

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

Curso de Engenharia Elétrica

CAROLINA JAQUELINE NASCIMENTO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE UM CONJUNTO DIDÁTICO PARA
ENSAIO DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA**

Itatiba

2012

CAROLINA JAQUELINE NASCIMENTO DA SILVA
R.A.: 002200800288

**CARACTERIZAÇÃO DE UM CONJUNTO DIDÁTICO PARA
ENSAIO DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA**

Monografia apresentada pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Paulo Eduardo
Silveira

Itatiba
2012

CAROLINA JAQUELINE NASCIMENTO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DE UM CONJUNTO DIDÁTICO PARA
ENSAIO DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA**

Monografia aprovada pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: __/__/__

Banca Examinadora:

Prof. Me. Paulo Eduardo Silveira (Orientador)
Universidade São Francisco

Prof. Me. Renato Franco de Camargo (Examinador)
Universidade São Francisco

Prof. João Alex Franciscon Vaz (Examinador)
Universidade São Francisco

*A Jeová Deus pela vida e a minha
Família e aos meus Amigos pelo apoio e pela
força.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Professor Paulo Eduardo Silveira pela importante orientação prestada e pela oportunidade de maior aprendizado.

Agradeço em especial a minha mãe Analice pelo carinho, apoio e confiança depositados em mim desde sempre e aos meus irmãos por sempre me ajudar na busca de meus objetivos.

Aos meus amigos, Diego e Nehemias tão especiais e importantes em minha vida por todos os momentos vividos, pelas ideias discutidas e pela amizade incondicional.

Ao Professor e coordenador do curso Renato Franco de Camargo por ter contribuído ao longo do curso no meu aprendizado e também pela paciência e incentivo durante toda a graduação.

Agradeço ao professor João Alex por aceitar o convite de compor minha banca examinadora.

À Universidade São Francisco, pela oportunidade de tornar concreta a realização de um sonho, de maneira geral a todos que fazem parte da instituição e que de alguma forma sei que contribuíram para o meu desenvolvimento.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho, que fizeram e fazem ainda mais minha vida valer a pena.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Tereza de Calcutá

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Estator, (b) Rotor, (c) Comutador, (d) Escovas [Fonte 8].....	2
Figura 2: Motor de corrente contínua com escova [10]	4
Figura 3: Motor de corrente contínua BDCM - Brushless DC motor [10].....	5
Figura 4: Regra da mão esquerda	6
Figura 5: Circuito equivalente para um motor C.C. de ímãs permanentes	8
Figura 6: Circuito chopper de um quadrante [5].....	11
Figura 7: Formas de onda de chaveamento para um chopper de um quadrante [5]	12
Figura 8: Operação em dois quadrantes [5].....	13
Figura 9: Circuito chopper de dois quadrantes (half-bridge).....	14
Figura 10: Formas de onda de um circuito chopper de dois quadrantes (half-bridge) [5].....	14
Figura 11: Circuito chopper de quatro quadrantes full-bridge [5].....	15
Figura 12: Operação em quatro quadrantes [5].....	16
Figura 13: Conjunto para ensaio didático modelo DVC26	17
Figura 14: Diagrama esquemático do motor CC [12].....	18
Figura 15: Determinação da indutância.	19
Figura 16: Frequência de corte do filtro	20
Figura 17: Ensaio para determinação da resistência de armadura	21
Figura 18: Determinação da força eletromotriz.....	22
Figura 19: Oscilograma na frequência de corte do filtro	22
Figura 20: Determinação de K_e com a utilização do Kit	25
Figura 21: Determinação de K_e sem a utilização do Kit	26
Figura 22: Determinação de K_e com Software DVC26-SW	27
Figura 23: Determinação de B e F com a utilização do Kit.....	29
Figura 24: Determinação de B e F sem a utilização do Kit.....	30
Figura 25: Determinação da constante B e F através do Software DVC26-SW1	31
Figura 26: Determinação de J através do kit	32
Figura 27: Determinação de J através do software DVC26-SW.....	33
Figura 28: Diagrama de blocos do Simulink	34
Figura 29: Resposta à aceleração com a utilização do Simulink.....	35
Figura 30: Resposta à aceleração com a utilização DVC26-SW.....	36
Figura 31: Resposta à desaceleração com a utilização do Simulink.....	37
Figura 32: Resposta à desaceleração com a utilização do Software DVC26-SW	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e Desvantagens em Motores CC convencionais [5].....	4
Tabela 2: Vantagens e Desvantagens dos Motores CC sem escovas (Brushless)[5]	5
Tabela 3: Tipos de excitação de motores de CC [11]	9
Tabela 4: Dados do motor	17
Tabela 5: Determinação da resistência de armadura com a utilização do Kit.....	23
Tabela 6: Determinação da resistência de armadura sem a utilização do Kit.....	23
Tabela 7: Determinação da resistência de armadura com Software DVC26-SW1	23
Tabela 8: Determinação da constante K_e com a utilização do Kit.....	25
Tabela 9: Determinação da constante K_e sem a utilização do Kit.....	26
Tabela 10: Determinação da constante K_e com Software DVC26-SW1	27
Tabela 11: Determinação de B e F com a utilização do Kit	29
Tabela 12: Determinação de B e F sem a utilização do Kit	30
Tabela 13: Determinação da constante B e F através do Software DVC26-SW1.....	31
Tabela 14: Determinação de J com a utilização do Kit.....	32
Tabela 15: Determinação de J através do Software DVC26-SW1	33
Tabela 16: Determinação de J através do Software DVC26-SW1	36
Tabela 17: Determinação de J através do Software DVC26-SW1	38
Tabela 18: Comparação dos resultados	39

SILVA, Carolina Jaqueline Nascimento Da. **Caracterização de um conjunto didático para ensaio de motor de corrente contínua**. 2012. 52 f. Monografia. Curso de Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica da área de exatas da Universidade São Francisco, Itatiba.

RESUMO

Um dos tópicos abordados no curso de engenharia elétrica é a conversão eletromecânica de energia sendo o motor de corrente contínua um dos elementos estudados. As atividades práticas envolvendo o seu funcionamento são fundamentais para consolidar estes conhecimentos. Para auxiliar nas aulas práticas existem conjuntos didáticos utilizados para estudo de modelagem matemática e controle de velocidade desses motores. Torna-se importante saber se os procedimentos propostos nos conjuntos didáticos fornecem resultados aceitáveis. O objetivo desse trabalho é avaliar se os ensaios propostos pelo conjunto didático para ensaio em motor de corrente contínua DVC26 do fabricante Labtrix são confiáveis e fornecem modelos matemáticos adequados ao ensino de engenharia. Todas as medições que o Kit disponibiliza de acordo com a metodologia sugerida no manual do fabricante foram efetuadas. Posteriormente foram comparados com os resultados obtidos nas medições externas feitas em laboratório somente com o motor e os devidos instrumentos de medição. O conjunto dispõe do Software DVC26-SW, com o mesmo foi possível analisar o tempo de estabilização na aceleração e desaceleração. Para comparação e análise desses resultados foi utilizado o software MATLAB e o aplicativo Simulink, tornando possível definir se a metodologia proposta pelo fabricante é adequada e os instrumentos incorporados ao conjunto apresentam desempenho satisfatório.

Palavras-chave: Motor de Corrente contínua. MATLAB.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 MOTORES E MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA	2
2.1.1 Componentes do estator	3
2.1.2 Componentes do rotor	3
2.1.3 Motor CC convencional	4
2.1.4 Motor CC Brushless	5
2.2 CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO	6
2.2.1 Constante de força contra eletromotriz	7
2.2.2 Relação de torque e velocidade	8
2.3 MÉTODOS DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE CC	9
2.3.1 Conversores para motor CC	11
2.3.2 Conversor de um quadrante (<i>step-down</i>)	11
2.3.3 Conversor de dois quadrantes (<i>half-bridge</i>)	13
2.3.4 Conversor de quatro quadrantes (<i>full-bridge</i>)	15
2.4 MODELAGEM DINÂMICA	16
3 METODOLOGIA	17
3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA	18
3.1.1 Ensaio com o Kit	19
3.1.2 Ensaio sem a utilização do Kit	21
4 RESULTADOS	23
4.3 SIMULAÇÃO COM O SIMULINK	34
4.3.1 Resposta à aceleração	35
4.3.2 Resposta à desaceleração	37
5 CONCLUSÃO	40
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

É muito comum nos dias atuais a exigência de racionalização e aperfeiçoamento em métodos de produção no setor industrial. Requisição esta que abrange uma ampla área de aplicação, mediante a automação e o controle dos processos envolvidos. Dentre os principais parâmetros que visam atender os requisitos em questão estão o controle e a variação de velocidade e torque nos dispositivos de acionamento.

Este conceito inicialmente era proporcionado por meios mecânicos, como caixas de redução, polias, o que resultava em processos extremamente limitados. Posteriormente surgiram aplicações de controle de velocidade em motores de indução (CA) através de variação de resistência rotórica, entre outros. Ainda assim esses métodos eram inviáveis por apresentarem baixa precisão no controle de velocidade e baixos rendimentos.

Neste contexto surgiram os motores de corrente contínua (CC), visando solucionar os problemas mencionados. Por apresentarem um bom controle de velocidade através da variação da tensão de alimentação e um torque constante em uma ampla faixa de operação, muitos foram os estudos voltados para este tipo de motor.

Um dos tópicos abordados no curso de engenharia elétrica é a conversão eletromecânica de energia, sendo o motor de corrente contínua um dos elementos estudados. As atividades práticas envolvendo o seu funcionamento são fundamentais para consolidar estes conhecimentos.

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar o desempenho e caracterização de um conjunto didático. O mesmo é utilizado para modelagem, controle de velocidade e demais estudos em motores de corrente contínua. O conjunto foi criado com a finalidade de auxiliar o entendimento dos conceitos teóricos. Torna-se importante saber se os procedimentos nele propostos fornecem resultados confiáveis.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Motores e máquinas de corrente contínua

Por definição, motor é um elemento de trabalho que converte energia elétrica em energia mecânica. Esta energia mecânica pode ser gerada basicamente de duas formas: linear e rotativa. O motor elétrico se apresenta como uma máquina de grande importância tanto na indústria como no ambiente doméstico.

Nesse trabalho analisaremos os motores de corrente contínua com escovas e sem escovas. Os motores de corrente contínua se destacam devido a facilidades e precisões satisfatórias para controle de velocidade posição e torque, são largamente utilizados em aplicações que exigem tais características.

Para o controle de velocidade existem varias alternativas, os três métodos mais comuns são: variação na resistência de armadura; ajuste do fluxo, frequentemente por meio de um reostato de campo derivação; e variação da tensão de armadura. [1]

Vale comentar que a utilização dos motores de corrente contínua teve um grande incremento nos últimos anos, graças à eletrônica de potência. Fontes estáticas de corrente contínua com tiristores confiáveis, de baixo custo e manutenção simples, substituíram os grupos conversores rotativos. Com isso, motores de corrente contínua passaram a constituir alternativa mais atrativa em uma série de aplicações. [2]

O motor é composto de duas estruturas magnéticas principais: Estator é um enrolamento de campo que tem polos salientes excitados por uma ou mais bobinas de campo conforme é mostrado na figura 1a; Rotor é um eletroímã constituído de um núcleo de ferro com enrolamentos em sua superfície que são alimentados por um sistema mecânico de comutação conforme figura 1b.

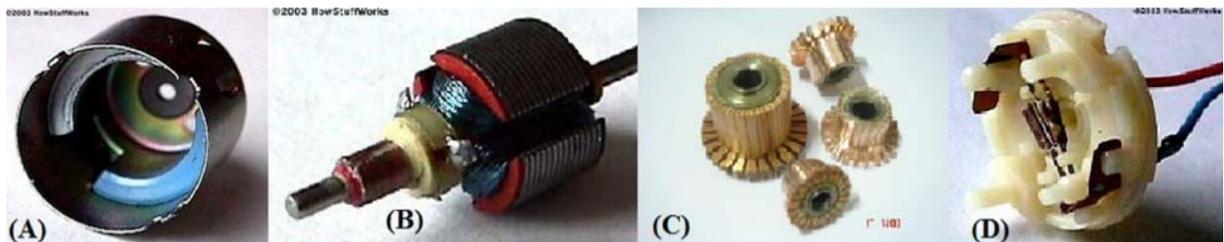


Figura 1: (a)Estator, (b) Rotor, (c) Comutador, (d) Escovas [Fonte 3]

2.1.1 Componentes do estator

- **Carcaça:** É a estrutura suporte do conjunto, esta peça pode ser fabricada em ferro fundido ou laminado, pois providencia uma faixa de retorno do fluxo magnético conduzido e constante.

