

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS - IRN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA
ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE FRENAGEM DINÂMICA
EM UMA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA DE
EXCITAÇÃO INDEPENDENTE, NA OCORRÊNCIA DE UMA
FALTA DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor: **Ricardo Mohallem Rezek**

Orientador: **Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek**

Itajubá, Janeiro de 2007–MG/Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS - IRN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA
ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE FRENAGEM DINÂMICA
EM UMA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA DE
EXCITAÇÃO INDEPENDENTE, NA OCORRÊNCIA DE UMA
FALTA DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor: **Ricardo Mohallem Rezek**

Orientador: **Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek**

Curso: **Mestrado em Engenharia da Energia**

Área de Concentração: **Gestão de Sistemas Energéticos**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia da Energia.

Itajubá, Janeiro de 2007–MG/Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS - IRN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA
ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE FRENAGEM DINÂMICA
EM UMA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA DE
EXCITAÇÃO INDEPENDENTE, NA OCORRÊNCIA DE UMA
FALTA DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor: **Ricardo Mohallem Rezek**

Orientador: **Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Dalgerti Lelis Milanese - UNESP/Ilha Solteira(SP)

Prof. Dr. Antonio Tadeu Lyrio de Almedia –
UNIFEI/Itajubá(MG)

Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek – UNIFEI/Itajubá(MG)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a meus filhos Igor e Rayssa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sobretudo e especialmente a Deus, por essa oportunidade conseguida.

Sem distinção, agradeço também a todos que direta ou indiretamente, tornaram esse trabalho possível.

Três classes de pessoas são infelizes :

a que não sabe e não pergunta;

a que sabe e não ensina ;

a que ensina e não faz.

V. Beta

RESUMO

Esse trabalho se propõe a demonstrar que uma máquina DC de excitação independente, pode ter sua frenagem dinâmica otimizada, através de uma significativa redução no tempo para tal.

A frenagem dinâmica é realizada quando um motor DC passa a operar como gerador DC.

Sua energia cinética é quase totalmente transformada em energia elétrica, sendo dissipada em um banco de resistores conectado ao seu circuito de armadura.

O circuito indutor da máquina é alimentado por um conjunto de baterias, através de um conversor CC/CC (Chopper), capaz de levar a força eletromotriz de armadura ao maior valor possível, no intervalo entre a máxima velocidade e a velocidade nominal da máquina.

Assim, uma quantidade bem maior de energia por unidade de tempo, pode ser dissipada nesse intervalo.

Como consequência direta, o tempo de frenagem se torna substancialmente menor.

Outras variáveis como o torque, a corrente de frenagem e a velocidade, também serão analisadas.

Será possível concluir, quando sujeitas a esse tipo de frenagem, que tanto a máquina quanto a carga acionada por ela, não estarão sujeitas a nenhum tipo de anormalidade ou esforços proibitivos.

Palavras chaves: Frenagem dinâmica; MCC excitação independente; Falta de energia.

ABSTRACT

This work aims at demonstrating that a Separate Excitation DC Machine can have its dynamic braking optimized via a significant reduction of its elapsed time.

Dynamic Braking is accomplished when a DC Motor is led to operate as DC Generator. Its kinetic Energy is almost totally transformed into Electric Energy. This energy is dissipated on a resistor bank connected to the machine armature.

The machine inductor circuit, fed by a battery set via chopper, leads to an excitation current capable of making the e.m.f. as greater as possible in the interval between the maximum and the rated speed.

Thus, much more energy can be dissipated per unity of time in such an interval. In being so, the necessary time for braking is substantially lesser.

Other variables as torque, braking current, and speed are also analyzed. It is possible to conclude that the machine and its load have not been subjected to any kind of abnormalities or even prohibitive efforts.

