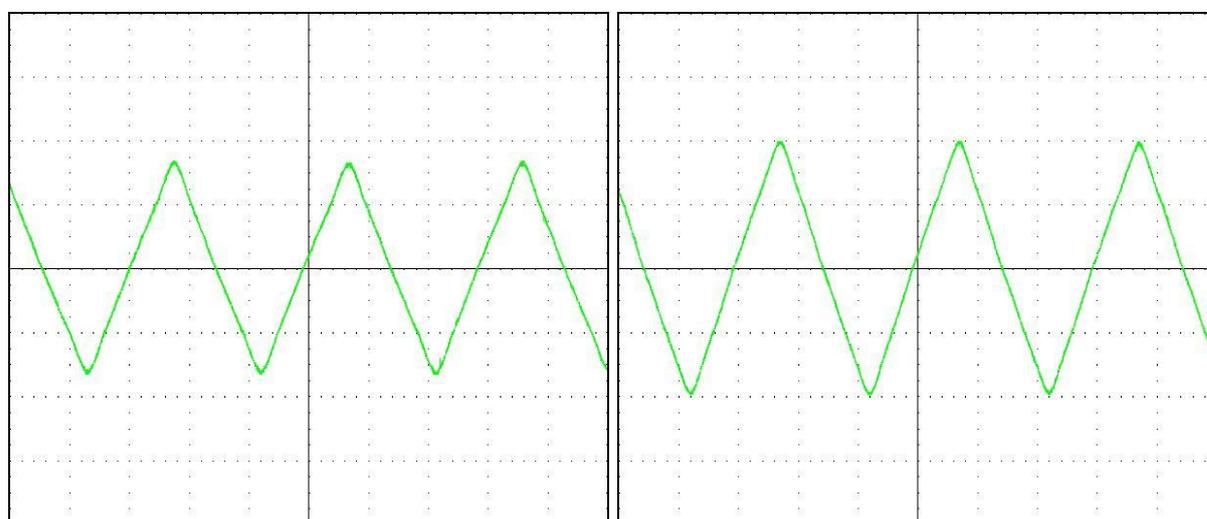
As formas de onda da tensão  $E_t$  mostradas no osciloscópio para  $I_f = 0,2A$ ,  $0,6A$ ,  $1,0A$  e  $1,4A$ , respectivamente, são:

✚ Para 900rpm



$I_f = 0,2A$

$I_f = 0,6A$



$I_f = 1,0A$

$I_f = 1,4A$

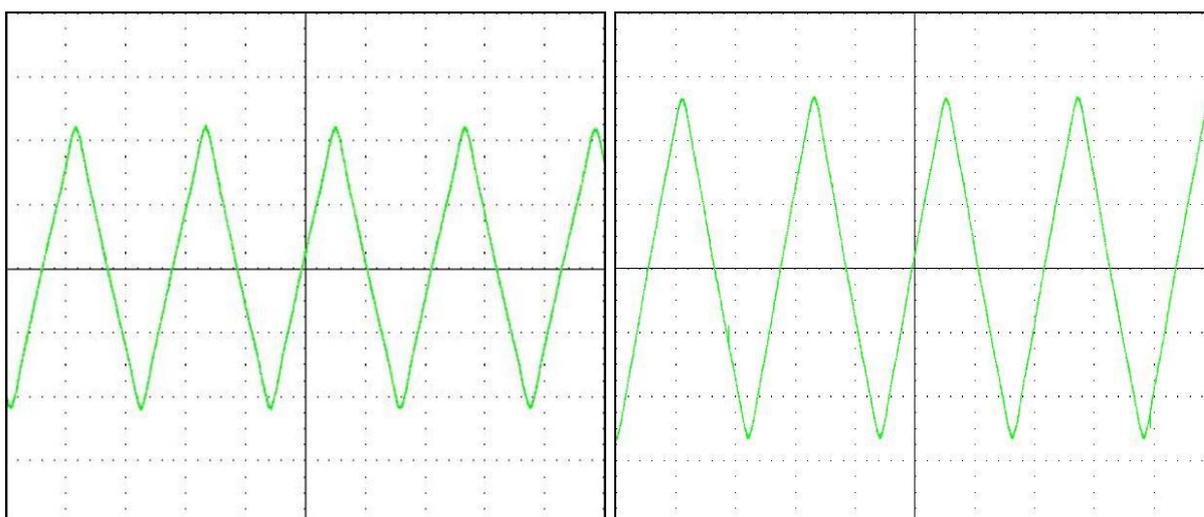
Figura 3.4 – Formas de onda de  $E_t$  para 900rpm (escala no eixo x: 4ms/div)

✚ Para 1200rpm



$I_f = 0,2A$

$I_f = 0,6A$

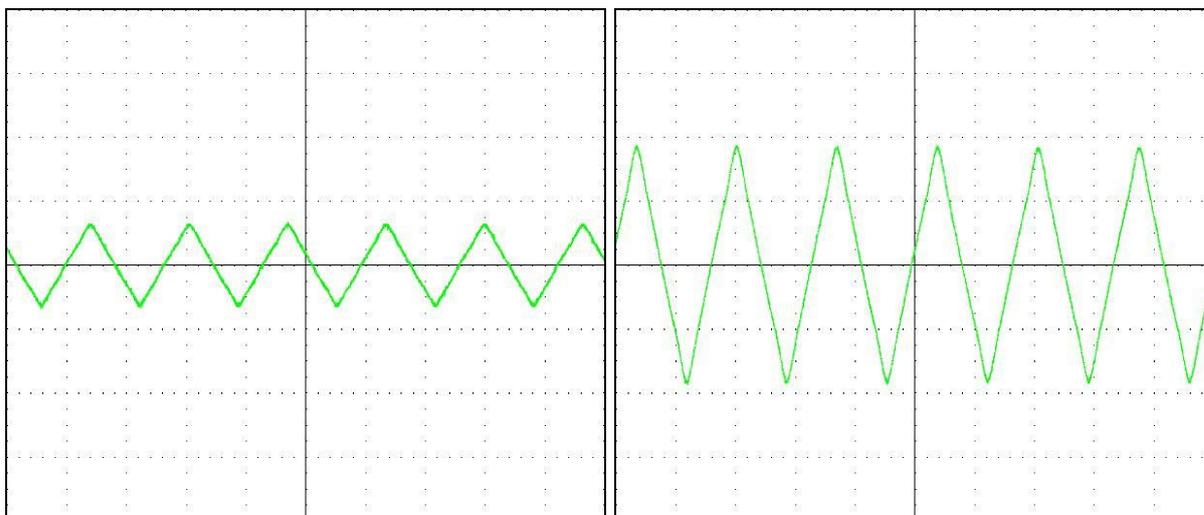


$I_f = 1,0A$

$I_f = 1,4A$

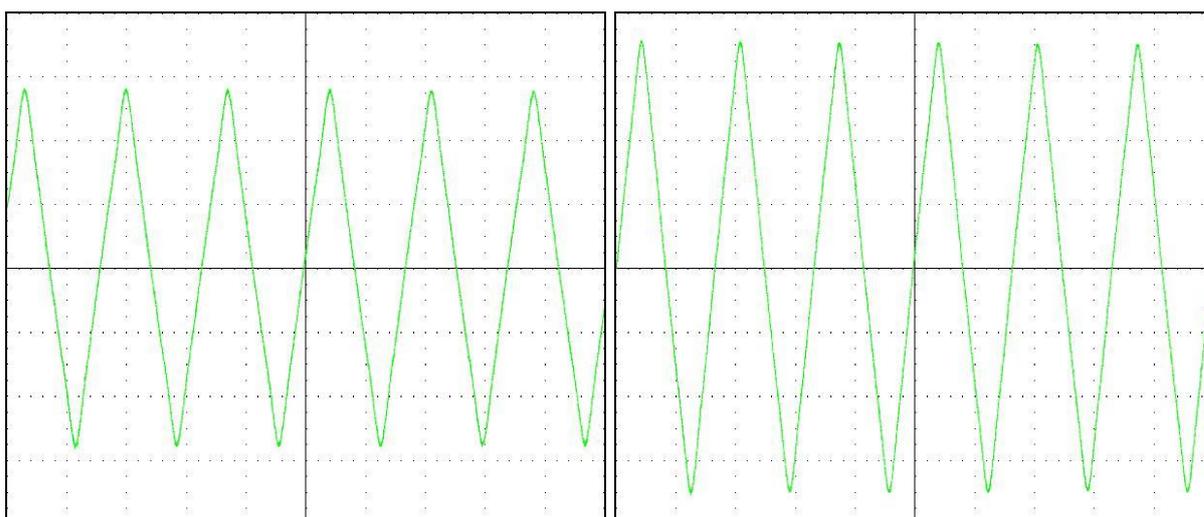
Figura 3.5 – Formas de onda de  $E_t$  para 1200rpm (escala no eixo x: 4ms/div)