- **Polos de excitação:** Constituídos de condutores enrolados sobre núcleos de chapas de aço laminadas, tem por objetivo gerar o fluxo magnético. [2]

- **Polos de comutação:** Estão localizados na região interpolar e são percorridos pela corrente de armadura. Sua finalidade é compensar o efeito da reação da armadura na região de comutação, reduzindo a possibilidade de centelhamento. [4]

- **Enrolamento de Compensação:** São ligados da mesma maneira que os enrolamentos do interpolo, mas agora em toda periferia do rotor, e não somente na região transversal. Evita o aparecimento de faíscas provocadas por uma diferença de potencial entre espiras devido à distribuição não uniforme da indução no entreferro.

- **Conjunto Porta Escovas e Escovas:** O porta escovas permite alojar as escovas e está montado de tal modo que possa ser girado para o ajuste da zona neutra. As escovas são compostas de material condutor e deslizam sobre o comutador quando este gira, pressionadas por uma mola, proporcionando a ligação elétrica entre a armadura e o exterior.

2.1.2 Componentes do rotor

- **Eixo da armadura:** Transmite a potência mecânica para fora do motor. [5]

- **Rotor com enrolamento:** Centrado no interior da carcaça, é constituído por um pacote de chapas de aço silício laminadas, com ranhuras axiais na periferia para acomodar o enrolamento da armadura. [4]

- **Enrolamento da armadura:** São bobinas ligadas eletricamente com as lâminas do comutador e isoladas entre si.

- **Comutador:** É o conversor mecânico que transfere a energia ao enrolamento do rotor. O comutador consiste de segmentos de cobre, individualmente isolado entre si e o eixo, eletricamente conectados as bobinas do enrolamento da armadura. [4]

2.1.3 Motor CC convencional

O motor CC convencional, ou seja, com escovas conforme é mostrada na figura 2 é um dos mais antigos motores. Contudo Motores de corrente contínua estão em cada vez mais sendo substituídos por motores de indução trifásicos, por apresentar algumas vantagens importantes, tais como peso, menor custo e maior durabilidade.

A principal vantagem de um motor CC convencional comparado a um motor CA é a facilidade com que o mesmo pode ser controlado para uma operação em velocidade variável, incluindo reversão de direção e capacidade de frenagem regenerativa. A principal desvantagem de um motor CC é que as escovas geram uma “poeira” que diminui o isolamento entre os elementos do rotor e requerem manutenção e uma eventual substituição. A interferência eletromagnética (EMI) gerada pelas escovas pode ser muito elevada em motores CC e, em certos ambientes, isto pode não ser desejável, a Tabela 1 mostra as vantagens e desvantagens deste tipo de motor [5].

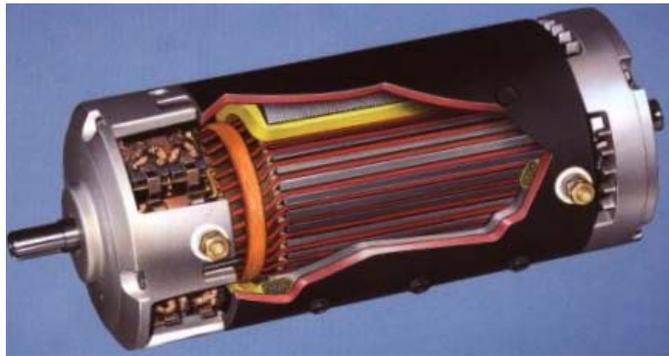


Figura 2: Motor de corrente contínua com escova [6]

Tabela 1: Vantagens e Desvantagens em Motores CC convencionais [5]

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Fácil de projetar	Produção cara
Fácil de controlar torque	Maior fisicamente
Fácil de controlar velocidade	Controle não confiável em baixas velocidades
Projeto da etapa de potência simples e barato	Custo de manutenção alto
	Gera “poeira” de desgaste das escovas

2.1.4 Motor CC Brushless

A máquina síncrona com ímã permanente no rotor ou no estator com forma de onda de FEM não senoidal é normalmente comercializada juntamente com seu conversor de potência, sendo que, ao conjunto resultante é dado o nome de “motor CC *Brushless*” ou motor CC sem escovas. Isto se deve ao fato do conjunto motor-conversor se comportar como uma máquina CC, mas com comutador eletrônico. Segue abaixo a figura 3 com a imagem do motor.[5]



Figura 3: Motor de corrente contínua BDCM - Brushless DC motor [7]

O sistema de um motor CC sem escovas (BDCM – *Brushless DC motor*) está em crescimento como um dos mais úteis sistemas de potência (*drive*) para uma larga quantidade de aplicações de pequeno, médio e grande porte, como ventiladores de baixa potência, motores de eletrodomésticos de médio porte, robôs industriais, aviônicos, servomotores etc.[6]

O motor CC sem escovas foi desenvolvido para alcançar o mesmo desempenho dos motores CC convencionais sem os problemas associados ao uso de escovas. A Tabela 2 mostra as vantagens e desvantagens dos motores CC sem escovas (*Brushless*) [3].

Tabela 2: Vantagens e Desvantagens dos Motores CC sem escovas (Brushless)[5]

VANTAGENS	DESvantagens
Menor manutenção	Os circuitos de controle e de potência são muito mais complicados
Menor ruído elétrico	É necessária uma medição da posição do rotor
Maior confiabilidade devido a não existência das escovas	Maior custo, devido à maior complexidade dos circuitos de controle e de potência.
Possibilidade de uso de tensões mais elevadas	
Permitem atingir altas velocidades	

2.2 Características de operação

Em um motor de corrente contínua a geração de torque pode ser baseada na regra da mão-esquerda [8] quando colocado em um campo magnético flui corrente elétrica sobre o condutor. Conforme ilustrado na figura 4.

$$F = B \cdot i \cdot L \quad (1)$$

Na qual:

F= força [N]

B: densidade do fluxo magnético [T]

I= corrente elétrica [A]

L = comprimento do condutor [m]

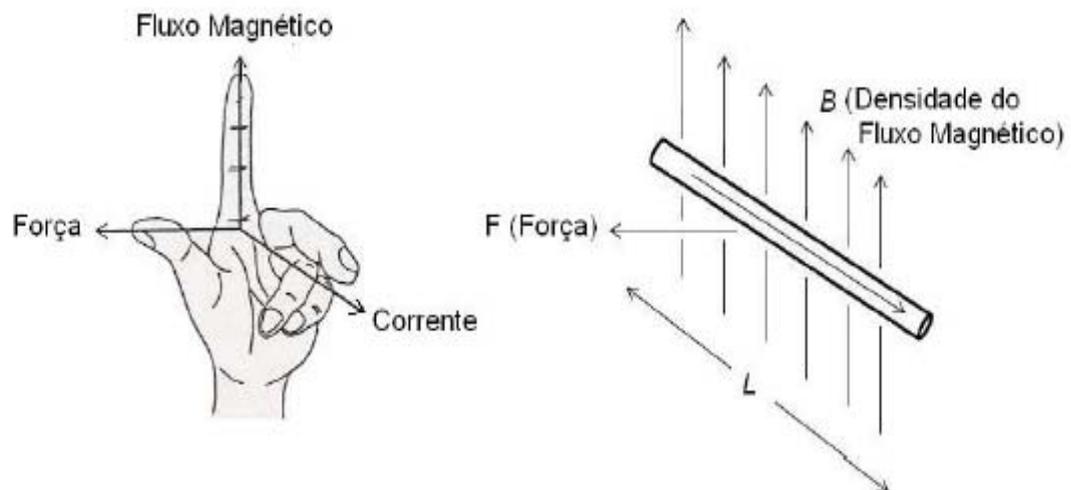


Figura 4: Regra da mão esquerda [9]

2.2.1 Constante de força contra eletromotriz

Quando um condutor, percorrido por uma corrente elétrica, é colocado sob a ação de um campo magnético B surgirá uma força sobre este condutor que o moverá a certa velocidade v . Como resultado desse movimento uma força eletromotriz E é originada no condutor. [8] A resultante dessa força é dada pela equação 2. [5]

$$E = v \cdot B \cdot L \quad (2)$$

Em que:

E = força eletromotriz [V]

v = velocidade de um condutor sob ação de um campo magnético [m/s]

O sentido de E é determinado pela regra da mão direita, e é oposto ao sentido de fluxo da corrente. Como cada condutor passa através dos polos magnéticos norte e sul dos ímãs permanentes, a força contra eletromotriz muda sucessivamente. Mas devido às escovas e ao comutador, a força eletromotriz total em cada é somada aos terminais do motor [8]. A tensão resultante dessa soma é chamada de força contra eletromotriz e seu valor é diretamente proporcional à velocidade angular da rotação do motor elétrico e é dada por:[9]

$$E = K_E \cdot \omega \quad (3)$$

Na qual:

K_E = constante força eletromotriz [V s/rad]

ω = velocidade angular de rotação [rad/s]

No sistema internacional (SI) de unidades e constantes K_E e K_T apresentam o mesmo valor, portanto:

$$K_E = K_t = K \quad (4)$$

Em que: K = constante do motor elétrico

2.2.2 Relação de torque e velocidade

Um motor que utilize ímãs permanentes para fornecer fluxo de campo pode ser representado por um simples circuito equivalente como o da figura 5. Neste circuito, a resistência de armadura R_a está em série com a fcm E . [9]

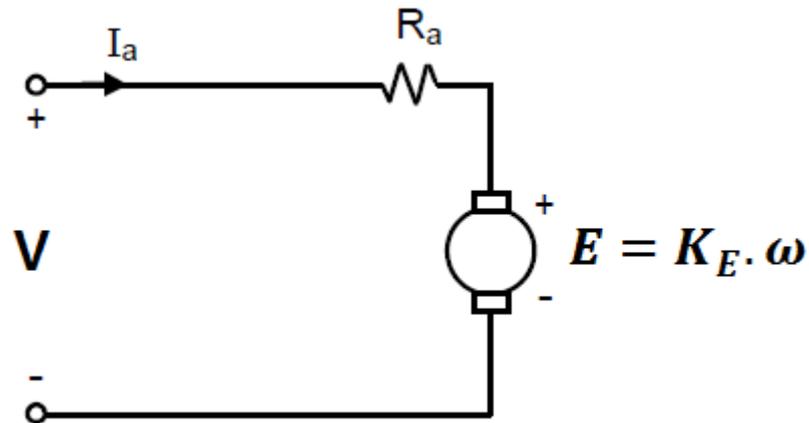


Figura 5: Circuito equivalente para um motor C.C. de ímãs permanentes [10]

Desprezando a queda de tensão nas escovas, a equação resultante para a tensão nos terminais do motor é dada por:

$$V = R \cdot i + K_E \cdot \omega \quad (5)$$

Na qual:

V = tensão os terminais do motor

R = resistência no circuito de armadura

i = corrente de armadura

2.3 Métodos de acionamento de motores de CC

Motores CC de ímãs permanentes são limitados em termos de potência e controle. Para motores CC enrolados, a corrente de campo controla o fluxo e conseqüentemente o torque do motor. [10]

Existem três tipos clássicos de excitação de motores de CC: com campo de enrolamento em série (*series*), em derivação (*shunt*) e com campo independente (*separately excited*) como mostrado na tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Tipos de excitação de motores de CC [10]

Tipo de excitação	Representação	Características
Série		<ul style="list-style-type: none"> Bobinas de campo estão em série com o enrolamento da armadura Só há fluxo no entreferro da máquina quando a corrente da armadura for diferente de zero (máquina carregada) Conjugado é função quadrática da corrente, uma vez que o fluxo é praticamente proporcional à corrente de armadura Conjugado elevado em baixa rotação Potência constante Velocidade extremamente elevada quando o motor é descarregado, por isso não se recomenda utilizar transmissões por meio de polias e correias
Paralelo		<ul style="list-style-type: none"> Velocidade praticamente constante Velocidade ajustável por variação da tensão de armadura
Independente		<ul style="list-style-type: none"> Motor excitado externamente pelo circuito de campo Velocidade praticamente constante Velocidade ajustável por variação da tensão de armadura e também por enfraquecimento de campo São os motores mais aplicados com conversores CA/CC na indústria Aplicações mais comuns: máquinas de papel, laminadores, extrusoras, fornos de cimento, etc.

Assim, a velocidade de um motor de CC pode ser controlada através de três variáveis: a tensão terminal, o fluxo de entreferro e a resistência de armadura.