Key words: Dynamic Braking ; DC Motor separate excitation ; Power failure.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ANEXOS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	v
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1–Características construtivas e de funcionamento de uma máquina de corrente contínua de excitação independente	03
2.1.1–Princípios básicos de funcionamento da máquina de corrente contínua	03
2.1.2–Principais partes construtivas de uma máquina CC	04
2.1.3–Partes constituintes do estator	05
2.1.4–Partes constituintes do rotor	06
2.1.5–Principais conexões dos enrolamentos dos motores CC	07
2.1.6–Rendimento do motor CC	08
2.1.7–Valores nominais	09
2.2–Frenagem dinâmica da MCC de excitação independente	10
2.3–Histórico da frenagem	11
2.3.1–Paralisação própria pelo atrito interno nos mancais e ventilação	11
2.3.2–Frenagem mecânica	12
2.3.3–Frenagem dinâmica à auto excitação	14
2.3.4–Frenagem dinâmica a campo escalonado	15
2.3.5–Frenagem dinâmica a campo mínimo de excitação–Método Usual	16
CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO	18
3.1–Metodologia empregada	18
3.2–Premissas	20
3.2.1–Tipo de máquina de Corrente Contínua	20
3.2.2–Perdas	20
3.2.3–Efeito da temperatura nos valores ôhmicos dos resistores de frenagem	20
3.2.4–Máxima corrente de frenagem	20
3.2.5–Circuito de potência	21
3.2.6–Circuitos de controle	22
3.2.7–Inexistência de informações específicas	24
3.2.8–Bancada utilizada	25

3.3–Máquina utilizada	26
3.4–Principais parâmetros envolvidos no estudo realizado	27
3.4.1–Tempo de frenagem	27
3.4.2–Correntes de frenagem	31
3.4.3–Torque de frenagem	33
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS OBTIDOS	36
4.1–Tempos de frenagem	36
4.1.1–Método Usual	36
4.1.2–Método Proposto	37
4.2–Corrente de frenagem x tempo	38
4.2.1–Método Usual	38
4.2.2–Método Proposto	39
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	40
5.1–Continuidade na utilização do Método Usual	40
5.2–Redução significativa no tempo de frenagem	41
5.3–Baixo custo e facilidade de implantação	42
5.4–Valor máximo da corrente de frenagem	42
5.5–Momento de inércia do conjunto/Curva de magnetização da máquina	43
5.6–Valo absoluto e gradientes de torque	43
5.7–Condições inadequadas para o levantamento dos resultados	43
5.8–Alimentação do circuito de controle	44
5.9–Tabela comparativa entre os métodos Usual e Proposto	45
5.10–Proposta de estudos futuros	46
5.10.1–Frenagem dinâmica a torque constante	46
5.10.2–Frenagem dinâmica para outras configurações de máquinas CC	46
5.10.3–Frenagem dinâmica otimizada no intervalo de n_B até zero	46

CAPÍTULO 6 – ANEXOS	47
Anexo I–Comparação entre os tempos de frenagem dinâmica a campo mínimo (Método Usual) e o Método Proposto no trabalho	47
Anexo II–Comportamento do torque eletromagnético em função da velocidade da máquina para o Método Proposto	52
Anexo III–Avaliação do torque x tempo no método de frenagem a campo mínimo e no Método Proposto	54
Anexo IV–Determinação da velocidade em função do tempo no Método Usual e Proposto	58
Anexo V–Comparação entre energias cinéticas no Método Proposto	59
Anexo VI–Variação da corrente de frenagem em relação ao tempo	61
Anexo VII–Determinação de R_a e $k\phi_N$ da máquina	63
Anexo VIII–Frenagem a torque constante	66
Anexo IX–Aquecimento da máquina durante a frenagem	69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LISTA DE FIGURAS