✚ Para 1500rpm



$I_f = 0,2A$

$I_f = 0,6A$

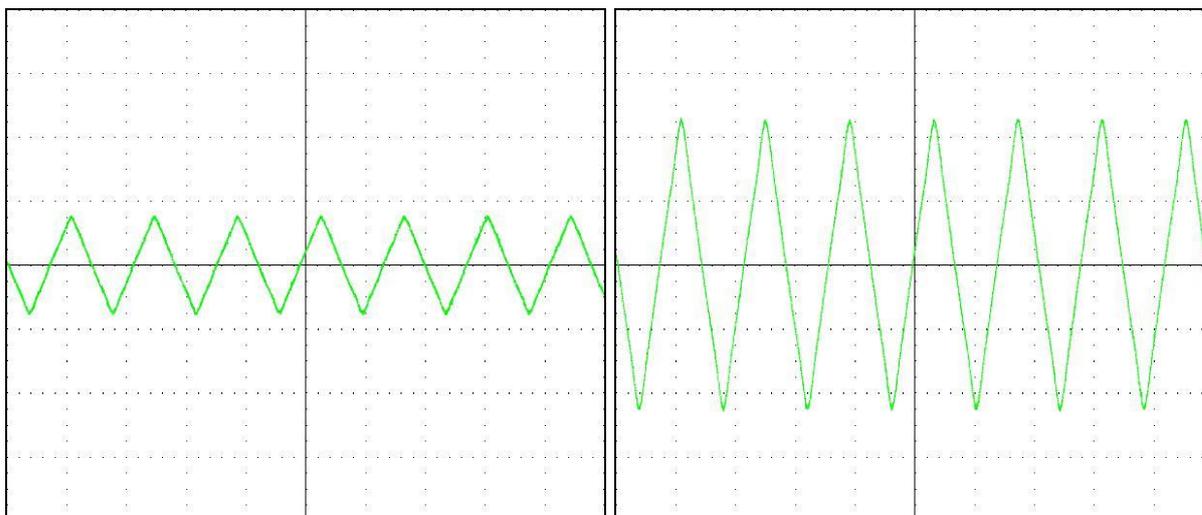


$I_f = 1,0A$

$I_f = 1,4A$

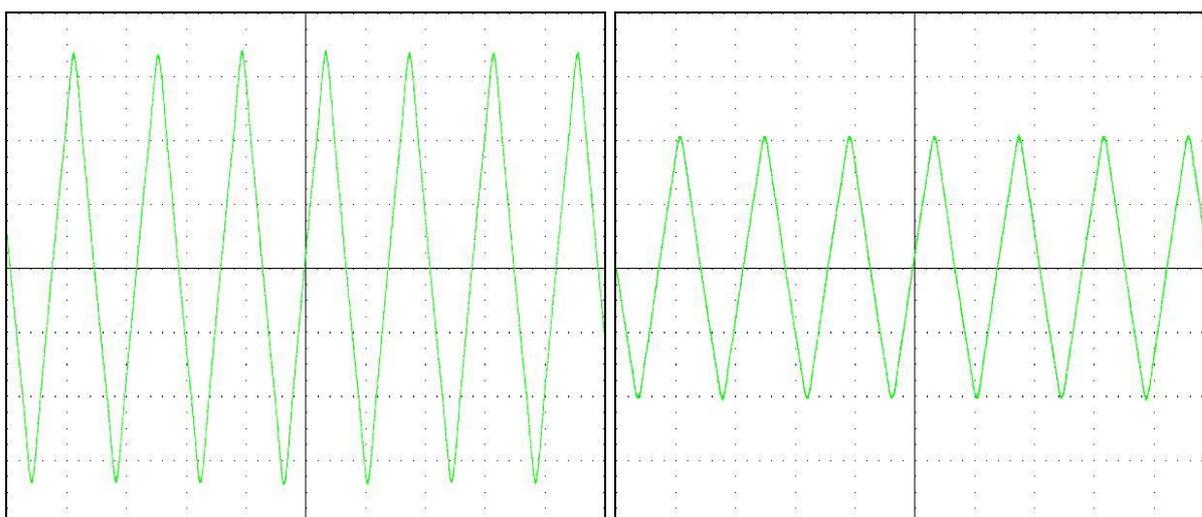
Figura 3.6 – Formas de onda de  $E_t$  para 1500rpm (escala no eixo x: 4ms/div)

✚ Para 1800rpm



$I_f = 0,2A$

$I_f = 0,6A$



$I_f = 1,0A$

$I_f = 1,4A$

Figura 3.7 – Formas de onda de  $E_t$  para 1800rpm (escala no eixo x: 4ms/div)

### 3.1.2 – Análise

Claramente, pode-se perceber que as formas de onda da tensão terminal  $E_t$  mostradas nas Figuras 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 não são senoidais, como esperado para tensão terminal de uma máquina síncrona, e sim triangulares. Porém tal efeito é justificável e podemos comprovar que também é aceitável.

A comprovação de que tais formas de onda são aceitáveis vem da análise das equações citadas. Veremos:

De E3.1 e E3.2 temos que

$$B = \frac{1}{NS} \int e \cdot dt \quad \text{E3.3}$$

Normalmente a tensão terminal  $E_t$ , representada por “e” na equação E3.3, é uma senóide logo, a curva do campo magnético é normalmente uma cossenóide, ou senóide defasada de  $\pi/2$  rad, de acordo com a equação E3.3.

Como visto nas Figuras 3.4 a 3.7, a forma de onda da tensão terminal  $E_t$  do alternador não é uma senóide e sim uma onda triangular. Porém, esta onda foi gerada pela interação do campo magnético do rotor com os enrolamentos do estator e este necessariamente deve ter a forma de uma onda senoidal ou aproximadamente senoidal.

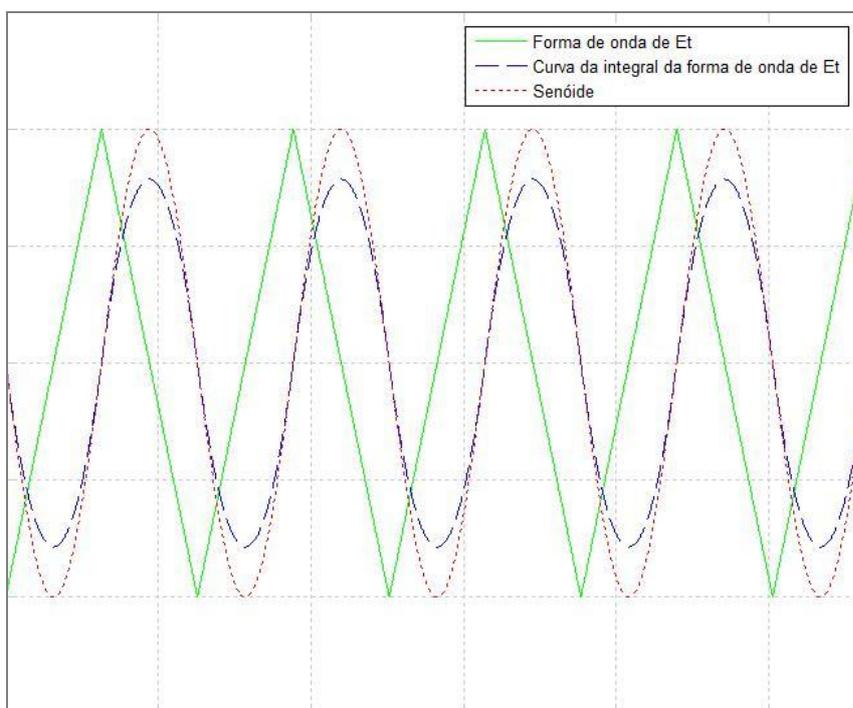
Sabendo disso, simulou-se no Matlab uma forma de onda triangular parecida, por exemplo, com a da medida para  $I_f = 1,4A$  e  $n = 1200$  rpm (quarta curva da Figura 3.5). Construída a curva triangular e analisando a mesma como sendo uma composição de retas (função do 1º grau) com inclinação positiva e negativa alternadamente, integrou-se esta curva reta por reta. O resultado é uma sucessão de parábolas com concavidades positivas e negativas, respectivamente, pois a integral de uma equação do 1º grau (reta) nos fornece uma equação do 2º grau (parábola). Vejamos então a resposta do Matlab.

Comandos do Matlab:

```
% Rotina para construção da forma de onda da tensão Et e sua integral

for k = 0:1:8
    t = k*pi:0.01:k*pi+pi;
    f = sawtooth(t,0.5);
    plot(t,f,'g')
    hold on
    axis([0 28.2 -1.5 1.5]);
    x = transp(t);
    y = transp(f);
    ftype = fitype('a*sawtooth(b*x)');
    fit1 = fit(x,y,ftype,'startpoint',[1 1]);
    inty = integrate(fit1,x,x(1));
    plot(x,inty,'b--')
    plot(t,-sin(t),'r:')
end
legend('Forma de onda de Et','Curva da integral da forma de onda de Et','Senóide')
grid on
```

Resultado do Matlab:



**Figura 3.8 – Simulação e análise da forma de onda de  $E_t$  para  $I_f = 1,4A$  e  $n = 1200$  rpm**

Pela Figura 3.8, podemos verificar que a curva referente à integral da forma de onda de  $E_t$  realmente resultou numa forma de onda composta por uma sucessão de parábolas. Para efeito de comparação, foi plotada a senóide pontilhada, cujo período é o mesmo da triangular. Percebe-se que a parábola encontrada para o campo magnético se assemelha muito a senóide de comparação, como a mostrada na Figura 3.8.

Assim, comprovamos que a forma de onda triangular encontrada para a tensão terminal  $E_t$  do alternador é aceitável, pois a forma de onda do campo magnético, resultante da integração da forma de onda de  $E_t$ , se assemelha muito a uma senoidal, sendo razoável a aproximação.

### 3.2 – Ensaio a Vazio

Com o objetivo de levantar curvas de magnetização do alternador para verificar o comportamento da tensão terminal para diversas correntes de campo em diferentes velocidades, foi realizado um ensaio a vazio (ou de circuito aberto).

O ensaio a vazio é realizado com a máquina em velocidade síncrona e com os terminais de armadura a vazio (sem carga). A seguir lê-se a tensão terminal para uma série de valores de corrente de campo. Se a potência requerida para impulsionar o gerador durante o ensaio a

vazio for medida, as perdas rotacionais a vazio podem ser obtidas. Essas perdas são constituídas por perdas associadas à rotação, atrito nos mancais, perdas com a ventilação, e também por perdas no núcleo correspondente ao fluxo presente no gerador na ausência de carga. Na velocidade síncrona, as perdas por atrito nos mancais e com o ar são constantes, ao passo que as perdas em vazio no núcleo são uma função do fluxo, que por sua vez é proporcional à tensão a vazio.

Para este ensaio, foi utilizado o mesmo esquema de ligação usado para a obtenção da forma de onda da tensão terminal (Figura 3.3). Por meio do osciloscópio pôde-se obter os valores das tensões  $E_t$  para cada corrente de campo  $I_f$  aplicada no rotor.

### 3.2.1 – Resultados

O alternador foi novamente ensaiado nas velocidades 900, 1200, 1500 e 1800 rpm, variando-se a corrente de campo do alternador de 0 a 2,0A. A Tabela 3.3 mostra, em detalhes, os resultados do ensaio.