O controle pela resistência de armadura era feito em sistemas de tração, com resistências de potência conectadas em série com a armadura (e com o campo, já que se utilizava excitação série). [10]

O controle da velocidade pelo fluxo de entreferro é utilizado em acionamentos independentes, mas quando se deseja velocidade acima da velocidade base da máquina, não é possível fazer variações rápidas de velocidade por meio deste controle. Esta é uma alternativa usada principalmente em tração, na qual as exigências de resposta dinâmica são menores. [5]

Do ponto de vista de um melhor desempenho sistêmico, o controle através da tensão terminal é o mais indicado, uma vez que permite ajustes relativamente rápidos (sempre limitados pela dinâmica elétrica e mecânica do sistema), além de, adicionalmente, possibilitar o controle do torque, através do controle da corrente de armadura. É o método geralmente utilizado no acionamento de motores de CC em processos industriais. [1] [4]

2.3.1 Conversores para motor CC

A etapa de potência de um circuito para fornecer energia a um motor CC pode ser feita em diversos tipos de sistemas para controle de velocidade e posição, onde existe um desempenho satisfatório, um sistema fácil de controlar e uma alta eficiência. O controle de velocidade de um motor CC pode ser feito utilizando circuitos conversores chaveados CC-CC. Tais conversores são denominados “*chopper*”, em inglês. Um *chopper* pode ser considerado o equivalente CC de um transformador CA com uma relação de espiras continuamente variável. Da mesma maneira que um transformador, ele pode ser utilizado para abaixar ou elevar a tensão de uma fonte CC.[5]

Os *choppers* são amplamente utilizados para controle de tração de motores em automóveis elétricos, trólebus, guindastes marinhos, empilhadeiras de almoxarifados e transportadores em minas. Eles fornecem controle de aceleração suave, alta eficiência em resposta dinâmica rápida. Os *choppers* podem ser usados na frenagem regenerativa de máquinas de corrente contínua, devolvendo *energia* à fonte de alimentação. Essa característica resulta em economia de energia para sistemas de transporte com paradas frequentes.[5]

2.3.2 Conversor de um quadrante (*step-down*)

Para a operação em um quadrante, o circuito de chaveamento (*chopper*) é mostrado na figura 6. A tensão média aplicada ao motor e, conseqüentemente, a sua velocidade é controlada pela variação do ciclo ativo (*duty cycle*) do dispositivo de chaveamento S. [5]

O dispositivo de chaveamento pode ser uma chave, um FET, ou, neste caso, um MOSFET.

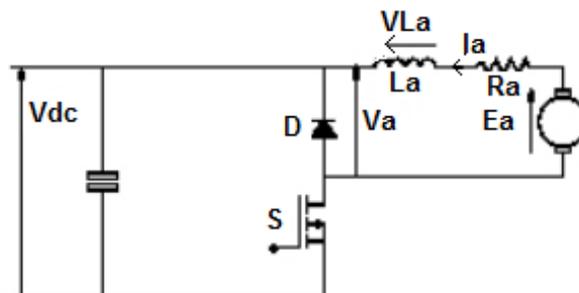


Figura 6: Circuito chopper de um quadrante [5]

E mostrado na figura 7 as formas de onda de chaveamento do circuito. Durante o tempo em que o circuito está ligado (ON) a tensão de alimentação, V_{dc} , é aplicada ao motor e a corrente de armadura começa a aumentar. Desconsiderando a resistência de condução de S e a resistência do enrolamento da armadura, a tensão na indutância da armadura é $V_{dc}-E_a$ e a taxa de crescimento da corrente da armadura é dada pela equação 6.[5]

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{V_{dc} - E_a}{L_a}$$

(6)

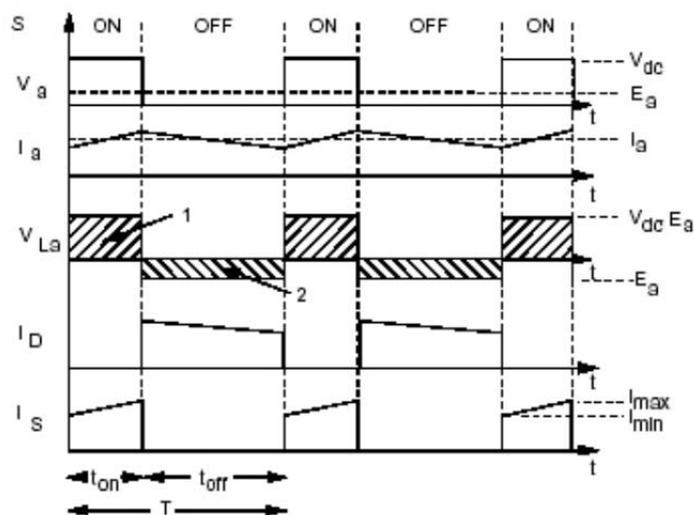


Figura 7: Formas de onda de chaveamento para um chopper de um quadrante [5]

Quando S para de conduzir, a energia armazenada no indutor da armadura deve ser dissipada. A polaridade da tensão em L_a inverte, o diodo D torna-se diretamente polarizado e a corrente da armadura continua a fluir. Assumindo que a velocidade do motor permanece constante e desconsiderando a queda da tensão na junção do diodo, a tensão no indutor é igual a $(-E_a)$, e a taxa de queda da corrente de armadura é dada por:[5]

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{E_a}{L_a}$$

(7)

Se a sequência de chaveamento é repetida com alguma frequência, então a tensão do motor pode ser controlada alterando a duração relativa do período “ligado” (T_{ON}) e do período “desligado” (T_{OFF}). O ato de variar o ciclo ativo (*duty cycle*) de S (t_{on}/T) para

controlar a tensão do motor é denominado controle por modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM), ou simplesmente controle PWM. Como a tensão média ao longo do indutor em um período deve ser zero então temos a equação 3.3:[5]

$$\int_0^T v_L \cdot dt = \int_0^{t_{on}} v_L \cdot dt + \int_{t_{on}}^T v_L \cdot dt = 0 \quad (8)$$

2.3.3 Conversor de dois quadrantes (*half-bridge*)

O motor é dito estar operando no segundo quadrante quando está freando ou gerando energia elétrica, ou seja, reduzindo V_a abaixo de E_a , tal que I_a se torna negativo. Estes dois quadrantes são mostrados na figura 8 [5]

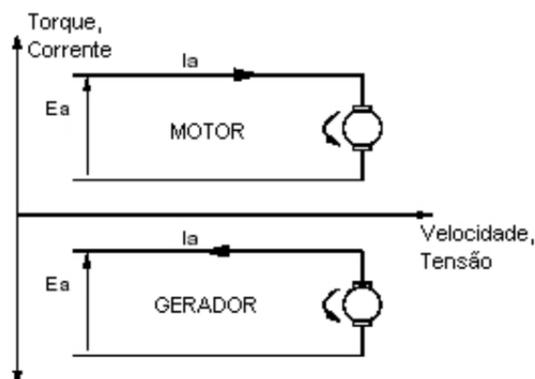


Figura 8: Operação em dois quadrantes [5]

A figura 9 mostra um circuito *half-bridge* para fornecimento de dois quadrantes de corrente. Para a operação como motor, S1 e D2 atuam da mesma forma que foi descrito acima para um controlador de um quadrante. O diodo D2 pode ser interno a um MOSFET ou a outro dispositivo discreto. Para a operação como gerador, o motor CC atua como fonte ativa de potência e o fluxo de energia é da direita para a esquerda. A corrente do circuito gerador é controlada variando o *duty cycle* em S2. Quando S2 está conduzindo (ON) a corrente negativa da armadura aumenta através de S2 e da indutância da armadura. Quando S2 é cortado (OFF), D1 se torna diretamente polarizado e a corrente inverte o sentido na fonte de alimentação. [5]

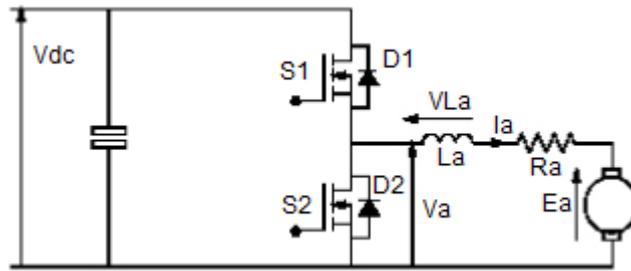


Figura 9: Circuito chopper de dois quadrantes (half-bridge) [5]

Durante a operação como gerador, a tensão média na armadura com este controlador é dada pela equação descrita abaixo: [5]

$$V_a = \left(1 - \frac{t_{on}}{T}\right) \cdot V_{dc}$$

(9)

As formas de onda importantes no circuito são mostradas na figura 10.

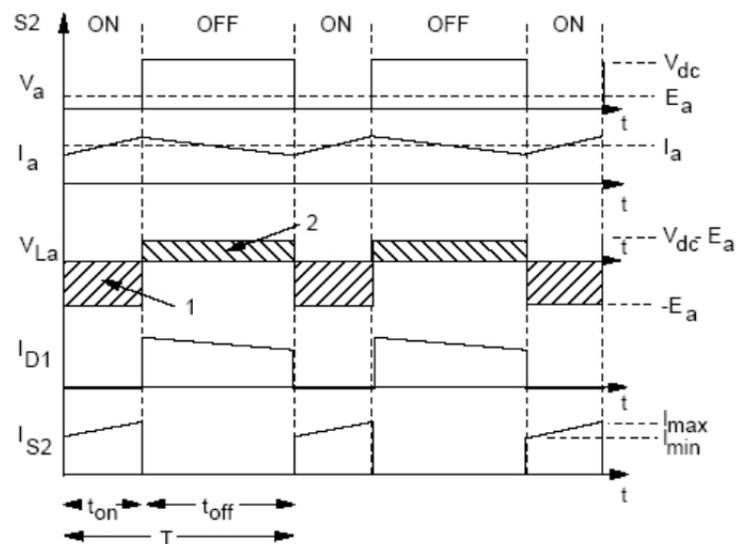


Figura 10: Formas de onda de um circuito chopper de dois quadrantes (half-bridge) [5]

2.3.4 Conversor de quatro quadrantes (*full-bridge*)

Se as operações como motor e como gerador são requeridas em ambas as direções de rotação então o conversor *full-bridge*, mostrado na figura 11, é requerido. Usando esta configuração permite-se que a polaridade da tensão aplicada seja revertida, invertendo consequentemente à direção de rotação do motor.[5]

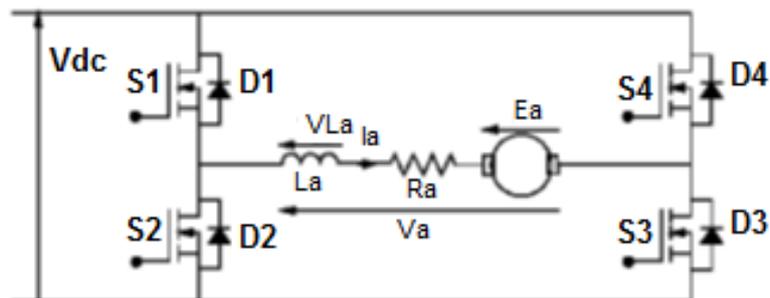


Figura 11: Circuito chopper de quatro quadrantes full-bridge [5]

Assim, em um conversor *full-bridge* a corrente e a tensão do motor podem ser controladas independentemente. A tensão do motor V_a é dada por: [5]

$$V_a = V_{12} - V_{34} \quad (10)$$

Onde V_{12} é controlado pelo chaveamento de S1 e S2 como descrito acima, e V_{34} pelo chaveamento S3 e S4. O modo usual de operação para um conversor *full-Bridge* é para agrupar os dispositivos de chaveamento. Desta forma, S1 e S3 são sempre acionados simultaneamente, o mesmo ocorre com S2 e S4. Se a polaridade da tensão aplicada é invertida, então as operações de motor e gerador podem ocorrer na direção de rotação contrária. Assim, controlando a tensão de armadura e a polaridade da corrente, obtemos a operação em quatro quadrantes como mostra a figura 12. [5]

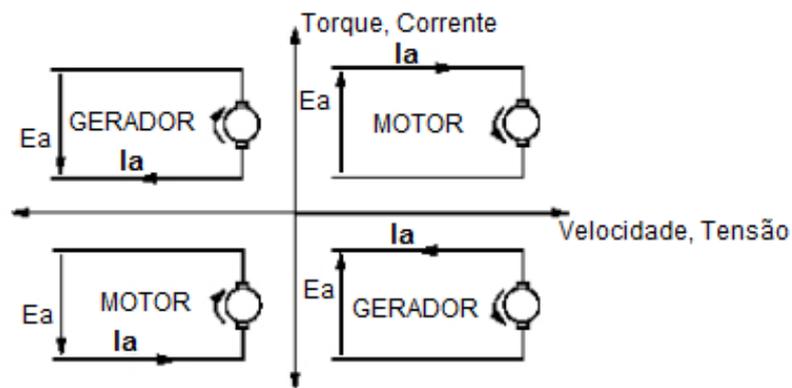


Figura 12: Operação em quatro quadrantes [5]

2.4 Modelagem dinâmica

Motores CC de ímãs permanentes são limitados em termos de potência e controle. Para motores CC enrolados, a corrente de campo controla o fluxo e conseqüentemente o torque do motor enquanto que a corrente permanece constante no enrolamento. No caso em que a corrente de armadura é mantida constante e a velocidade é controlada pela tensão de campo, o conjunto é chamado de motor CC controlado pelo campo. [2] As constantes de tempo de motores de corrente contínua controlados pelo campo em geral são grandes em comparação com as constantes de tempo de motores de tamanho equivalente, controlados pela armadura. Alguns dos recursos são o posicionamento ponto a ponto, o perfil de velocidade e a aceleração programada.[5] A utilização de controladores eletrônicos de movimento empregando acionadores com modulação por largura de pulsos (*PWM – pulse – Width – modulated*) é útil para controlar servomotores de corrente contínua . [6] [11]

Etapas de potência modulada por largura de pulso podem ser usadas com motores tanto de ímãs permanentes como de enrolamento. O projeto de um *drive* PWM é afetado pelas características da carga do motor CC.[5]

3 METODOLOGIA

Para a finalidade a que se propôs esse trabalho, foi utilizado um método de ensaio em laboratório e comparado os resultados com os fornecidos pelo conjunto didático. Realizar todas as medições do que o Kit disponibiliza de acordo com a metodologia sugerida no manual do fabricante. Posteriormente compará-los com os resultados obtidos através de medições externas feitas somente com o motor e os devidos instrumentos.