Fig.1	Corte transversal da máquina de corrente contínua mostrando as partes constituintes principais	04
Fig.2	Esquema geral de conexão dos enrolamentos da máquina de corrente contínua	06
Fig.3	Esquema de conexão para a máquina CC de excitação independente	07
Fig.4	Curvas típicas de rendimento para um motor CC	09
Fig.5	Frenagem por atrito e ventilação	12
Fig.6	Frenagem mecânica	14
Fig.7	Frenagem à auto-excitação	15
Fig.8	Frenagem a campo escalonado	16
Fig.9	Frenagem a campo mínimo	17
Fig.10	Frenagem à fem nominal	19
Fig.11	Circuito de potência da excitação	21
Fig.12	Circuito de controle da excitação	23
Fig.13	Velocidade x Tempo – Método USUAL	29
Fig.14	Velocidade x Tempo – Método PROPOSTO	30
Fig.15	Corrente de Frenagem - Método USUAL	31
Fig.16	Corrente de Frenagem - Método PROPOSTO	32
Fig.17	Velocidade x Tempo - Método USUAL	36
Fig.18	Velocidade x Tempo - Método PROPOSTO	37
Fig.19	Corrente de frenagem x Tempo - Método USUAL	38
Fig.20	Corrente de frenagem x Tempo - Método PROPOSTO	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela comparativa entre o método USUAL e PROPOSTO	45
-----------------	---	-----------

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I	COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE FRENAGEM DINÂMICA A CAMPO MÍNIMO (MÉTODO USUAL) E O MÉTODO PROPOSTO NO TRABALHO	47
ANEXO II	COMPORTAMENTO DO TORQUE ELÉTROMAGNÉTICO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DA MÁQUINA – MÉTODO PROPOSTO	52
ANEXO III	AVALIAÇÃO DO TORQUE X TEMPO – MÉTODO USUAL E MÉTODO PROPOSTO	54
ANEXO IV	DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO - MÉTODO USUAL E MÉTODO PROPOSTO	56
ANEXO V	COMPARAÇÃO ENTRE ENERGIAS CINÉTICAS - MÉTODO PROPOSTO	59
ANEXO VI	VARIAÇÃO DA CORRENTE DE FRENAGEM EM RELAÇÃO O TEMPO - MÉTODOS USUAL E PROPOSTO	61
ANEXO VII	DETERMINAÇÃO DE $K \Phi_N$ E R_a	63
ANEXO VIII	FRENAGEM DINÂMICA A TORQUE CONSTANTE	66
ANEXO IX	SOBREAQUECIMENTO DA MÁQUINA DEVIDO À FRENAGEM	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

E_{CIN}	ENERGIA CINÉTICA DO CONJUNTO - Joules
E_{C_M}	ENERGIA CINÉTICA DO CONJUNTO À VELOCIDADE MÁXIMA - Joules
E_{C_B}	ENERGIA CINÉTICA DO CONJUNTO À VELOCIDADE BASE - Joules
E ou fem	FORÇA ELETROMOTRIZ OU CONTRA ELETROMOTRIZ GERADA - V
E_N	FORÇA ELETROMOTRIZ OU CONTRA ELETROMOTRIZ NOMINAL GERADA - V
I	CORRENTE DE ARMADURA - A
I_N	CORRENTE NOMINAL DE ARMADURA DA MÁQUINA - A
I_{EXC}	CORRENTE NOMINAL DE EXCITAÇÃO DA MÁQUINA - A
I_{FD}	CORRENTE DE FRENAGEM DINÂMICA DA MÁQUINA - A
J	MOMENTO DE INERCIA TOTAL REF. À MÁQUINA - kg.m²
$K\Phi$	FLUXO QUALQUER DE EXCITAÇÃO DA MÁQUINA - Wb ou V . s
$K\Phi_N$	FLUXO DE EXCITAÇÃO NOMINAL DA MÁQUINA - Wb ou V . s
$K\Phi_M$	FLUXO MÍNIMO DE EXCITAÇÃO NA MÁQUINA. - Wb ou V . s
K_V	RELAÇÃO ENTRE A VEL. MÁXIMA E A VEL.BASE (NOMINAL) DA MÁQUINA
\ln	LOGARITMO NEPERIANO
n	VELOCIDADE DA MÁQUINA - rpm
n_B	VELOCIDADE-BASE OU VELOCIDADE-NOMINAL DA MÁQUINA - rpm
n_M	VELOCIDADE MÁXIMA DA MÁQUINA - rpm
R_{FD}	RESISTÊNCIA DE FRENAGEM DINÂMICA - Ω
R_a	RESISTÊNCIA DE ARMADURA - Ω
M_{ELET}	TORQUE ELETROMAGNÉTICO DA MÁQUINA - N.m
M_N	TORQUE NOMINAL DA MÁQUINA - N.m
M_{AT}	TORQUE DEVIDO AO ATRITO NOS MANCAIS - N.m
M_V	TORQUE DEVIDO A VENTILAÇÃO NAS PARTES GIRANTES DA MÁQUINA - N.m
M_{ATV}	TORQUE DEVIDO AO ATRITO E VENTILAÇÃO - N.m
M_{CIN}	TORQUE DEVIDO A ENERGIA CINÉTICA ACUMULADA - N . m
T_{CM}	TEMPO TOTAL DE FRENAGEM -MÉTODO USUAL - s
T_{EM}	TEMPO TOTAL DE FRENAGEM -MÉTODO PROPOSTO - s
t	TEMPO - s
U	TENSÃO APLICADA À ARMADURA DO MOTOR - V
w	VELOCIDADE DA MÁQUINA - rad/s