$I_f$ (A)	$E_t$ (V)			
	900 rpm	1200 rpm	1500 rpm	1800 rpm
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,1	1,38	1,63	2,14	2,61
0,2	2,27	2,97	3,78	4,49
0,3	3,44	4,50	5,72	6,76
0,4	4,57	6,07	7,57	8,90
0,5	5,63	7,52	9,33	11,00
0,6	6,61	8,94	11,00	13,10
0,7	7,47	10,20	12,50	14,80
0,8	8,31	11,40	14,10	16,70
0,9	9,02	12,50	15,60	18,40
1,0	9,69	13,30	16,90	20,10
1,1	10,30	14,10	18,30	21,60
1,2	10,70	15,10	19,50	22,90
1,3	11,30	15,70	20,40	24,10
1,4	11,60	16,10	21,30	24,90
1,5	11,80	16,60	21,70	25,70
1,6	12,20	16,80	22,20	26,20
1,7	12,30	17,00	22,80	26,60
1,8	12,50	17,10	23,20	27,00
1,9	12,60	17,20	23,40	27,50
2,0	12,60	17,30	23,50	27,80

Tabela 3.3 – Dados do ensaio de circuito aberto

Da Tabela 3.3 construiu-se, com auxílio do Excel, as curvas de magnetização do alternador, para as quatro velocidades mencionadas acima, mostradas no gráfico da Figura 3.9.

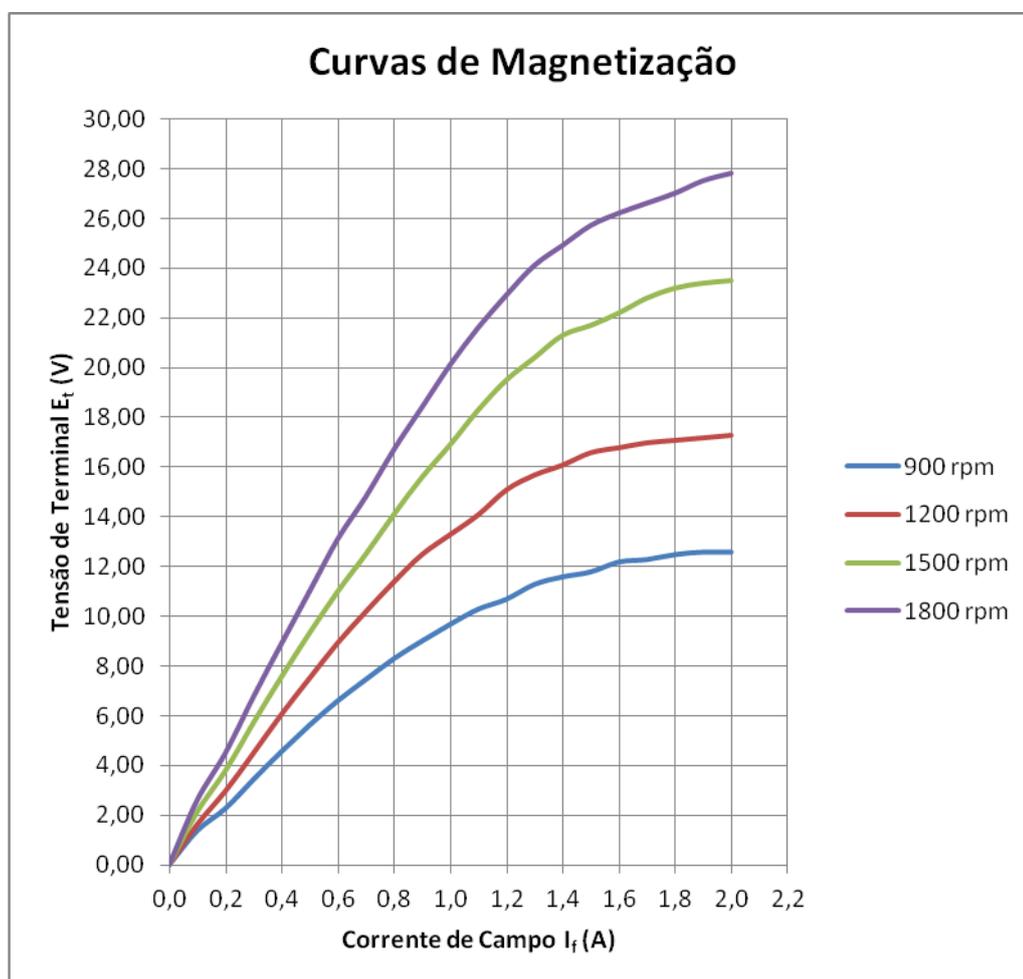


Figura 3.9 - Curvas de Magnetização do alternador

### 3.2.2 – Análise

De posse das curvas de magnetização, pode-se estimar o valor da corrente de campo (ou de excitação) máxima  $I_{f\_max}$ . Esta será a máxima corrente que se pode aplicar ao rotor de forma que o mesmo não sature. A saturação ocorre quando a tensão  $E_t$  deixa de variar linearmente com a corrente de campo. Pelas curvas, podemos perceber que a máxima corrente antes da saturação das curvas está em torno de 0,8A. Portanto, definiremos a corrente de excitação de campo do rotor do alternador como:

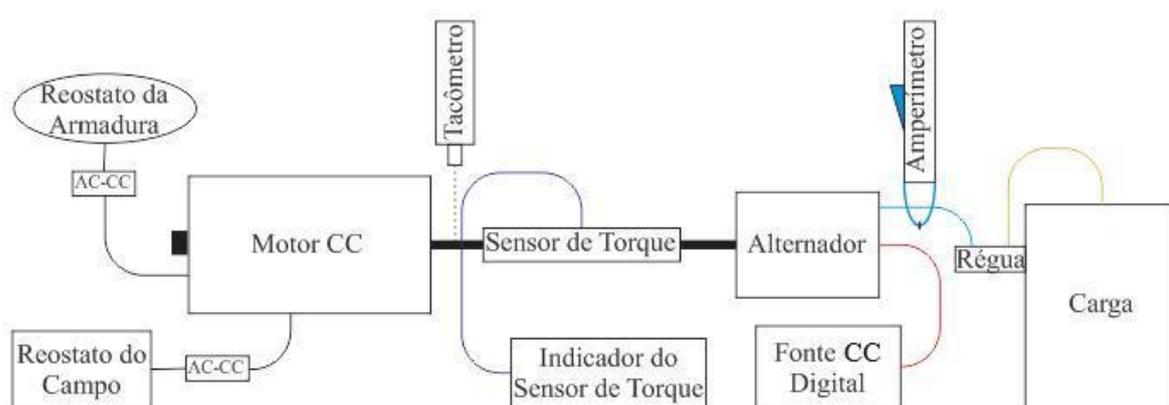
$$I_{f\_max} = 0,8A.$$

### 3.3 – Ensaio Sob Carga

Para um veículo, quanto maior o torque, maior a capacidade de ele entrar em movimento ou superar um aclave.

Em motores elétricos de corrente alternada, como é o caso do alternador, dada uma determinada velocidade de rotação, o torque varia com a corrente de campo aplicada no rotor do mesmo e com a corrente que circula nas bobinas da armadura.

A fim de verificar o comportamento do torque do alternador para rotações e correntes de campo diferentes, foi realizado o ensaio sob carga usando a configuração de bancada descrita na Figura 3.10.



**Figura 3.10 – Esquema da montagem para o ensaio sob carga**

O Tacômetro mostra a velocidade de rotação do eixo por meio de um feixe de laser. Ao fazer girar o eixo do rotor alimentado pela fonte CC, uma tensão é induzida no estator do alternador e, devido à carga aplicada, uma corrente circula pelas bobinas do estator. Esta corrente é a corrente de armadura  $I_a$  e é medida pelo amperímetro alicate. O valor da corrente de campo do estator do alternador pode ser extraído pelo visor da própria fonte CC. Os valores do torque do alternador para cada par ( $I_a$ ,  $I_f$ ) de cada velocidade são mostrados no mostrador do indicador do sensor de torque.

OBS: Antes da realização do ensaio sob carga, o indicador de sensor de torque teve que ser calibrado. Para isso, aplicou-se nove torques conhecidos (4 positivos, 4 negativos e zero) ao eixo do sensor de torque de modo a aferir o indicador de sensor de torque para que este mostre valores de torque precisos.

### 3.3.1 – Resultados

Os dados coletados foram organizados na Tabela 3.4 para melhor compreensão e análise.

$I_f$ (A)	900 rpm		1200 rpm		1500 rpm		1800 rpm	
	T (N.m)	$I_a$ (A)	T (N.m)	$I_a$ (A)	T (N.m)	$I_a$ (A)	T (N.m)	$I_a$ (A)
0,0	0,17	0,13	0,2	0,19	0,22	0,25	0,25	0,26
0,1	0,25	0,6	0,25	0,8	0,25	0,8	0,3	0,94
0,2	0,3	1,1	0,3	1,41	0,29	1,42	0,4	1,97
0,3	0,4	1,53	0,46	1,93	0,41	2,24	0,5	2,64
0,4	0,5	2,08	0,63	2,54	0,59	2,99	0,68	3,48
0,5	0,7	2,51	0,78	3,22	0,85	3,74	0,94	4,31
0,6	0,9	3,1	1,08	3,87	1,17	4,54	1,26	5,2
0,7	1,1	3,48	1,34	4,39	1,48	5,18	1,54	5,97
0,8	1,4	3,93	1,72	4,96	1,85	5,94	2,09	6,89
0,9	1,7	4,36	2,06	5,55	2,26	6,53	2,5	7,66
1,0	1,9	4,73	2,37	6,06	2,63	7,22	2,81	8,3
1,1	2,3	5,15	2,76	6,61	3,07	7,84	3,34	9,02
1,2	2,6	5,46	3,06	7,01	3,52	8,47	3,78	9,6
1,3	2,9	5,85	3,42	7,44	3,89	8,97	4,26	10,27
1,4	3,1	5,98	3,73	7,86	4,28	9,39	4,67	10,88

Tabela 3.4 – Dados do ensaio de torque do alternador

De posse desses dados e com o auxílio do Excel, gerou-se o gráfico da Figura 3.11 que mostra as curvas da relação  $T/I_a$  em função da corrente de campo  $I_f$  para as velocidades de 900, 1200, 1500 e 1800rpm.