O kit utilizado para o ensaio foi DVC26 fabricado pela Labtrix, conforme a figura 13, o mesmo é composto por um motor de corrente contínua de ímã permanente com escovas. Conforme tabela 4.

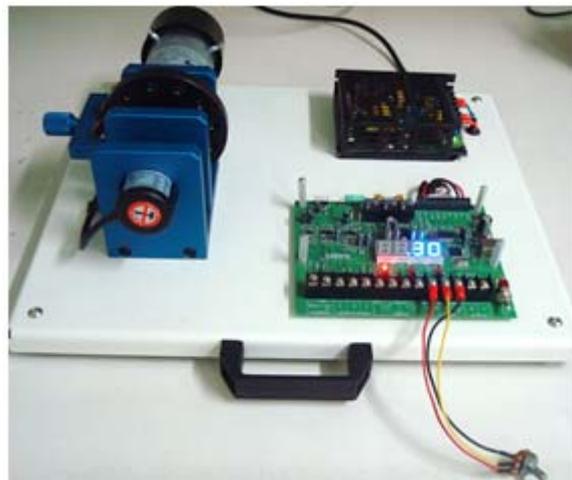


Figura 13: Conjunto para ensaio didático modelo DVC26

Tabela 4: Dados do motor

Modelo	Tensão [V]	Potência [W]	Sem carga	
			Velocidade [rpm]	Corrente [A]
M910-VER -2K2	24	43	2200	2

Para verificação de velocidade e posição é utilizado um encoder de 360 pulsos por revolução, ligado a um tacômetro que indica a velocidade do motor em rpm (revoluções por minuto). A corrente do motor é indicada em ampéres (A) e tensão aplicada ao motor é indicada diretamente em volts (V). Essas três variáveis são indicadas no display. [12]

3.1 Modelagem matemática do motor de corrente contínua

O procedimento de modelagem é realizado para determinar, a partir de medidas experimentais os parâmetros elétricos e eletromecânicos do modelo. Segue abaixo na figura 14 o diagrama da parte elétrica e também da parte mecânica.

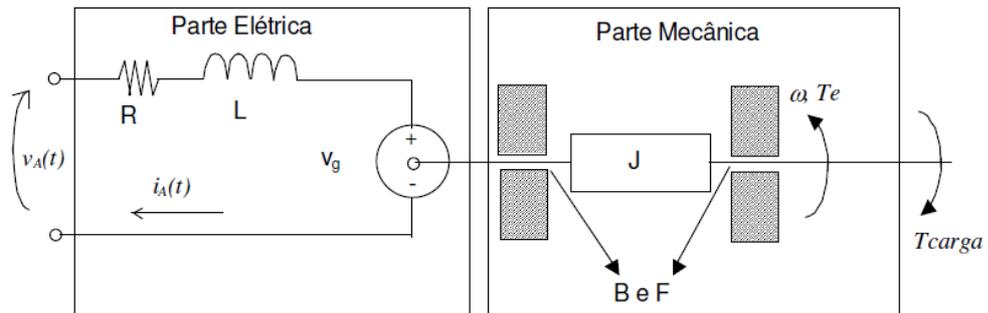


Figura 14: Diagrama esquemático do motor CC [13]

Dos circuitos, da figura 14, temos a seguinte equação da parte elétrica:

$$V_A = R \cdot i_A + L \cdot \frac{di_a}{dt} + v_g \quad (11)$$

Onde:

Variáveis

v_A – tensão de armadura [V]

i_A – corrente de armadura [A]

v_g – tensão FCEM [V]

ω – velocidade [rad/s]

Parâmetros elétricos:

R – resistência de armadura [Ω]

L – indutância de armadura [H]

3.1.1 Ensaio com o Kit

Para a realização dos ensaios, os procedimentos seguidos foram os descritos no manual do fabricante conforme veremos a seguir.

- Determinação da resistência de armadura R

O objetivo dessa etapa é determinar a corrente de armadura. Utilizou-se o kit com rotor travado, assim a velocidade do motor será nula ($\omega=0$) e com a corrente contínua e constante ($\frac{di_a}{dt} = 0$) a equação da parte elétrica do motor é reduzida a:

$$v_A = R \cdot i_A \quad (12)$$

Para a aquisição de dados da tabela a planta foi energizada e para evitar eventuais danos no motor à corrente aplicada não foi superior a 50% da nominal.

- Determinação da indutância de armadura L

Para obter a resposta em frequência, o rotor manteve-se travado. Foi acrescentado um resistor externo R_{ext} em série com o circuito de armadura, formando assim um filtro RL passa baixas e a resistência de armadura foi desprezada. Com o auxílio de um gerador de função foi aplicado um sinal senoidal, e com o osciloscópio a frequência de corte do filtro pode ser determinada, segue abaixo as figuras 15 e 16 com imagem do ensaio realizado.



Figura 15: Determinação da indutância

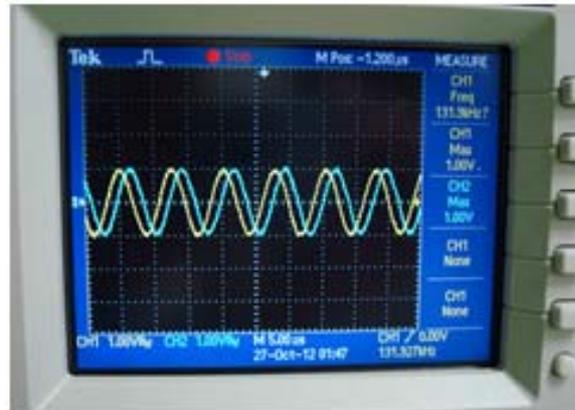


Figura 16: Frequência de corte do filtro

- Determinação da constante de força contra eletromotriz – K_E

A determinação dos valores para a constante de força contra eletromotriz foi feita com o rotor destravado. Aplicada tensão no motor, os valores de tensão [V], corrente [A] e velocidade[rpm] foram anotados para que o cálculo de v_g – (tensão FCEM[V]) e da velocidade [rad/s] fossem realizados.

Considerando a corrente contínua e constante ($\frac{di_a}{dt} = 0$) foi utilizada a equação 13:

$$v_A = R \cdot i_A + v_g \quad (13)$$

E sabendo que $v_g = K_E \cdot \omega$ chegamos à equação 14:

$$v_g = v_A - R \cdot i_A = K_E \cdot \omega \quad (14)$$

Através da regressão linear obtivemos o valor de K_E , pois para máquinas de corrente contínua de ímã permanente a constante de FCEM, K_E é numericamente igual a constante K_T se expressas no sistema Internacional.

- Determinação de B e F

Os valores de B (coeficiente de atrito viscoso) e F (coeficiente de atrito seco) foram obtidos graficamente, utilizados os dados coletados no item anterior.

- Determinação J

A tensão foi aplicada no motor até que a velocidade atingisse 2000 rpm. A tecla de inercia foi acionada para que se obtivesse o valor estimado para o momento polar de inércia J.

3.1.2 Ensaio sem a utilização do Kit

Os ensaios mencionados no manual do fabricante, foram também realizados sem a utilização de Kit exceto a determinação de J, segue abaixo a descrição de cada um deles.

- Determinação da resistência de armadura R

Os cabos que ligavam o motor ao kit foram desconectados, com auxílio de uma fonte foi aplicada tensão no motor travado, a corrente foi verificada através do multímetro e a frequência com o osciloscópio digital. A configuração do ensaio é mostrada na figura 17.

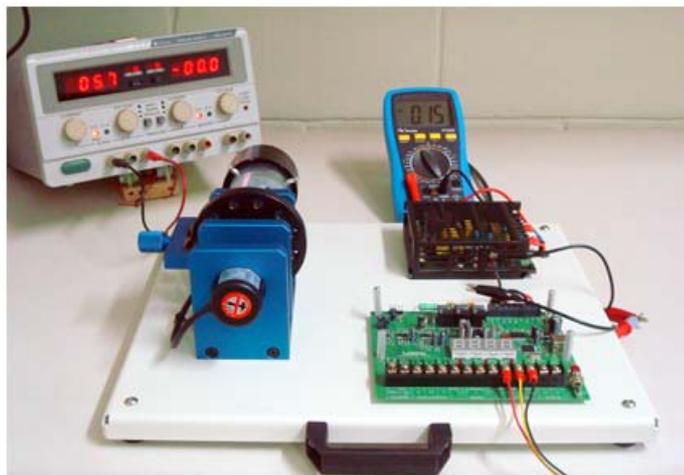


Figura 17: Ensaio para determinação da resistência de armadura

- Determinação da indutância de armadura L

Para determinação da indutância de armadura L sem a utilização do Kit o método utilizado foi o mesmo descrito na determinação com o Kit.

- Determinação da constante de força contra eletromotriz - K_E

Com o rotor destravado, verificou-se e os valores de tensão através da fonte, a corrente com o multímetro digital e a velocidade foi calculada através do valor da frequência, obtida com a ajuda do osciloscópio, ilustrados nas figuras 18 e 19.

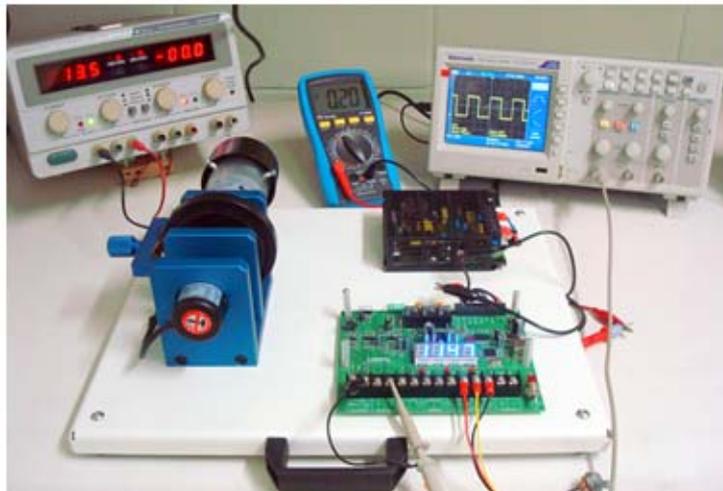


Figura 18: Determinação da força eletromotriz

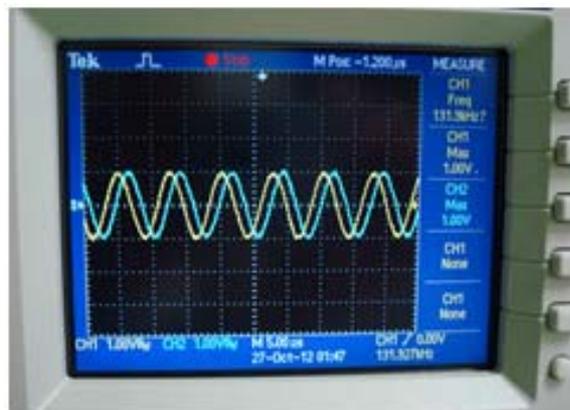


Figura 19: Oscilograma na frequência de corte do filtro

- Determinação de B e F

Com base na tabela anterior, acrescentada uma nova coluna com os valores estimados de torque, e por regressão linear foram determinados os valores de B(coeficiente de atrito viscoso) e F (coeficiente de atrito seco).