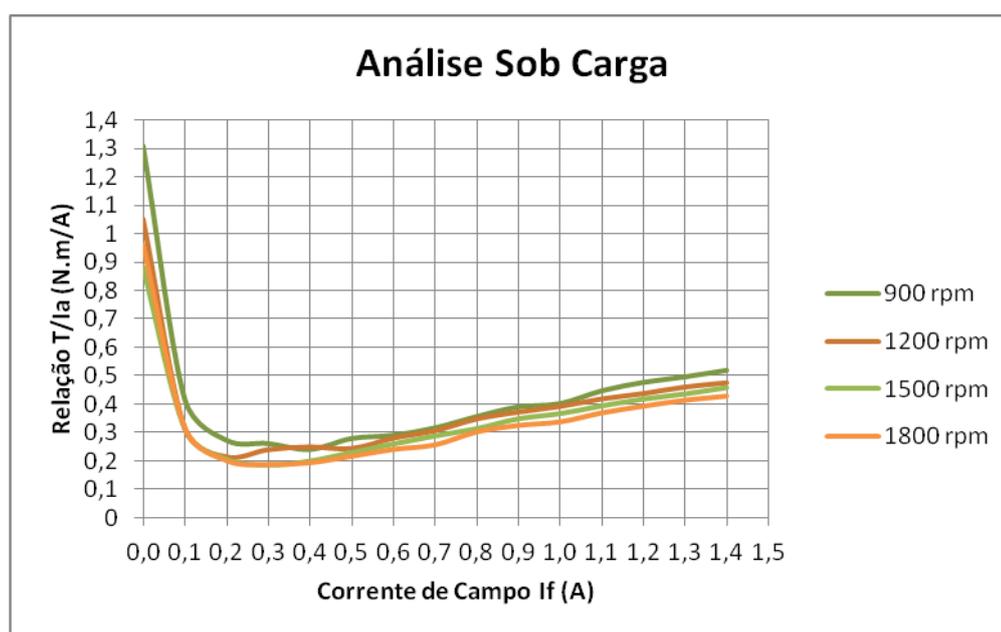


Figura 3.11 – Curvas de  $T/I_a$  x  $I_f$  para análise do alternador sob carga

### 3.3.2 – Análise

O fundo de escala do sensor de torque é de 10N.m, sendo assim, os valores medidos para  $I_f < 0,5A$  não são precisos por estarem no início da escala. Além disso, quando o ponto de operação se afasta muito das condições nominais a magnetização do ferro das máquinas elétricas pode ter muita não-linearidade.

Para nosso estudo, o mais importante é o comportamento da relação  $T/I_a$  nas proximidades da corrente máxima de excitação  $I_{f\_max}$  do campo do alternador, ou seja, próximo das condições nominais de operação do motor. Como mostrado no item 3.2.2, a corrente máxima de excitação do campo do alternador é de 0,8A.

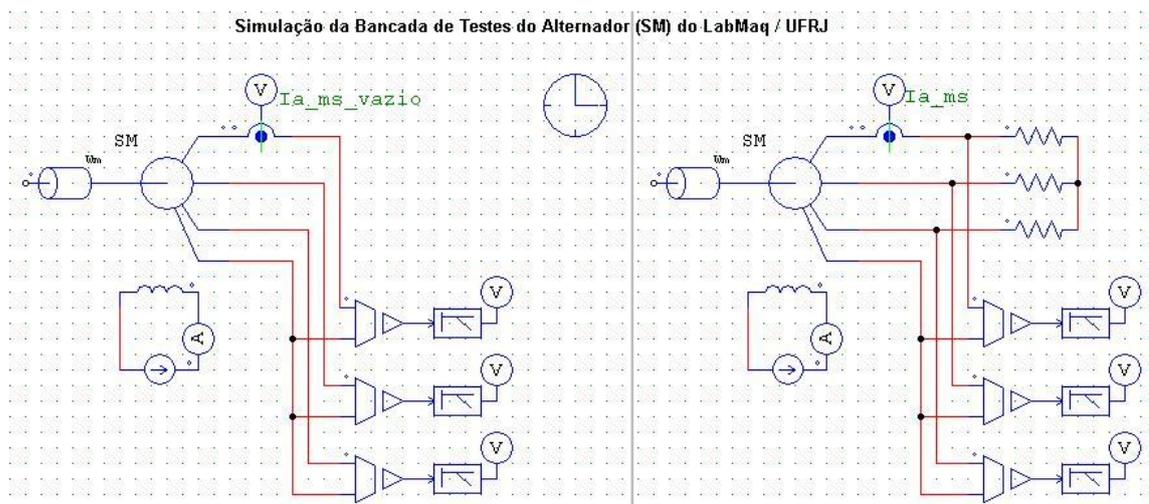
Sendo assim, analisando-se os resultados, constatamos que a relação  $T/I_a$  varia de forma aproximadamente linear em função de  $I_f$  para valores próximos a 0,8A. Além disso, a variação com a velocidade é pequena e podemos desprezá-la.

## 3.4 – Simulação do Alternador como Motor

Devido à falta de equipamento no laboratório, o acionamento do motor teve que ser simulado. Para tal simulação, fez-se uso do software PSIM para modelar o motor ajustando os parâmetros do modelo de máquina síncrona existente no software, para que obtivéssemos os mesmos resultados dos ensaios feitos na bancada. Uma vez modelados, os parâmetros foram inseridos num modelo de máquina síncrona presente num exemplo de acionamento de máquina no software Simulink do Matlab. Com isso, o acionamento do alternador como motor pode ser simulado de forma fidedigna aos parâmetros reais da máquina.

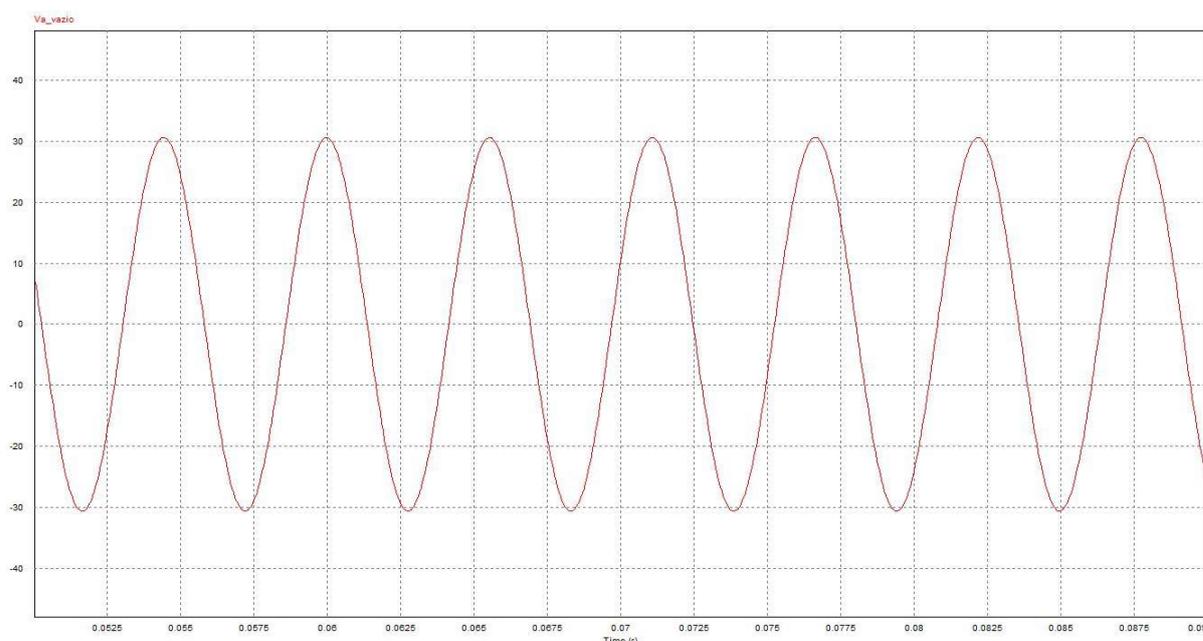
### 3.4.1 – Modelagem do Alternador no PSIM

Um esquema de ligação foi configurado no software de simulação PSIM de forma a reproduzir os ensaios feitos no alternador na bancada de testes do LabMaq na UFRJ. Este esquema é mostrado na Figura 3.12.



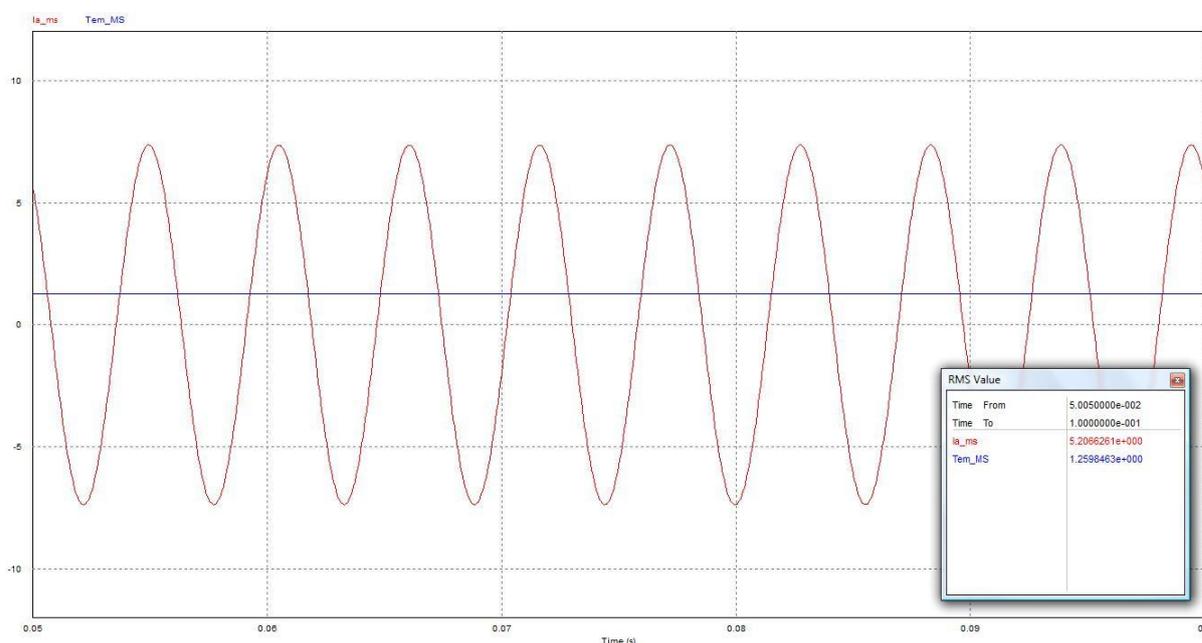
**Figura 3.12 – Modelagem do Alternador no PSIM**

A configuração da esquerda (sem carga) refere-se à reprodução da obtenção da forma de onda de  $E_t$  e a da direita (com carga resistiva de três resistores de  $3\Omega$  ligados em Y) à reprodução do ensaio sob carga. Para tanto, fez-se o eixo girar a uma rotação fixa de 1800rpm por meio do elemento “Wm” representado na figura e aplicou-se uma corrente de 0,6A no campo do motor representado pelo elemento “SM” na figura. Por tentativas, alteramos os parâmetros padrão da máquina (SM) para ajustá-la ao modelo do alternador. Alguns parâmetros como:  $n^\circ$  de polos = 12, resistência do estator =  $0,05\Omega$  e resistência de campo =  $8,8\Omega$  já haviam sido medidos na bancada, os outros foram estimados e ajustados.



**Figura 3.13 – Resultado da simulação da forma de onda de  $E_t$**

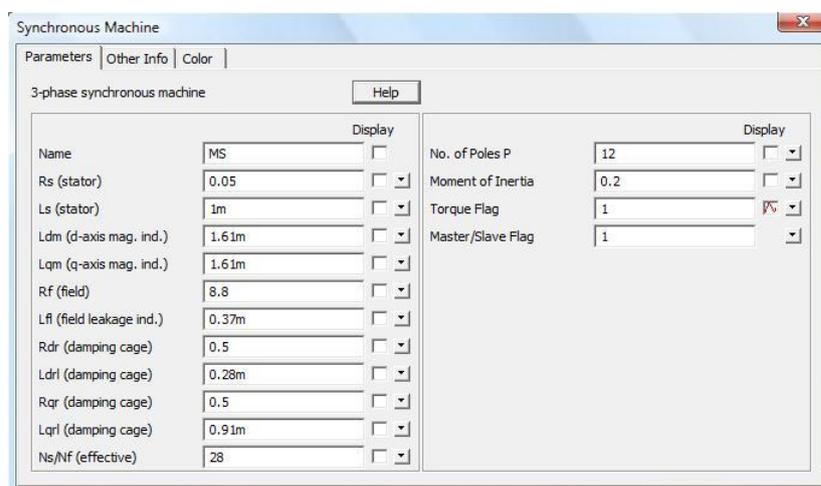
Pela Figura 3.13 podemos perceber que a frequência da forma de onda de  $E_t$  encontrada na simulação está bem próxima da obtida no ensaio (vide 2º gráfico da Figura 3.7).



**Figura 3.14 – Resultado da simulação do ensaio sob carga**

Pela Figura 3.14 nota-se que o valor de pico da corrente de armadura da fase A está próxima do obtido no ensaio sob carga ( $I_{a\_pico} = 5,2 * \sqrt{2} = 7,3A$ ). Além disso, pode-se verificar que o torque e a corrente de armadura mostrados na janela da mesma figura conferem com os valores da Tabela 3.2 (valores de T e  $I_a$  para  $I_f = 0,6A$  e  $n = 1800rpm$ ).

Diante desses resultados podemos considerar satisfatória a modelagem dos parâmetros do alternador mostrado na Figura 3.15.



**Figura 3.15 – Parâmetros do alternador modelado**

### 3.4.2 – Acionamento do Alternador no Simulink

Uma vez modelado o Alternador, seus parâmetros foram transferidos para um modelo de acionamento de máquina síncrona do Simulink intitulado “ac6\_example\_simplified.mdl”. Este modelo aciona uma máquina síncrona de ímã permanente, que não é o nosso caso, porém, como utilizamos valores iguais para as indutâncias magnéticas de eixos d e q,  $L_{dm} = L_{qm} = 1,61\text{mH}$  (vide Figura 3.15) e usaremos uma alimentação constante no enrolamento de campo, nosso modelo se aproxima muito de uma máquina síncrona de ímã permanente, então usaremos este modelo, porém com os parâmetros obtidos na modelagem no PSIM.

O circuito completo do Simulink (entradas, modelo da máquina síncrona, demux para sincronização da saída com a referência e Scope para mostrar os resultados) utilizado no acionamento do modelo do alternador é mostrado na Figura 3.16.

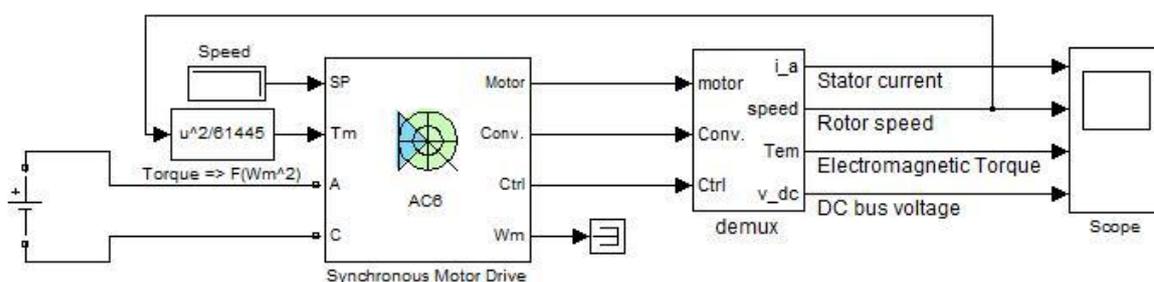


Figura 3.16 – Circuito para simulação do acionamento do alternador (motor)

O motor é alimentado por um inversor PWM (Pulse-width modulation) que é construído usando um Bloco de Ponte Universal. A malha de controle de velocidade utiliza um controlador PI para produzir as referências de fluxo e torque para o bloco de controle de vetores (demux). O bloco de controle vetorial calcula as três correntes de linha do motor correspondentes às referências de fluxo e torque do motor e então alimenta o motor com essas correntes utilizando um regulador de corrente trifásica.

Aplicou-se 48V na tensão CC entre os terminais A e C do inversor para simular um conjunto de 4 baterias de 12V ligadas em série.

O circuito do demux é mostrado na Figura 3.17. O demux faz com que as curvas da simulação e as da referência sejam mostradas num mesmo gráfico para que possam ser comparadas.

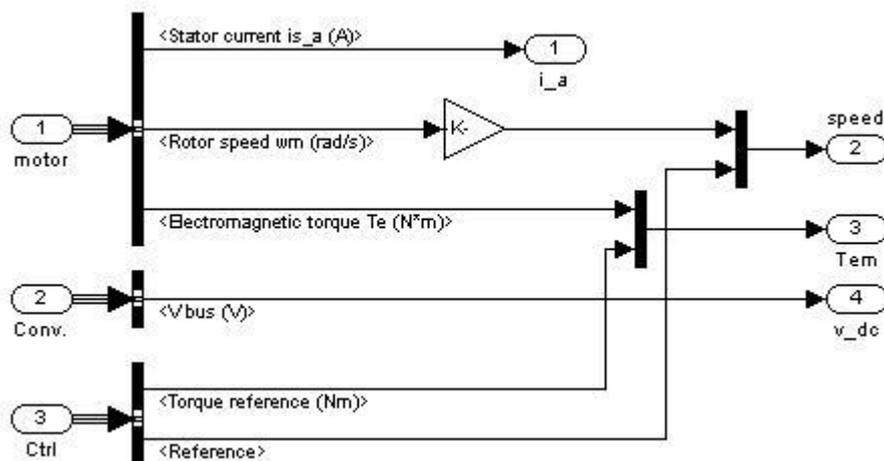
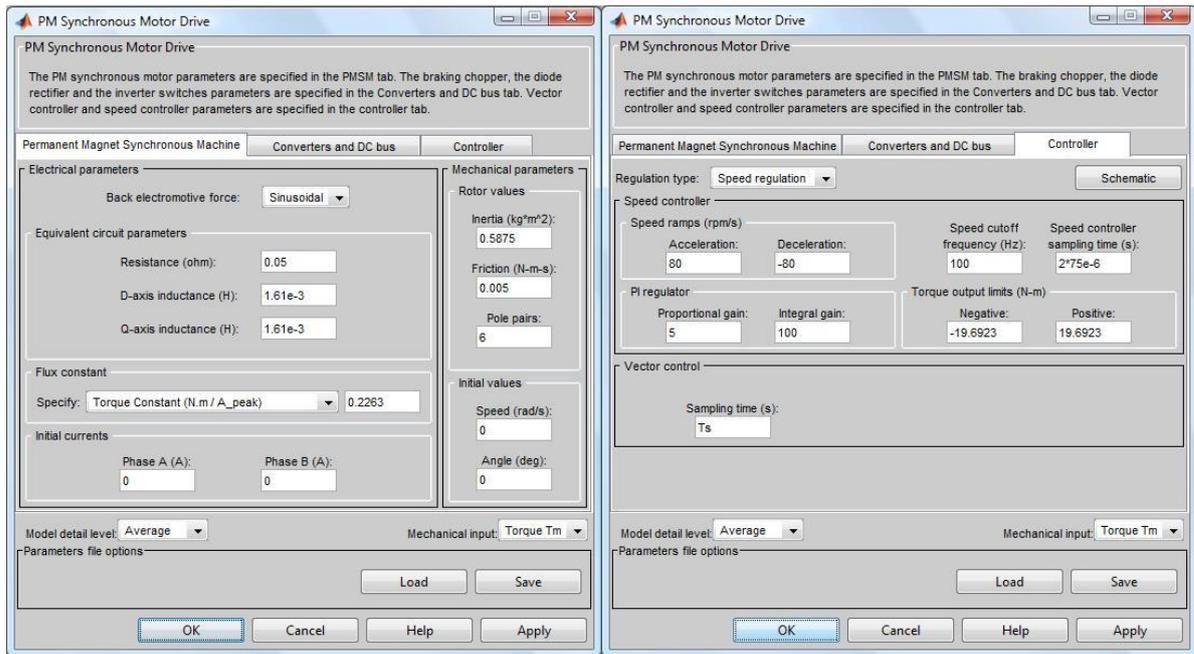


Figura 3.17 – Circuito do demux

A Figura 3.18 (a) mostra a aba de configuração dos parâmetros da máquina síncrona de ímã permanente. Nesta tela os dados importantes para nossa modelagem são: Resistência ( $0,05\Omega$ ), Indutâncias de eixo d e q ( $1,61\text{mH}$ ), Inércia e especificação do tipo de constante usada para quantificar a magnetização da máquina. Este último parâmetro fará as vezes da configuração da excitação de campo, inexistente na máquina de ímã permanente. Para tanto, utilizaremos a configuração de “Constante de Torque ( $\text{N.m/A\_pico}$ )” por já termos os valores da relação torque por corrente medidos no ensaio sob carga (item 3.3), porém a corrente medida no ensaio estava em valor eficaz logo, para a modelagem dividiremos a relação medida por  $\sqrt{2}$ .