4 RESULTADOS

Serão apresentados primeiramente os resultados na seguinte ordem: ensaios com o Kit DVC26, ensaios sem a utilização do Kit e os ensaios com o software DVC26-SW1. Posteriormente os resultados serão discutidos.

- Determinação da resistência de armadura.

Tabela 5: Determinação da resistência de armadura com a utilização do Kit

Amostra	Tensão [V]	Corrente [A]	Resistência [Ω]
1	0,6	0,23	2,61
2	1,1	0,38	2,89
3	1,5	0,55	2,73
4	2,1	0,78	2,69
5	2,6	0,97	2,68
Resistência média =			2,72
Desvio padrão =			0,106

Tabela 6: Determinação da resistência de armadura sem a utilização do Kit

Amostra	Tensão [V]	Corrente [A]	Resistência [Ω]
1	0,6	0,22	2,73
2	1,1	0,40	2,75
3	1,5	0,54	2,78
4	2,1	0,75	2,80
5	2,6	0,93	2,80
Resistência média =			2,77
Desvio padrão =			0,031

Tabela 7: Determinação da resistência de armadura com Software DVC26-SW1

Amostra	Tensão (V)	Corrente (A)	Resistência (Ω)
1	0,8	0,25	3,20
2	1,3	0,42	3,07
3	1,6	0,51	3,11
4	2,2	0,70	3,13
5	3	0,98	3,07
Resistência média =			3,116
Desvio padrão =			0,054

Ao calcular a média chegamos aos valores descritos abaixo:

R= 2,72 [Ω] com a utilização do Kit

R= 2,77 [Ω] sem a utilização do Kit

R= 3,116 [Ω] com a utilização do software

- Determinação da Indutância de Armadura L

A frequência foi ajustada até que a tensão no indutor fosse igual à tensão no resistor, através de cálculo chegamos ao valor de 4,32 mH.

Frequência aplicada no gerador de função: 132.4 kHz

Resistor externo: 3,6 k Ω

$$L = \frac{R_{ext}}{2 \cdot \pi \cdot f_{corte}} \quad L = \frac{3600}{2 \cdot \pi \cdot 132.4K} \quad L = 4,32mH$$

- Determinação da constante de força eletromotriz - K_E

A seguir são apresentadas as tabelas com os devidos resultados obtidos:

Tabela 8 (com a utilização do Kit), tabela 9 (sem a utilização do Kit) e a tabela 10 (com a utilização do software). Nos gráficos da figura 20, 21 e 22 observamos os valores K_E .

Valor de K_E com a utilização do Kit =0,1010 [V s/rad]

Valor de K_E sem a utilização do Kit =0,1018 [V s/rad]

Valor de K_E a utilização do Software =0,0995 [V s/rad]

Tabela 8: Determinação da constante Ke com a utilização do Kit

Amostra	Tensão [V]	Corrente [A]	Velocidade [rpm]	Velocidade [rad/s]	Vg[V]
1	2,40	0,30	138	14,45	1,584
2	3,50	0,32	240	25,13	2,630
3	4,70	0,35	344	36,02	3,748
4	5,50	0,36	415	43,46	4,521
5	6,70	0,38	516	54,04	5,666
6	7,60	0,39	603	63,15	6,539
7	8,70	0,41	705	73,83	7,585
8	9,60	0,42	787	82,41	8,458
9	10,70	0,43	890	93,20	9,530
10	11,60	0,44	975	102,10	10,403
11	12,70	0,45	1080	113,10	11,476
12	13,70	0,46	1165	122,00	12,449
13	15,00	0,47	1291	135,19	13,722
14	15,70	0,48	1354	141,79	14,394
15	16,50	0,49	1434	150,17	15,167
16	17,70	0,51	1544	161,69	16,313
17	19,70	0,52	1738	182,00	18,286
18	20,60	0,53	1820	190,59	19,158
19	21,50	0,53	1906	199,60	20,058
20	22,50	0,55	2007	210,17	21,004

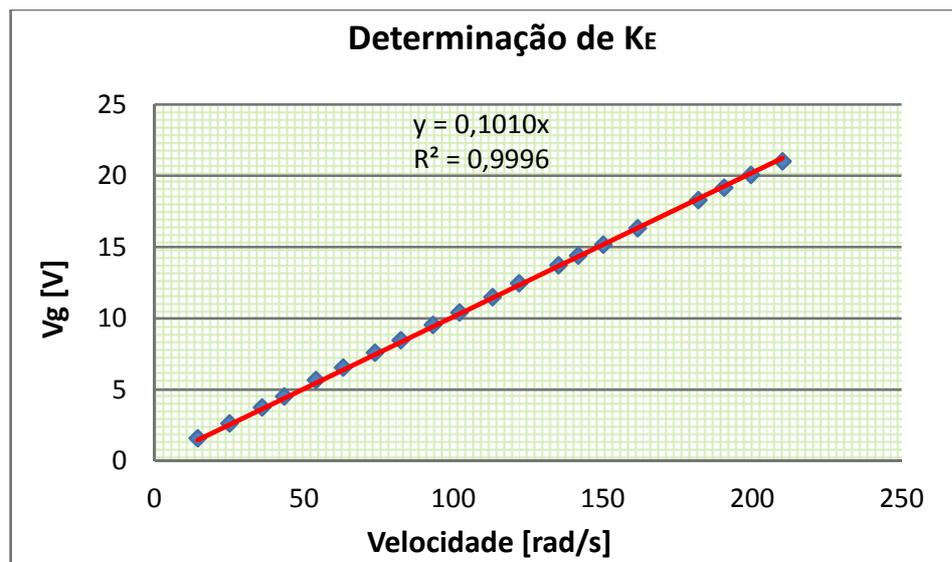


Figura 20: Determinação de Ke com a utilização do Kit

Tabela 9: Determinação da constante Ke sem a utilização do Kit

Amostra	Tensão [V]	Corrente [A]	Frequência [KHz]	Velocidade [rpm]	Velocidade [rad/s]	Vg [V]
1	2,40	0,27	0,765	134	14,03	1,652
2	3,50	0,31	1,360	219	22,93	2,641
3	4,70	0,34	2,010	325	34,03	3,758
4	5,50	0,34	2,475	399	41,78	4,558
5	6,70	0,36	3,115	509	53,30	5,703
6	7,60	0,38	3,571	584	61,16	6,547
7	8,70	0,40	4,184	690	72,26	7,592
8	9,60	0,41	4,673	770	80,63	8,464
9	10,70	0,42	5,319	874	91,53	9,537
10	11,60	0,43	5,780	960	100,53	10,409
11	12,70	0,44	6,401	1064	111,42	11,481
12	13,70	0,45	6,945	1150	120,43	12,454
13	15,00	0,47	7,693	1275	133,52	13,698
14	15,70	0,47	8,075	1340	140,32	14,398
15	16,50	0,48	8,548	1417	148,39	15,170
16	17,70	0,49	9,174	1533	160,54	16,343
17	19,70	0,51	10,310	1721	180,22	18,287
18	20,60	0,52	10,750	1809	189,44	19,160
19	21,50	0,53	11,240	1888	197,71	20,032
20	22,50	0,53	11,900	1988	208,18	21,032

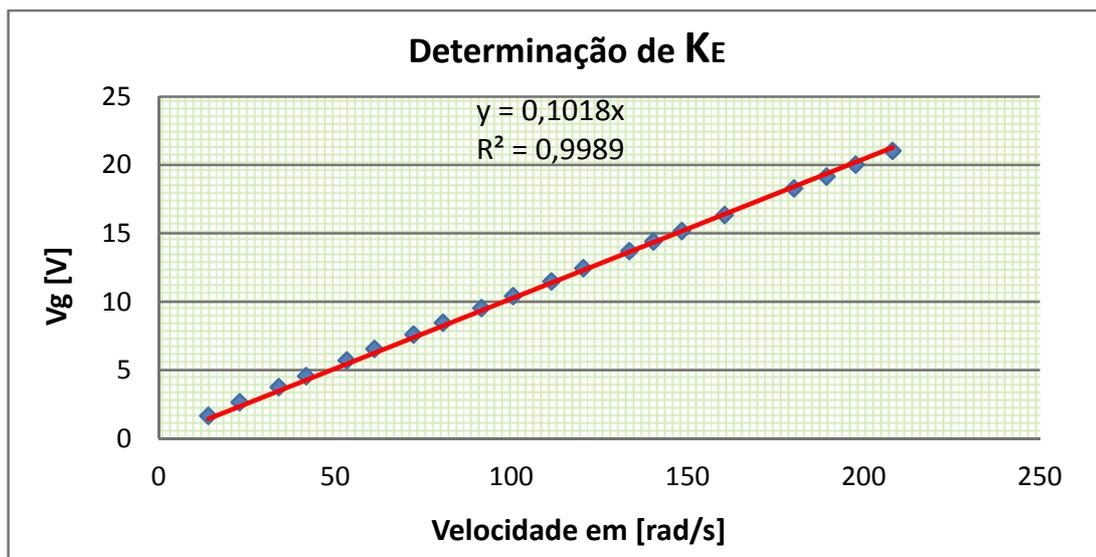
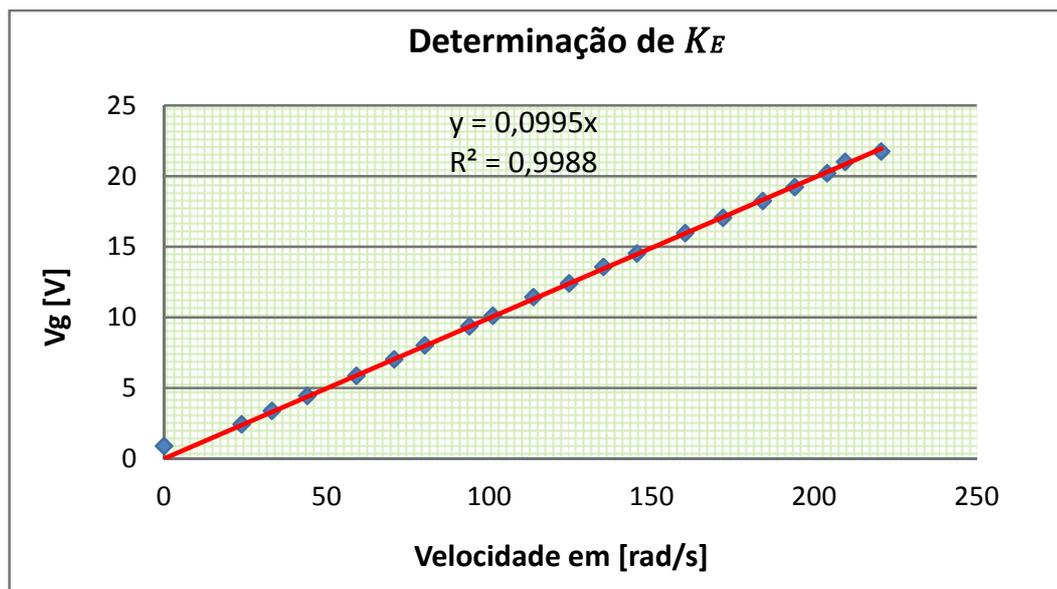


Figura 21: Determinação de Ke sem a utilização do Kit

Tabela 10: Determinação da constante K_E com Software DVC26-SW1

Amostra	Tensão [V]	Corrente [A]	Rotação [rpm]	Velocidade [rad/s]	v_g [V]
1	2,4	0,484	0	0,000	0,892
2	3,4	0,310	228	23,876	2,434
3	4,4	0,326	317	33,196	3,384
4	5,5	0,338	421	44,087	4,447
5	7,1	0,396	565	59,167	5,866
6	8,3	0,406	676	70,791	7,035
7	9,3	0,410	766	80,216	8,022
8	10,7	0,428	897	93,934	9,366
9	11,4	0,412	966	101,160	10,116
10	12,9	0,469	1085	113,621	11,439
11	13,8	0,445	1190	124,617	12,413
12	15,0	0,459	1291	135,194	13,570
13	16,0	0,475	1389	145,456	14,520
14	17,4	0,459	1531	160,326	15,970
15	18,6	0,496	1642	171,950	17,054
16	19,8	0,501	1759	184,202	18,242
17	20,8	0,504	1853	194,046	19,230
18	21,8	0,512	1948	203,995	20,205
19	22,6	0,51	2001	209,545	21,011
20	23,6	0,596	2107	220,645	21,743

Figura 22: Determinação de K_E com Software DVC26-SW

- Determinação de B e F

Por meio dos dados das tabelas apresentadas anteriormente foram calculados B (coeficiente de atrito viscoso) e F (coeficiente de atrito seco). Os resultados são apresentados na tabela 11 (valores com a utilização do kit), tabela 12 (valores sem a utilização do kit) e tabela 13 (valores com a utilização do software DVC26-SW).