A inércia será calculada pela 2ª Lei de Newton ( $T = J.\alpha$ ), onde T é o torque, J é a inércia total e  $\alpha$  é a aceleração angular. O momento de inércia representa a inércia do veículo referida ao eixo do motor, tendo sido ajustado para corresponder a uma determinada especificação de aceleração. Será adotada a configuração do uso de um alternador em cada uma das quatro rodas do veículo, logo, o momento de inércia do motor simulado será  $\frac{1}{4}$  do momento de inércia total do veículo ( $J_{\text{motor}} = J/4$ ).

A Figura 3.18 (b) mostra a aba do controlador da máquina síncrona. Nesta aba, os parâmetros importantes são: Aceleração e Torque.



(a) (b)  
**Figura 3.18 – (a) Parâmetros da Máquina Síncrona; (b) Parâmetros do Controlador**

A aceleração foi estimada assumindo que o veículo elétrico pudesse acelerar de 0 a 800rpm em 10s ( $\alpha = 80\text{rpm/s} = 8,38\text{rad/s}^2$ ) e para o cálculo do torque máximo será novamente utilizada a relação  $T/I_a$  do gráfico da Figura 3.3, resultante do ensaio de torque, onde a corrente máxima, segundo especificações do alternador, é de  $I_{a\_max} = 80\text{A}$ . Porém, esta corrente é a máxima fornecida à bateria do veículo após a retificação ( $I_{a\_max} = 1,3 \cdot I_{a\_pico}$ ) no seu uso normal. Como retiramos o retificador para estudamos o acionamento do alternador, o torque máximo será calculado pelo produto  $0,32 \cdot I_{a\_pico}$ , onde 0,32 é a relação  $T/I_a$  para  $I_f = 0,8\text{A}$  (vide Figura 3.11).

O modelo da máquina recebe como entrada um degrau de velocidade na simulação, porém, a variação de velocidade será atenuada pela aceleração especificada anteriormente e pela influência da inércia. Este modelo também terá como entrada um torque configurado para variar quadraticamente com a velocidade ( $u^2/k$ ), como comumente ocorre com os veículos em movimento, onde  $u$  é a velocidade do veículo e  $k$  é uma constante que definirá o torque máximo aplicado ao veículo.

Todos os cálculos mencionados acima foram realizados segundo uma rotina criada no Matlab, mostrada a seguir, que fornece estes parâmetros para configurações referentes à  $I_f$  igual a 0,4A, 0,6A, 0,8A, 1,0A e 1,2A para que, pelo menos, 5 possibilidades diferentes pudessem ser

estudadas. Utilizaremos a configuração para  $I_f = 0,8A$ , pois esta é a corrente máxima de magnetização do alternador.

Rotina de cálculo dos parâmetros da simulação do acionamento do alternador como motor elétrico em um veículo elétrico:

```
% CÁLCULO DOS PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

clc

velocidade = 1100; % velocidade "n" do motor (rpm) - ENTRADA
relacao = [0.23 0.27 0.32 0.37 0.44]; % T/Ia médio - referente à If = [0.4 0.6 0.8
1.0 1.2] (gráfico)
alfa = 8.38; % aceleração estimada de um veículo elétrico pequeno (rad/s^2)
flux_const = relacao/sqrt(2); % parâmetro do modelo T/Ia_pico
torque = (80/1.3)*relacao; % torque máximo do motor (N.m)
inercia = (1/4)*torque/alfa; % inércia do motor por roda (quatro rodas) (kg.m^2)
for i = 1:5
    div_velocidade(i) = velocidade^2/torque(i); % constante que divide n^2 -
ENTRADA
end

'Parâmetros da simulação'

% Entrada:
'Dados de entrada:'
velocidade
div_velocidade

% Motor:
'Dados do motor:'
flux_const
inercia

% Controlador:
'Dados do controlador:'
torque
```

O Resultado desta rotina é:

Parâmetros da simulação

Dados de entrada:

velocidade =

1100

div\_velocidade =

1.0e+004 \*

8.5489 7.2824 6.1445 5.3142 4.4688

Dados do motor:

flux\_const =

0.1626 0.1909 0.2263 0.2616 0.3111

inercia =

0.4223 0.4957 0.5875 0.6793 0.8078

Dados do controlador:

torque =

14.1538 16.6154 19.6923 22.7692 27.0769

Então, para a configuração referente a  $I_f = 0,8A$ , temos:

➤ Dados de entrada:

✚ velocidade =  $n = 1100\text{rpm}$

✚ div\_velocidade =  $k = 61445$

➤ Dados do motor:

✚ flux\_const =  $T/I_{a\_pico} = 0,2263$

✚ inercia =  $J/4 = 0,5875\text{kg.m}^2$

➤ Dados do controlador:

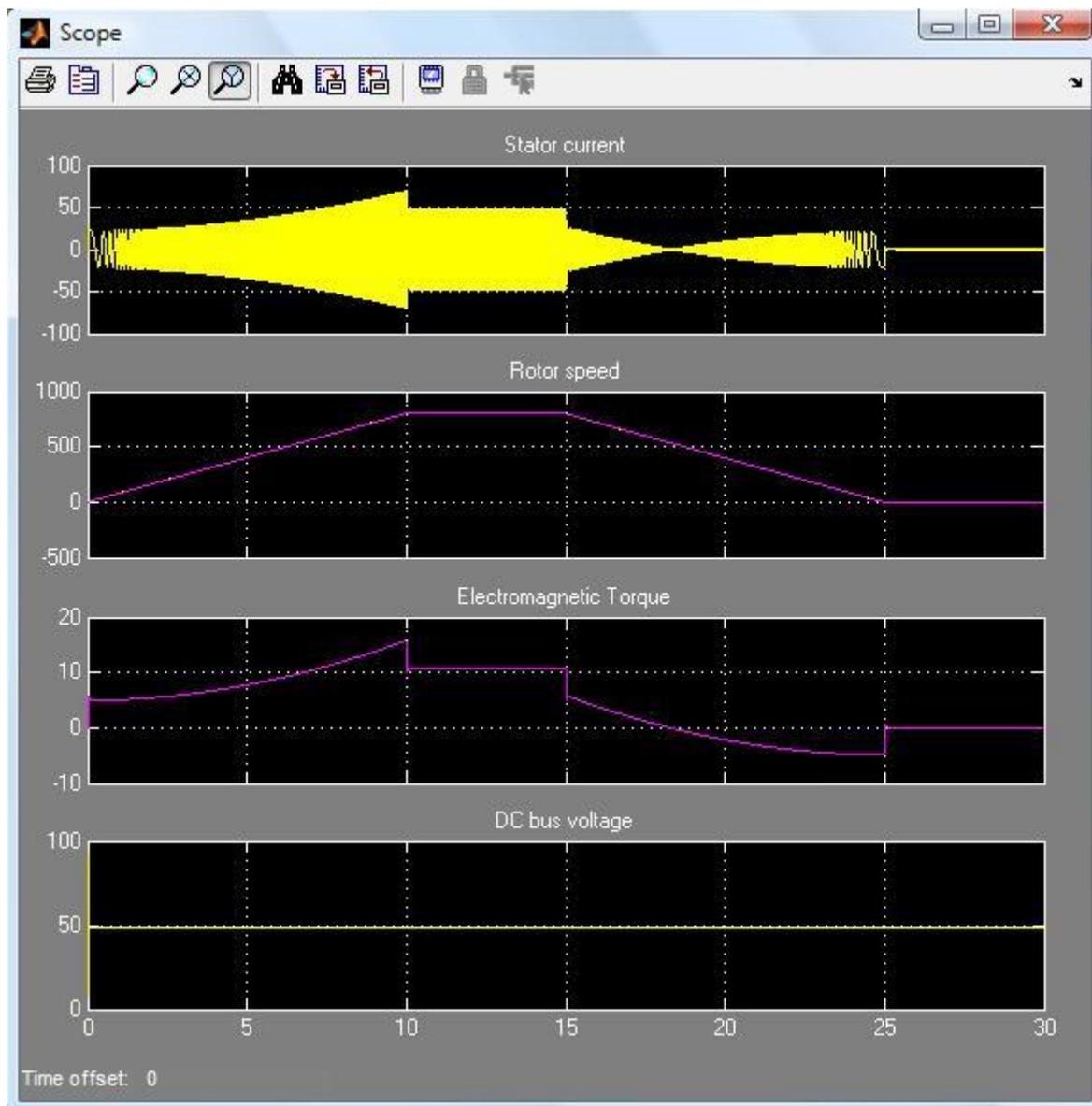
✚ torque =  $T_{\max} = 19,6923\text{N.m}$

Note que os valores foram calculados para 1100rpm, porém, por segurança, o motor será acionado com uma velocidade máxima de 800rpm. Esta limitação da velocidade máxima de operação por segurança é praticada por todas as montadoras tanto de veículos elétricos como de veículos a combustão interna, com o intuito de garantir a operação do motor sem danos por stress em seus componentes.

Com esses valores, a simulação nos fornece como resposta os gráficos mostrados na Figura 3.19.

A primeira curva mostra o comportamento da corrente de estator  $I_a$ . Podemos perceber que a corrente de pico máxima está próxima à especificada ( $80/1,3 = 61,5A$ ).