A resposta do sistema foi verificada através dos gráficos de T_e versus ω , os gráficos das figuras a seguir nos mostram os valores de B e F.

-Valores com o kit:

$$K_E = 0,1010 \text{ [V s/rad]}$$

$$B = 1,20E-4 \text{ [Nm s/rad]}$$

$$F = 3,12E-2 \text{ [Nm]}$$

-Valores sem o kit:

$$K_E = 0,1018 \text{ [V s/rad]}$$

$$B = 1,19E-4 \text{ [Nm s/rad]}$$

$$F = 3,05E-2 \text{ [Nm]}$$

-Valores com o software:

$$K_E = 0,0995 \text{ [V s/rad]}$$

$$B = 0,84E-4 \text{ [Nm s/rad]}$$

$$F = 3,44E-2 \text{ [Nm]}$$

Tabela 11: Determinação de B e F com a utilização do Kit

Amostra	Tensão [V]	Corrente [A]	Velocidade [rpm]	Velocidade [rad/s]	Vg [V]	Te [Nm]
1	6,70	0,38	516	54,04	5,666	0,038
2	7,60	0,39	603	63,15	6,539	0,039
3	8,70	0,41	705	73,83	7,585	0,041
4	9,60	0,42	787	82,41	8,458	0,042
5	10,70	0,43	890	93,20	9,530	0,043
6	11,60	0,44	975	102,10	10,403	0,044
7	13,70	0,46	1165	122,00	12,449	0,046
8	15,00	0,47	1291	135,19	13,722	0,047
9	16,50	0,49	1434	150,17	15,167	0,049
10	17,70	0,51	1544	161,69	16,313	0,052
11	18,60	0,51	1631	170,80	17,213	0,052
12	19,70	0,52	1738	182,00	18,286	0,053
13	20,60	0,53	1820	190,59	19,158	0,054
14	21,50	0,53	1906	199,60	20,058	0,054
15	22,50	0,55	2007	210,17	21,004	0,056

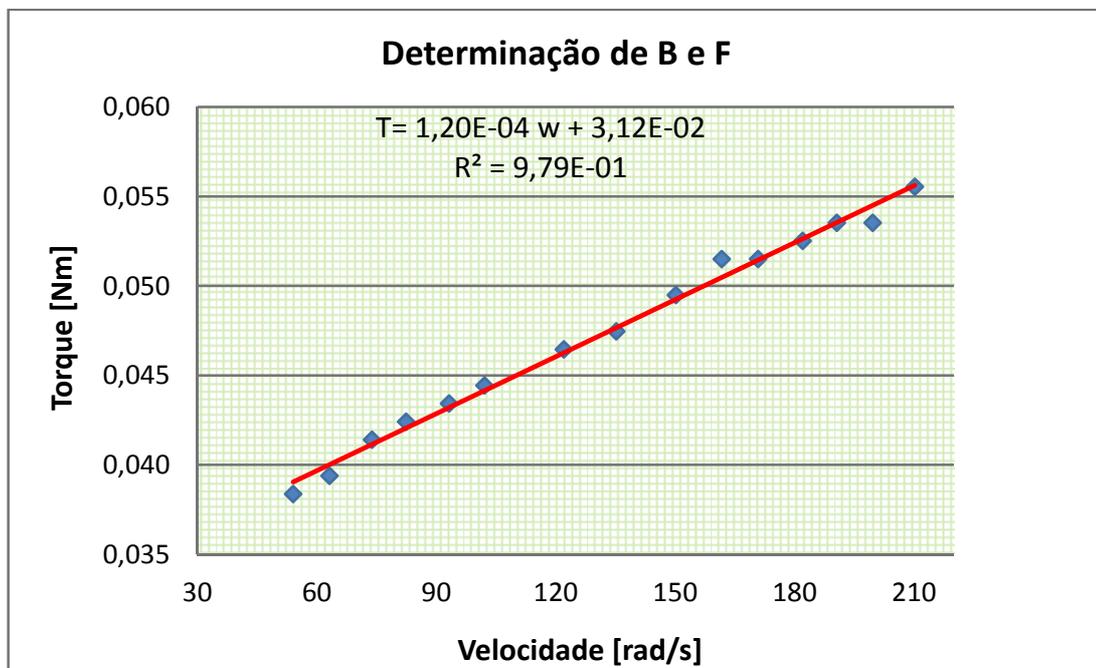


Figura 23: Determinação de B e F com a utilização do Kit

Tabela 12: Determinação de B e F sem a utilização do Kit

Amostra	Tensão [V]	Corrente [A]	Frequência [KHz]	Velocidade [rpm]	Velocidade [rad/s]	Vg[V]	Te [Nm]
1	6,70	0,36	3,115	509	53,30	5,703	0,037
2	7,60	0,38	3,571	584	61,16	6,546	0,039
3	8,70	0,40	4,184	690	72,26	7,592	0,041
4	9,60	0,41	4,673	770	80,63	8,464	0,042
5	10,70	0,42	5,319	874	91,53	9,537	0,043
6	11,60	0,43	5,780	960	100,53	10,409	0,044
7	13,70	0,45	6,945	1150	120,43	12,453	0,046
8	15,00	0,47	7,693	1275	133,52	13,698	0,048
9	16,50	0,48	8,548	1417	148,39	15,170	0,049
10	17,70	0,49	9,174	1533	160,54	16,343	0,050
11	18,60	0,50	9,709	1615	169,12	17,215	0,051
12	19,70	0,51	10,310	1721	180,22	18,287	0,052
13	20,60	0,52	10,750	1809	189,44	19,160	0,053
14	21,50	0,53	11,240	1888	197,71	20,032	0,054
15	22,50	0,53	11,900	1988	208,18	21,032	0,054

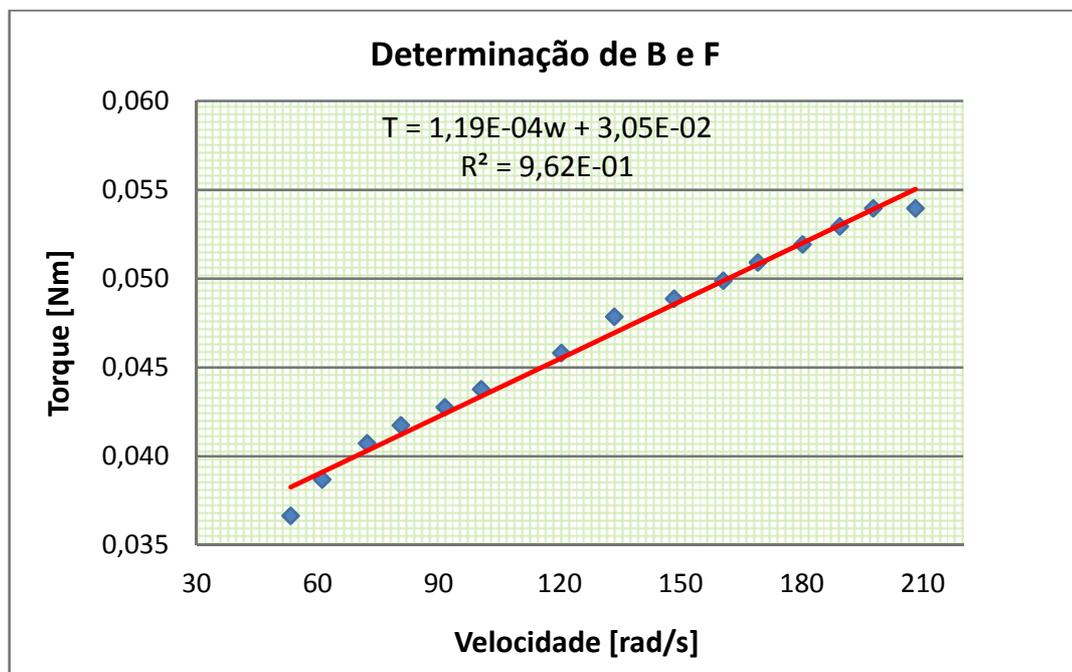


Figura 24: – Determinação de B e F sem a utilização do Kit

Tabela 13: Determinação da constante B e F através do Software DVC26-SW1

Amostra	Tensão [V]	Corrente [A]	Rotação [rpm]	Velocidade [rad/s]	Vg [V]	Te[Nm]
1	7,1	0,396	565	59,167	5,866	0,039
2	8,3	0,406	676	70,791	7,035	0,040
3	9,3	0,41	766	80,216	8,022	0,041
4	10,7	0,428	897	93,934	9,366	0,043
5	11,4	0,412	966	101,160	10,116	0,041
6	12,9	0,469	1085	113,621	11,439	0,047
7	13,8	0,445	1190	124,617	12,413	0,044
8	15,0	0,459	1291	135,194	13,570	0,046
9	16,0	0,475	1389	145,456	14,520	0,047
10	17,4	0,459	1531	160,326	15,970	0,046
11	18,6	0,496	1642	171,950	17,054	0,049
12	19,8	0,501	1759	184,202	18,242	0,050
13	20,8	0,504	1853	194,046	19,230	0,050
14	21,8	0,512	1948	203,995	20,205	0,051
15	22,6	0,51	2001	209,545	21,011	0,051

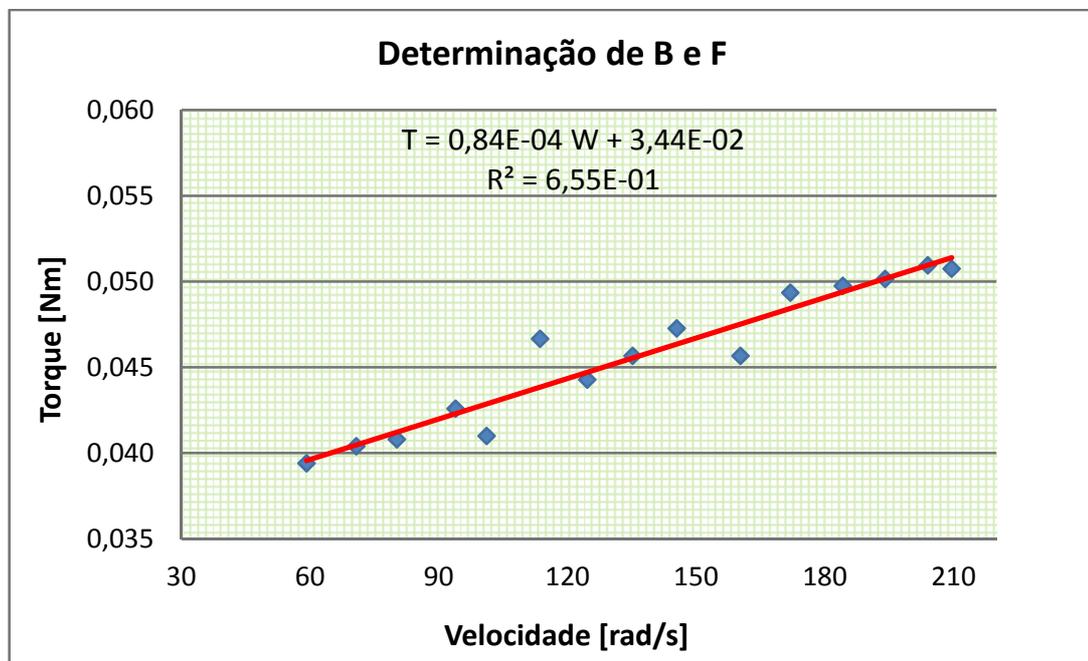


Figura 25: Determinação da constante B e F através do Software DVC26-SW1

- Determinação J

Abaixo as tabelas com as medições realizadas para determinação de J. A determinação desse valor foi realizada apenas por dois métodos, com a utilização do Kit (tabela 14) e com a utilização do software DVC26-SW. (tabela 15)

Valor de J com a utilização do Kit = $9,45E-04$ [kg m²]

Valor de J a utilização do Software = $1,03E-03$ [kg m²]

Tabela 14: Determinação de J com a utilização do Kit

Tempo [S]	Velocidade [rpm]	Velocidade [rad/s]	Veloc. Modelo
0,0	1956	204,83	204,83
0,5	1683	176,24	176,69
1,0	1412	147,86	150,27
1,5	1182	123,78	125,46
2,0	964	100,95	102,17
2,5	753	78,85	80,29
3,0	546	57,18	59,75
3,5	416	43,56	40,47
4,0	230	24,09	22,36
4,5	0	0,00	5,35