A segunda curva mostra a variação da velocidade no decorrer do tempo. Note que a velocidade do motor acompanha a referência, por isso as curvas ficam sobrepostas. A velocidade é acelerada de 0 a 800rpm em 10 segundos como estimada para um veículo elétrico pequeno. A velocidade então é mantida constante por 5 segundos e depois é desacelerada, na mesma proporção que foi acelerada, parando no instante 25s.

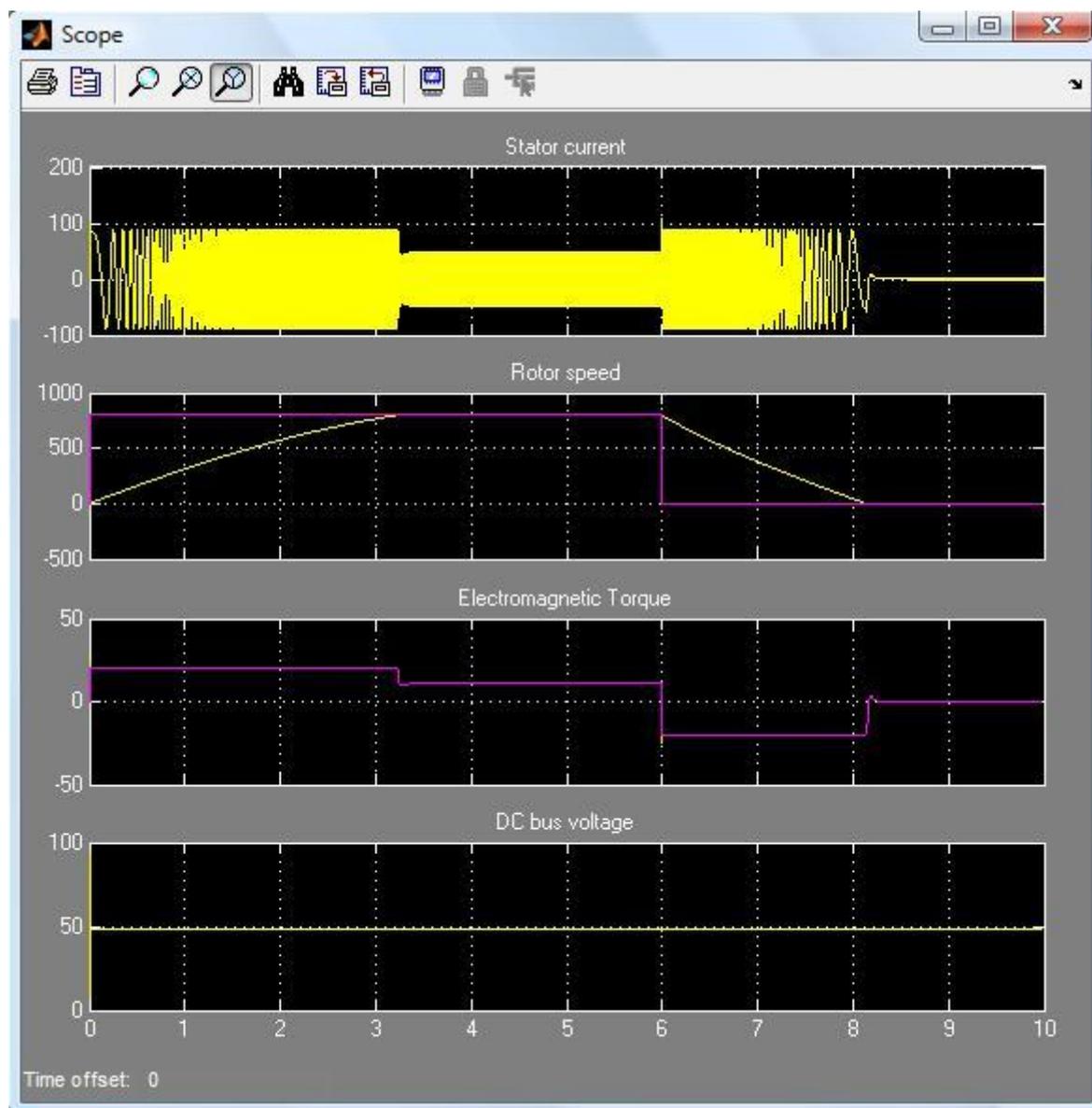


**Figura 3.19 – Resultado da simulação do acionamento do alternador como motor (eixo x em segundos)**

A terceira curva fornece o comportamento do torque no decorrer do movimento do veículo. Enquanto o veículo é acelerado o torque cresce quadraticamente com a velocidade e à medida que desacelera decresce também quadraticamente com a velocidade, seguindo a configuração da referência. Note que o torque do motor acompanha a referência a todo tempo, por isso as curvas também ficam sobrepostas, mostrando que o motor possui torque suficiente para mover o veículo.

A quarta curva indica a tensão CC de controle (48V). Note que a tensão, o tempo todo, é controlada, mantendo-se num valor constante.

A fim de se verificar a situação extrema de acionamento suportada pelo alternador, atribuiu-se o valor infinito (inf) à aceleração, mantendo-se todos os outros parâmetros inalterados. Deste modo, a referência de velocidade será um degrau de amplitude 800rpm para a aceleração e de -800rpm para a desaceleração. A corrente no estator ficará limitada em função da limitação do torque (19,6923N.m) limitará a corrente de armadura, desta forma a máquina irá acelerar na taxa máxima que ela conseguir. A Figura 3.20 mostra o resultado desta simulação.



**Figura 3.20 – Simulação de acionamento com aceleração máxima (eixo x em segundos)**

Percebe-se que a velocidade atinge seu valor máximo em aproximadamente 3,2 segundos, assim, sua aceleração máxima é de  $800/3,2 = 250\text{rpm/s}$  ou  $26,18\text{rad/s}^2$ . Além disso, o resultado desta simulação mostra que a máquina é capaz de fornecer o torque máximo em qualquer rotação, desde 0 a 800rpm.

## Capítulo 4

---

### Conclusão e Sugestão de Trabalhos Futuros

#### 4.1 – Conclusão

Devido aos resultados encontrados na simulação notamos que esta foi realizada de forma correta e satisfatória, nos levando a concluir que o alternador ensaiado (BOSCH modelo NCB1 28V 80A) pode ser usado como motor elétrico em um veículo elétrico de pequeno porte (baixa inércia). O desempenho do veículo pode ser melhorado consideravelmente se for utilizado um alternador em cada roda, pois mesmo o veículo possuindo uma inércia não muito baixa esta será dividida pelo número de motores (alternadores) suavizando a aceleração do veículo.

Mais importante do que mostrar que o alternador pode ser usado como motor elétrico em um veículo elétrico é mostrar que existem inúmeras alternativas de propulsão de veículos elétricos a serem estudadas. Este trabalho mostrou apenas uma dessas alternativas, o uso de um alternador, que não foi projetado para funcionar como motor elétrico.

Por limitações de estudo, em se tratando de um projeto final de graduação, não foi possível pôr em prática o acionamento deste alternador como motor elétrico em um veículo elétrico real.

Provavelmente, aperfeiçoamentos no modelo do alternador, bem como na eletrônica de potência associada ao controle do motor, podem ser estudados com a intenção de tornar implementável tal aplicação.

#### 4.2 – Sugestão de Trabalhos Futuros

Para trabalho futuros pode-se sugerir, como mencionado, o estudo de aperfeiçoamentos no modelo do alternador para aplicação em propulsão veicular. Tais estudos, posteriormente, podem ser apresentados ao fabricante do alternador, Bosch.

Uma segunda sugestão de trabalho é a aplicação prática da utilização de alternadores como motores elétricos em um veículo elétrico. Algumas características relacionadas à utilização real somente poderão ser obtidas na prática, caso haja a disponibilidade de um veículo para teste.

Por último, muito ainda pode ser estudado com relação à eletrônica de potência utilizada no controle de velocidade do alternador. É uma área em que há muitos trabalhos que podem render bons projetos finais de graduação.

## Apêndice A

---

### Equipamentos Utilizados na Bancada de Testes do Alternador

#### A.1 – Osciloscópio Digital

Para eventuais aquisições de formas de ondas das tensões e correntes foi utilizado o Osciloscópio Digital Portátil para PC da Hantek modelo DSO-2090 USB (Figura A.).



Figura A.1 – DSO-2090 USB

Principal característica do DSO-2090 USB:

- ✚ Alto Desempenho: 40 MHz de largura de banda analógica e amostragem em tempo real de 100 MHz.

#### A.2 – Sensor de Torque

Para medição do torque do alternador será usado o Sensor de Torque 1104 da Honeywell (Figura A.). Este modelo é parte de uma linha de sensores de torque projetados, principalmente, para uma multiplicidade de testes e medições, tais como testes em motores. Pode ser usado para monitorar níveis de torque de “start up”, de funcionamento e de bloqueio.



Figura A. 2 – Honeywell modelo 1104

Estes sensores possuem as seguintes características:

- ✚ Capacidade máxima de 11,3 Nm;
- ✚  $\pm 0,1\%$  de não linearidade e histerese;
- ✚  $\pm 0,05\%$  de repetibilidade;
- ✚ Capacidade de saída de  $\pm 2$  mV/V (nominal);
- ✚ Levantamento manual das escovas (padrão);
- ✚ Sensor de velocidade e/ou opção de montagem de base;
- ✚ Menos perda para aplicações gerais “em linha”;
- ✚ Pode ser usado com quase todas as instrumentações de condicionamento de sinais CC e CA.

### A.3 – Indicador do Sensor de Torque

Para mostrar valor do torque médio do motor medido pelo sensor de torque da Honeywell mencionado anteriormente, utilizou-se o Indicador de Sensor de Torque da Lebow Products modelo 7550 (Figura A.).



Figura A. 3 – Lebow modelo 7550

A série de indicadores de sensor de torque digital Lebow foi desenvolvida para uma família de sensores de torque. É a solução ideal para atender os requisitos de medição e exibição de aplicações industriais.

O indicador pode ser ainda mais poderoso por meio da seleção de opções para detectar presentes pontos de alarme, sentir velocidade, calcular trabalho (W) e fornecer um sinal analógico derivado digitalmente para se comunicar com outros dispositivos.