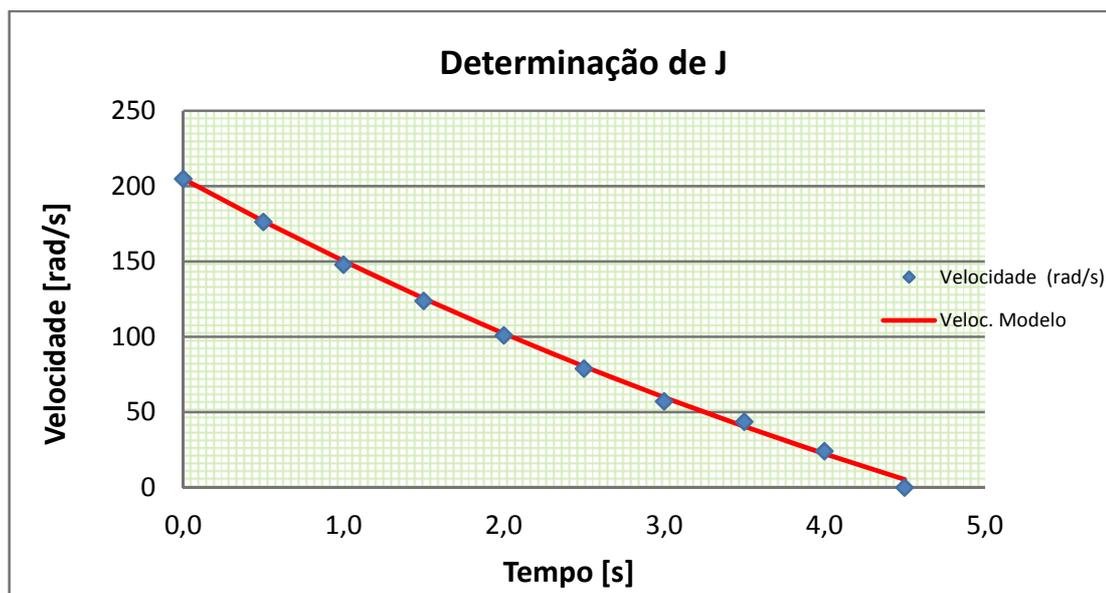


Figura 26: Determinação de J através do kit

Tabela 15: Determinação de J através do Software DVC26-SW1

Tempo [s]	Rotação [rpm]	Velocidade [rad/s]	Veloc. Modelo
0	2026	212,16	212,16
0,2	1938	202,95	201,41
0,4	1864	195,20	190,91
0,6	1762	184,52	180,64
1	1545	161,79	160,81
1,4	1339	140,22	141,89
1,6	1244	130,27	132,75
2	1080	113,10	115,09
2,4	896	93,83	98,24
2,6	814	85,24	90,10
3	679	71,10	74,38
3,4	575	60,21	59,38
3,6	453	47,44	52,13
4	380	39,79	38,14
4,4	289	30,26	24,78
4,6	289	30,26	18,32
4,8	0	0,00	12,02

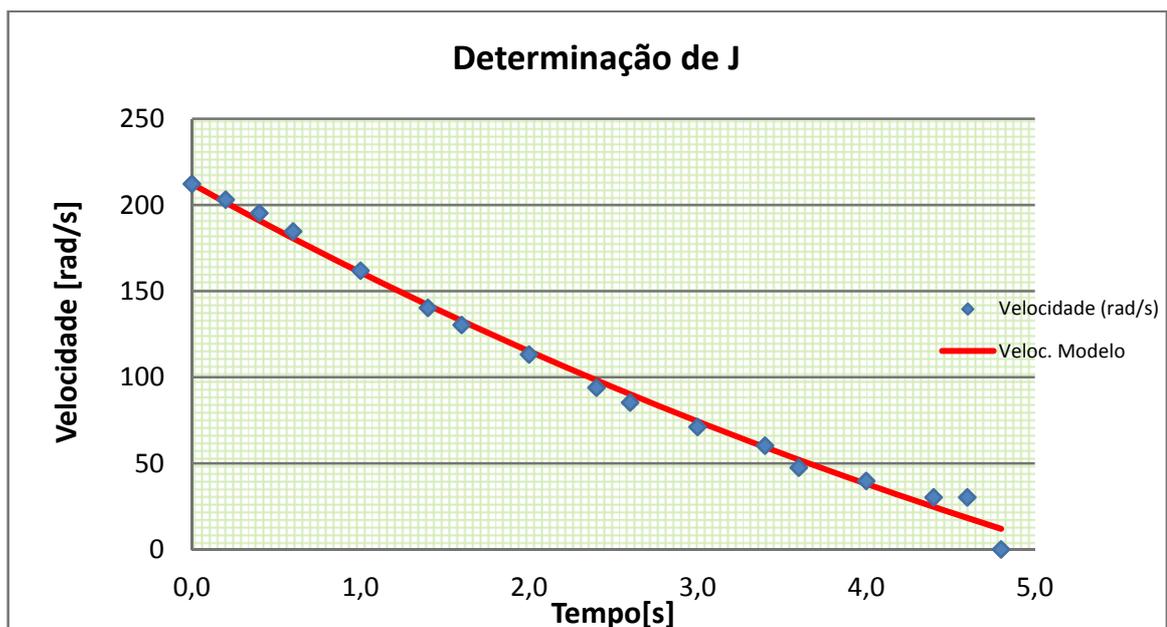


Figura 27: Determinação de J através do software DVC26-SW

4.3 Simulação com o Simulink

Na figura 28 está o diagrama de blocos para simulação e implementação das equações que representam o sistema físico.

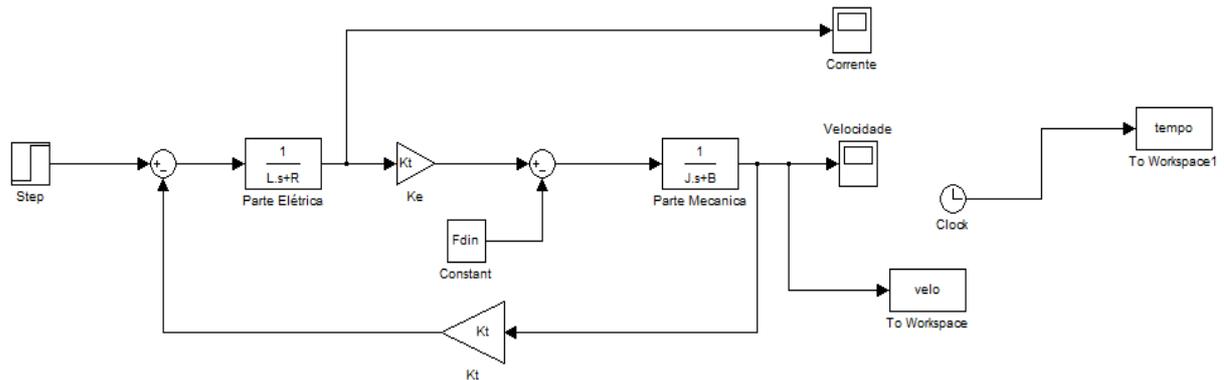


Figura 28: Diagrama de blocos do Simulink [14]

Segue abaixo o programa elaborado para simulação:

```
clear all;
clc;
disp ('SIMULAÇÃO DO MOTOR CC');
disp (' ');
time_step=input ('Digite o tempo do degrau: ');
step=input ('Digite o valor inicial do degrau step: ');
step1=input ('Digite o valor final do degrau step: ');
L=input ('Digite o valor da indutância L: ');
R=input ('Digite o valor da resistência R: ');
Kt=input ('Digite o valor da constante de torque Kt: ');
Fdin=input ('Digite o valor de Fdin: ');
J=input ('Digite o valor da inercia J: ');
B=input ('Digite o valor da coeficiente de atrito B: ');
sim('motor1_cc');
%sim('motor_cc_num');
simplot(tempo, velocidade);
pause;
simplot(tempo, corrente);
vm=max(velo);
vrpm=vm/(pi/30);
disp('VELOCIDADE EM RPM: ');
vrpm
```

4.3.1 Resposta à aceleração

A simulação abaixo foi realizada utilizando os valores dos ensaios sem a utilização do Kit.

SIMULAÇÃO DO MOTOR CC

Digite o tempo do degrau: 0

Digite o valor inicial do degrau step: 0

Digite o valor final do degrau step: 10

Digite o valor da indutância L: 0.00432

Digite o valor da resistência R: 2.77

Digite o valor da constante de torque Kt: 0.1018

Digite o valor de Fdin: 0.0305

Digite o valor da inercia J: 0.000928

Digite o valor da coeficiente de atrito B: 0.000119

VELOCIDADE EM RPM: 833.6785

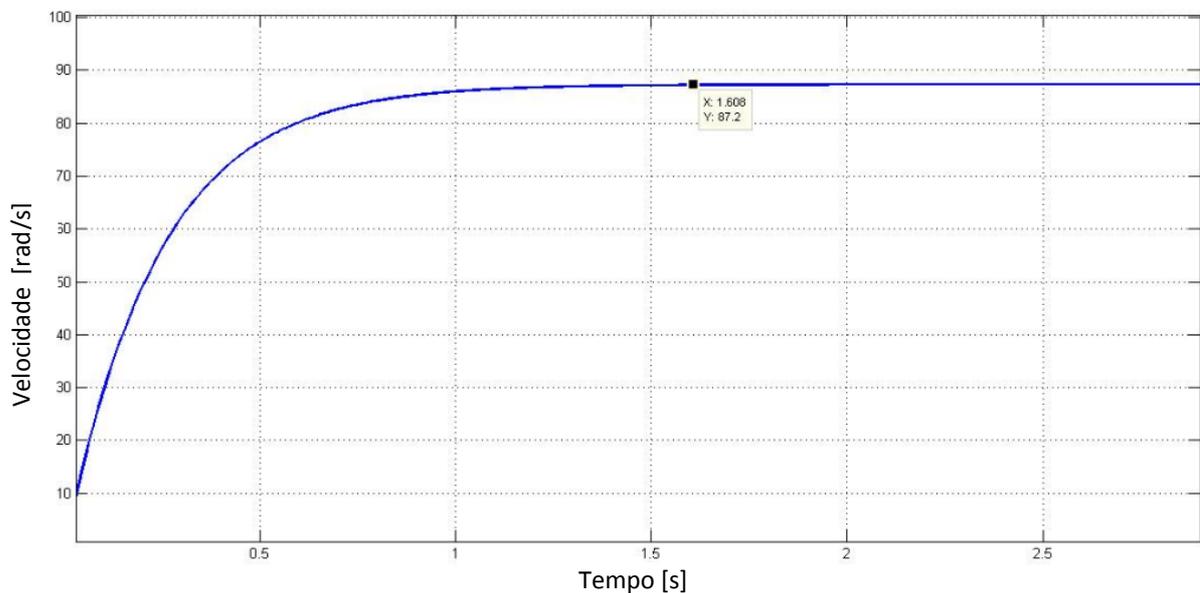


Figura 29: Resposta à aceleração com a utilização do Simulink

Na tabela 16 pode-se verificar que o tempo de resposta da aceleração, e na figura do gráfico 30 a velocidade, o período de aquisição é de 100ms.

Tabela 16: Determinação de J através do Software DVC26-SW1

Tempo (s)	Rotação (rpm)
0	0
0,1	0
0,2	0
0,3	467
0,4	467
0,5	631
0,6	710
0,7	755
0,8	784
0,9	802
1	814
1,1	823
1,2	828
1,3	832
1,4	836
1,6	838

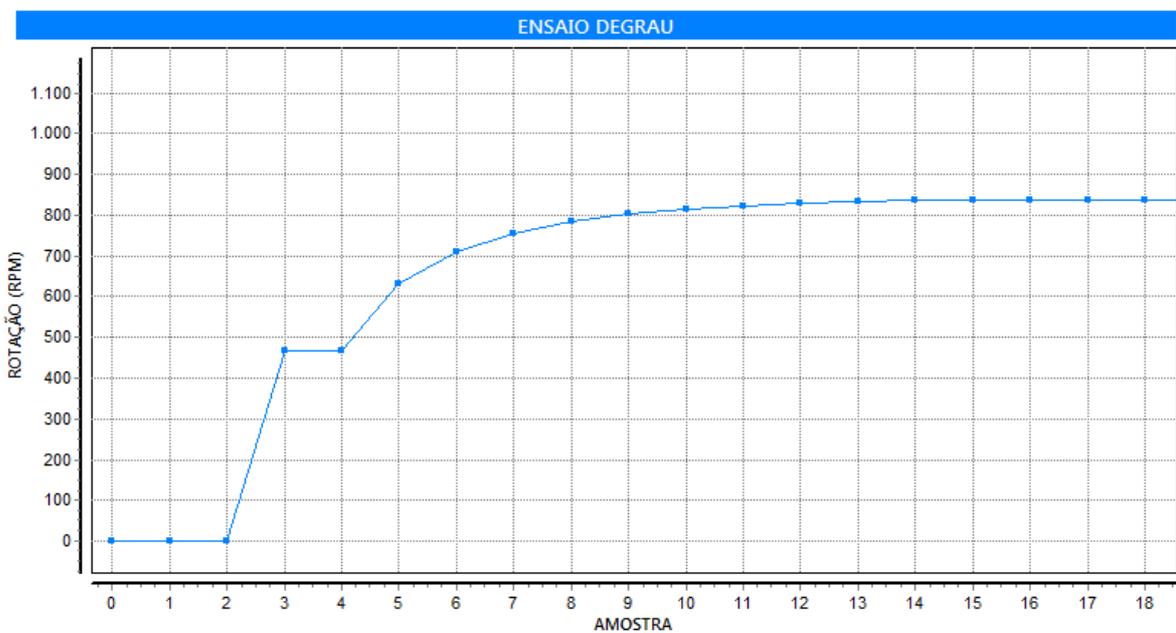


Figura 30: Resposta à aceleração com a utilização DVC26-SW

4.3.2 Resposta à desaceleração

Segue abaixo os valores dos ensaios sem a utilização do Kit para verificar o tempo de resposta da desaceleração.