Principais características do Indicador de Sensor de Torque:

- ✚ Alimentação: 120V<sub>CA</sub> e 60Hz;
- ✚ Faixa de tensão de entrada: 0,5 a 3,4 mV/V;
- ✚ Sensibilidade de entrada: 0,15  $\mu$ V/graduação;
- ✚ Excitação de entrada: 10 V<sub>CC</sub> – 200A;
- ✚ Filtragem analógica de entrada: Ativa de 2 Hz ou banda larga;
- ✚ Filtragem digital de entrada: Seleccionável de 1-99;
- ✚ Display: 6 dígitos (7 segmentos, LED de 0,55”);
- ✚ Resolução do display: Seleccionável por 1, 2, 5, 10, 20, 50 ou 100 contagens;
- ✚ Casas decimais do display: Seleccionável;

- ✚ Saída analógica: 16 Bits (D/A) escalada & linearizada;
- ✚ Tensão da saída analógica: 0 a  $\pm 5 V_{CC}$ ;
- ✚ Impedância da saída analógica:  $\leq 600 \Omega$ ;
- ✚ Resolução da saída analógica:  $10 V_{CC}/50.000$  contagens (padrão);
- ✚ Informações mais específicas podem ser tiradas da página 8 do manual do equipamento, como mostrado na Figura A..

## FEATURES

<b>Input</b>		<b>Dual Limits</b>	
Accuracy	$\leq .02\% \text{ FS @ } 2\text{mV/V Input}$	Number of Bands:	Two
Excitation Supply	10 VDC @200 mA	Trip Point Range:	0 to $\pm 100\%$ Full Scale
Signal Input Range	0.5 to 3.4 mV/V	Output: Relay:	Form C Contact Closure
Signal Sensitivity	0.15 $\mu\text{V/graduation}$	Max Current	
Conversions/Second	20	AC(resistive load) 120 VAC:	1A
Analog Filtering	Active 2 Hz or wide band	AC(resistive load) 220 VAC:	1/2 A
Digital Filtering	Selectable 1-99	DC(resistive load)	1/2 A
<b>Power Supply Requirements</b>		Logic:	One Logic output for each trip point.
AC Supply Voltage	120 VAC/60 Hz	Logic "0" when trip point energized:	
<b>Display</b>		Configuration:	Can be set for "ACCEPT" band or trip pts.
Resolution	Selectable by 1, 2, 5, 10, 20, 50, or 100 counts	Trip point resolution and hysteresis digitally configurable.	
Range	$\pm 50,000$	<b>RPM/Horsepower</b>	
Decimal Point	Selectable Position	Horsepower is calculated from RPM and torque values measured.	
Force Display	6 Digit (7 Segment, .55" LED)	<b>RPM</b>	
<b>Analog Output</b>		Input Frequency Range: 2Hz to 50KHz	
16 bit	(D/A) Scaled & Linearized	Input Symmetry: 80/20% Max Duty Cycle	
Voltage	0 to $\pm 5 \text{VDC}$	Input Amplitude: 1 V P-P min to 70V P-P max	
Impedance	$\leq 600 \Omega$	Accuracy: 0.1%	
Resolution	10 VDC/50,000 Counts (Std)	Gear Tooth Range: 2-999 Selectable	
<b>User Configurable Linearization</b>		Response Time: 50ms > 50Hz	
User defined linearization function as a 10 point piece-wise linear approximation. Set up to 10 values corresponding to 10 readings		Display Units: Selectable RPM, rad/sec	
		<b>Horsepower</b>	
		Resolution: .001 to 50 HP	
		Units: Selectable HP, ftlb/sec, BT/min, and Watts	
		Accuracy: Function of RPM and Torque (.01% and .02%)	

Figura A. 4 – Informações Técnicas do Lebow modelo 7550

### A.4 – Fonte CC Digital

Para alimentar o campo do rotor do alternador foi utilizada a Fonte de Alimentação CC Digital PS-4000 da ICEL (Figura A.).

Este é um equipamento digital com dois mostradores, sendo um para indicação de corrente e outro de tensão. Possui uma saída variável que pode fornecer tensão na faixa de 0 a 30V e corrente CC na faixa de 0 a 3A.



Figura A. 5 – Fonte CC Digital ICCEL PS-4000

- Características do PS-4000:
  - ✚ Display LCD 3 ½ dígitos (1999);
  - ✚ Saída: 0-30V / 0-3A;
  - ✚ Exatidão:  $\pm 0,5\%$ .
- Modos de operação:
  - ✚ Tensão constante;
  - ✚ Corrente constante;
  - ✚ Proteção contra curto;
  - ✚ Regulagem:  $< 0,01\%$ ;
  - ✚ Ripple:  $< 0,5\text{mVrms}$ ;
  - ✚ Alimentação: 127/220V (50/60Hz);
  - ✚ Dimensões: 290X160X140mm.

## A.5 – Tacômetro Digital

As medições de velocidade do alternador foram feitas por meio do Tacômetro Digital MDT-2238A da fabricante Mínima, mostrado na Figura A.. O tacômetro realiza medidas em rpm

por meio foto-eletrônico e por contato, além de medidas de velocidade de superfície em m/min. Inclui como acessórios adaptadores e fitas refletoras.



**Figura A. 6 – Tacômetro Digital MDT-2238A**

Principais características técnicas:

- ✚ Display: LCD 5 dígitos com leitura máxima de 99999;
- ✚ Taxa de Amostragem: 0.5 segundo (acima 120 rpm);
- ✚ Memorização dos Valores Máximo, Mínimo e Última Leitura: "UP", "dn", e "LA" são mostrados, respectivamente, no mostrador;
- ✚ Seleção de Faixa: Automática;
- ✚ Distância de Detecção (Foto Tacômetro): 50mm ~ 500mm;
- ✚ Base de Tempo: Cristal de Quartzo;
- ✚ Alimentação: 4 baterias AA de 1,5V;
- ✚ Consumo de Corrente: Aprox. 50mA.

## A.6 – Amperímetro

As correntes medidas nos ensaios foram feitas por meio do Alicate Medidor e Analisador de Energia LEM 2060 (Figura A.) da BK Precision. Trata-se de um alicate medidor de qualidade de energia para reparos rápidos CA/CC.



**Figura A. 7 – Alicates Medidor e Analisador de Energia LEM 2060**

Ferramenta de medição ideal para monitoramento e reparo em ambientes eletricamente ruidosos causados por chaveamento de cargas como drives e sistemas de iluminação de alta eficiência. O Analisador 2060 combina a funcionalidade de um alicate amperímetro, medidor de qualidade de energia, osciloscópio e registrador de dados em um único aparelho de mão.

➤ As aplicações comuns incluem:

- ✚ Drives de velocidade variável para manutenção e comissionamento;
- ✚ Instalar e testar sistemas de energia;
- ✚ Medição de harmônicos de tensão e corrente em sistemas industriais.

➤ Características:

- ✚ Grande display de ondas, gráfico e display com parâmetros múltiplos;
- ✚ Display gráfico "vivo" de barras (até 25°);
- ✚ Registrador de dados internos para 5 parâmetros por 24 horas;
- ✚ Medição de tensão True-rms e corrente de até 2000A;
- ✚ Escala de parâmetros incluindo V, A, Hz, fator de crista, THD, DF, W, VA, VAR, kWh e fator de energia mesmo para ondas distorcidas;
- ✚ Medições (ripple) CC;
- ✚ Relatório rápido com memória para 8 posições de dados e tempo impresso;
- ✚ Aplicações variáveis com capacidade de energia trifásica para cargas equilibradas.

## Referências Bibliográficas

---

- [1] E. Fitzgerald; Charles Kingsley, Jr e Stephen D. Umans – **Máquinas Elétricas**, 6ª Edição, Editora Bookman, 2007.
- [2] Richard M. Stephan – **Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas**, UFRJ, 2009.
- [3] Toshizaemom Noce – **Estudo do Funcionamento de Veículos Elétricos e Contribuições ao Seu Aperfeiçoamento**, Dissertação (Mestrado), PUC-MG, 2009.
- [4] Laboratório de Veículo Elétrico (Electric Vehicle Laboratory), Universidade de Keio (Japão) – **Eliica**, disponível em: <http://www.eliica.com/English/project/>, Acessado em 20 de Agosto de 2012 às 12:20h.
- [5] Documentário – **Eliica - O Super Carro Elétrico Japonês**, disponível em: [http://www.youtube.com/watch?v=31Fi-FjR1Lw&feature=player\\_embedded](http://www.youtube.com/watch?v=31Fi-FjR1Lw&feature=player_embedded), Acessado em 2 de Novembro às 22:15h.
- [6] Catálogo BOSCH – **Alternadores, Motores de Partida e Principais Componentes**, 2011/2012.
- [7] ABVE – **O que é veículo elétrico híbrido?**, disponível em: <http://www.abve.org.br/PF/ExibePF.asp?codigo=0003>, Acessado em 23 de Novembro às 20:43h.
- [8] <http://www.automotto.com/entry/1899-electric-supercar-replica-revealed-at-detroit-auto-show>
- [9] <http://www.boldride.com/ride/1912/cadillac-model-30>
- [10] [http://money.cnn.com/galleries/2008/autos/0809/gallery.gm\\_electric\\_cars/3.html](http://money.cnn.com/galleries/2008/autos/0809/gallery.gm_electric_cars/3.html)
- [11] <http://www.gurgelclube.com.br/GurgelAVista/?cat=113>
- [12] <http://carrocultura.wordpress.com/tag/gm-ev1/>
- [13] <http://quatorrodas.abril.com.br/salao/carros/fiat/fccii/>

- [14] <http://www.en123autos.com.ve/contenidos/novedades-y-tendencias/como-funcionan-los-autos-hibridos.1188>
- [15] <http://brauto.blogspot.com/2007/12/automoveis-eletricos.html>
- [16] [http://thetideofbattle.blogspot.com.br/2010\\_06\\_01\\_archive.html](http://thetideofbattle.blogspot.com.br/2010_06_01_archive.html)
- [17] <http://www.eliica.com/English/project/eliica/spec.html>
- [18] <http://www.carrosnitrados.net/blog/2009/12/09/audi-fara-1-000-e-tron-aponta-revista/>