SIMULAÇÃO DO MOTOR CC

Digite o tempo do degrau: 10

Digite o valor inicial do degrau step: 10

Digite o valor final do degrau step: 0

Digite o valor da indutância L: 0.00432

Digite o valor da resistência R: 2.77

Digite o valor da constante de torque Kt: 0.1018

Digite o valor de Fdin: 0.0305

Digite o valor da inercia J: 0.000928

Digite o valor do coeficiente de atrito B: 0.000119

VELOCIDADE EM RPM: 833.6785

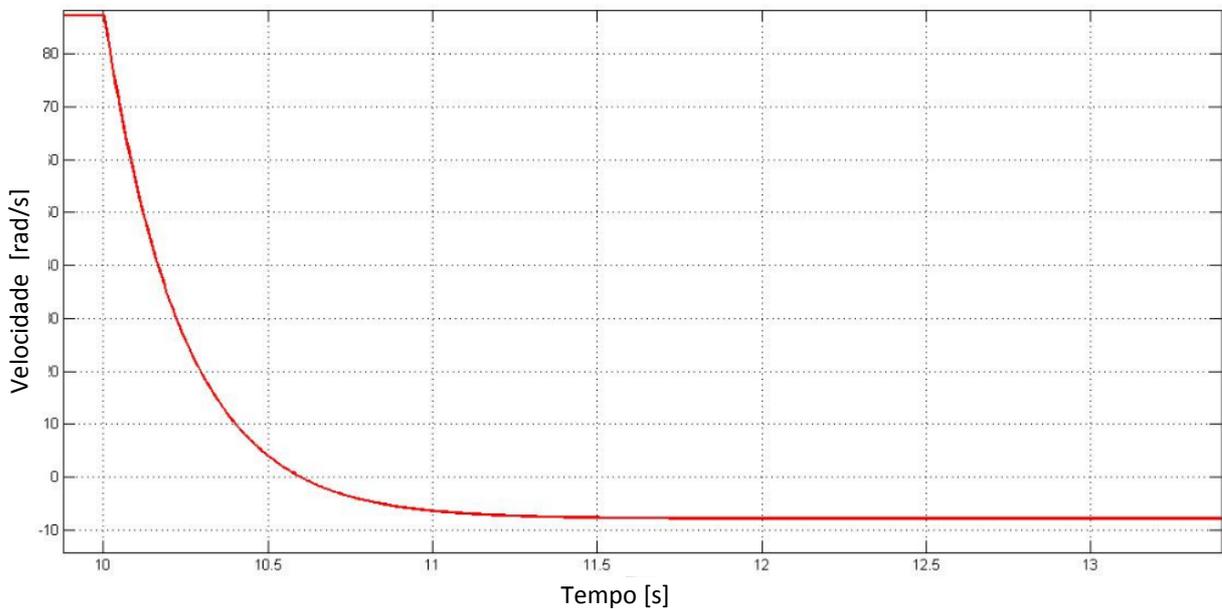


Figura 31: Resposta à desaceleração com a utilização do Simulink

A simulação de ensaio de desaceleração também foi realizada utilizando Software DVC26-SW1, abaixo na tabela 17 pode-se verificar o tempo de resposta da desaceleração e na figura do gráfico 32 a velocidade.

Tabela 17: Determinação de J através do Software DVC26-SW1

Tempo (s)	Rotação (rpm)
0	840
0,2	780
0,4	695
0,6	602
0,8	602
1	550
1,2	550
1,4	274
1,6	274
1,8	274
2	0

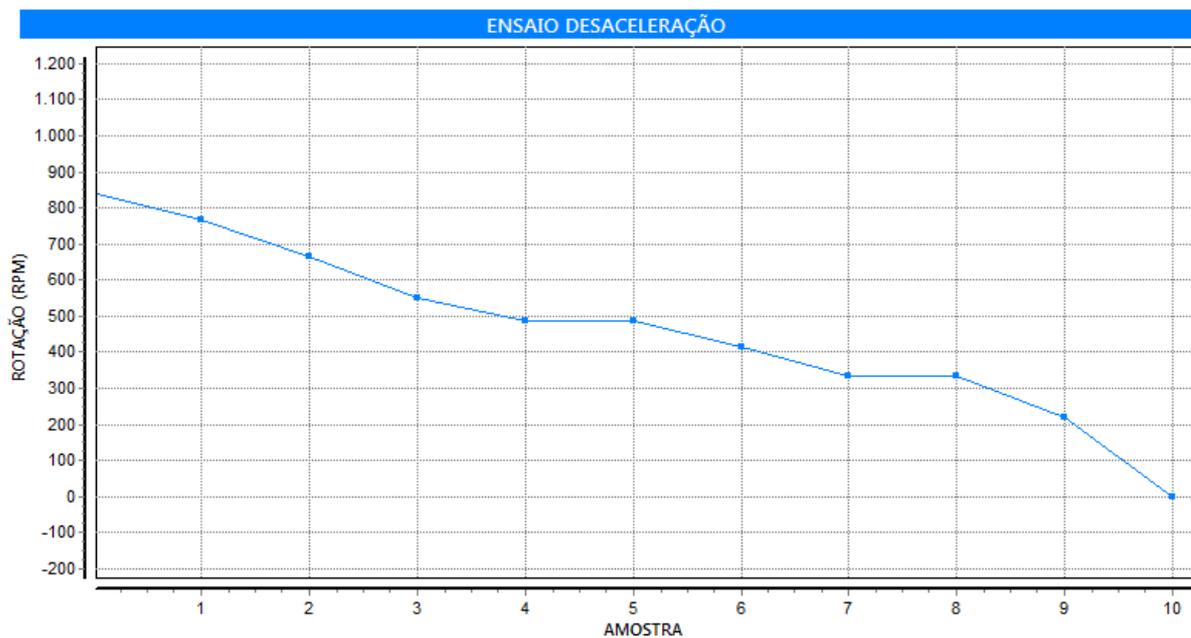


Figura 32: Resposta à desaceleração com a utilização do Software DVC26-SW1

Tomaremos como base de comparação sempre as medições feitas sem a utilização do Kit. Após análise dos dados verificou-se diferença não significativa nos dados coletados, com utilização do Kit, porém a aquisição de dados utilizando o software do fabricante apresentou diferença significativa em alguns valores. Segue abaixo a tabela 18 com os resultados finais e as diferenças percentuais. A diferença do valor de J foi feita utilizando o kit e o software DVC26-SW.

Tabela 18: Comparação dos resultados

Constantes	Sem o Kit	KIT DVC26		Software DVC26-SW1	
	Valor	Valor	Diferença %	Valor	Diferença %
R [Ω]	2,77	2,72	1,81%	3,166	12,50%
Ke [V s/rad]	0,1018	0,1010	0,79%	0,0995	2,26%
B [Nm s/rad]	1,19E-04	1,20E-04	0,84%	8,44E-05	29,41%
F [Nm]	3,05E-02	3,12E-02	2,30%	3,44E-02	12,79%
J [kg m²]	N/A	9,45E-04	8,99%	1,03E-03	8,99%

A resposta com respeito à aceleração e desaceleração utilizando como valor de alimentação um degrau 10 V, apresentaram resultados satisfatórios.

O ensaio de aceleração (utilizando os parâmetros dos ensaios sem a utilização do Kit), resulto em uma velocidade de 833 rpm em um tempo (estabilização) de 1,608 s e com o software DVC26-SW a rotação foi de 838 rpm em 1,6 s.

No ensaio de desaceleração o tempo para a velocidade 833 rpm atingir valor 0 rpm foi de 1,8 s, já com a utilização do software DVC26-SW (velocidade de 840 rpm) o tempo foi de 2s. Recomenda-se que o fabricante melhore a aquisição dos dados com respeito ao valor das constantes do motor (R, K_E, B, F)

5 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou o assunto sobre conversão de energia eletromecânica, mais especificamente máquinas de corrente contínua.

O principal objetivo foi analisar o desempenho de um conjunto didático que visa auxiliar na aquisição de dados necessários para obtenção da função de transferência de motores CC. Foram realizados três tipos de ensaio: com e sem a utilização do Kit DVC-26 e com o software DVC26-SW.

Com a análise dos resultados feita através dos gráficos e tabelas foi possível verificar o desempenho do Kit DVC26. Observou-se que os resultados dos ensaios com o Kit possuem valores bem próximos aos realizados sem a utilização do Kit. Já os resultados das constantes (R , K_E , B , F) obtidos através do software apresentam diferença significativa de até 29% em relação aos ensaios realizados por meio de medição externa.

Um parâmetro muito importante na modelagem de sistemas é o tempo de estabilização do mesmo. Utilizando o programa computacional MATLAB e o software do fabricante foi possível realizar ensaios de aceleração e desaceleração do motor. Observou-se que os resultados apresentaram uma pequena variação com respeito à velocidade e o tempo de estabilização do motor, sendo considerado aceitável.

Conclui-se que é bastante conveniente que o fabricante do Kit DVC26 aprimore a aquisição de dados que o software DVC26-SW utiliza, uma vez que foi evidenciado nesta pesquisa a necessidade de melhoras.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FITZGERALD, A.E; KINGSLEY JUNIOR, Charles; KUSKO, Alexander. **Máquinas elétricas**. São Paulo, SP: Makron Books, 1975. 623p.
- [2] WEG, **Características e especificações de motores de corrente contínua e conversores ca/cc**. Artigo Técnico. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-3-caracteristicas-e-especificacoes-de-motores-de-corrente-continua-conversores-ca-cc-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2012.
- [3]GASPAR, Leandro Souza. **Plataforma para medição de velocidade em motor cc sem o uso de sensores acoplado ao eixo**. 2011. 64 f. Monografia - Programa de graduação em Engenharia Eletrônica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- [4] KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores**. São Paulo, SP: Globo, 10.ed,1994.667p.
- [5] SANTOS, Milton Felipe Souza; CATARINO, Daniel Kohwalter. **Projeto de uma plataforma micro processada supervisionada por computador para controle simultâneo e independente de motores cc**. 2004. 142 f. Monografia – Programa de graduação em Engenharia Eletrônica, Instituto de Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <http://www.bd.bibl.ita.br>. Acesso em: 17 maio 2012
- [6] LEVI, Santana. **Controle de motor cc**. Disponível em: <<http://leviclauprojetos.net/index.php.pag=1907085966>>. Acesso em: 23 set. 2012.
- [7] **Engineering House**. Disponível em : <<http://eng-electric.blogspot.com.br/2010/02/dc-motors.html>>. Acesso em : 03 out. 2012
- [8] NASAR, Syed A. **Máquinas elétricas**. São Paulo, SP: McGraw-Hill,1984. 217p.
- [9] LOPES, Juliana. **Estratégias de gerenciamento de potência em ônibus de transporte urbano elétrico híbrido série**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- [10] SIEMENS. **Motores de corrente contínua**. Artigo Técnico. Disponível em: <http://www.deg.ufla.br/site/_adm/upload/arquivos/motorcc-siemens.pdf>. Acesso em: 15 maio 2012.
- [11] LENZ, André Luiz. **Características de Máquina CC**. São Paulo, SP: Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAAdvIAA/caracteristicas-maquina-cc>>. Acesso em: 20 set. 2012.
- [12] BOLTON, W. **Engenharia de controle**. São Paulo, SP: Makron Books, 1995. 497p.
- [13] LABTRIX. **Manual do aluno Conjunto Servomecanismo modelo DVC26**. Itatiba, SP, 2011
- [14] MATLAB The Language of Technical Computing. Version 7.5.0.0.342 (R2007b): The MathWorks, 2007. 1-CD-ROM.