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Toda máquina elétrica rotativa, quando em serviço, é levada à diversas situações de aceleração e desaceleração, em consequência das particularidades do processo onde se insere.

Em algum momento em sua operação, esse processo irá demandar algum tipo de ação frenante na mesma.

Quando isso ocorrer na presença de energia elétrica fornecida regularmente, essa ação frenante, se dará de forma bastante otimizada, através de circuitos eletrônicos bem elaborados e na grande maioria das vezes, ela acontecerá de forma regenerativa, ou seja, praticamente toda a energia cinética presente nos equipamentos, será convertida em energia elétrica e devolvida à rede.

Tal processo ocorrerá sem nenhum dano aos equipamentos, pessoas e/ou processos produtivos envolvidos, pois será devidamente monitorado e controlado.

Determinados processos industriais demandam acurados controles de velocidade e tração, como por exemplo, a laminação a frio de aços planos, indústria de fabricação de papel, laminação de alumínio, dentre outros.

Para os tipos de processos citados anteriormente, apesar do progresso tecnológico existente nos acionamentos controlados para motores de indução, as máquinas de corrente contínua de excitação independente ainda são insubstituíveis, devido ao acurado controle de torques e/ou velocidades a que se permitem.

Se por um motivo qualquer durante um determinado processo, houver a interrupção de fornecimento de energia elétrica pela Concessionária ou até mesmo por um problema interno nas instalações industriais, não há, por motivos óbvios, como se implementar uma frenagem regenerativa, já que não existe mais a presença da rede elétrica.

A solução para a paralisação do equipamento adotada nesse caso é a chamada frenagem dinâmica, onde as máquinas de corrente contínua passam agora a operar como geradores, transformando a quase totalidade da energia cinética presente, em energia elétrica, convertendo-a em energia térmica, através da circulação da corrente de frenagem dinâmica em um banco de resistores adequadamente dimensionados.

Nessa situação, a frenagem dinâmica se torna uma necessidade imperiosa, devido ao alto risco que a falta da mesma acarretaria às pessoas, equipamentos e/ou processos envolvidos.

Não é nada difícil se imaginar a situação quase catastrófica de um laminador a frio de aços planos, operando em altas velocidades no período noturno e que por um motivo qualquer, venha a sofrer uma interrupção não programada no fornecimento de energia elétrica necessária a seu funcionamento.

O impacto negativo de uma situação dessa natureza nos equipamentos envolvidos, no produto processado e na integridade física das pessoas envolvidas, justifica com sobra, qualquer investimento que se venha fazer em um sistema de frenagem dinâmica mais eficaz por falta de energia elétrica.

O objetivo principal desse trabalho é o de propor um sistema de frenagem dinâmica para máquinas de corrente contínua de excitação independente, que em caso de falta de abastecimento de energia elétrica, venha a paralisar todo o equipamento de uma forma controlada, em um tempo muito menor do que o do sistema tradicionalmente utilizado (Frenagem a campo mínimo) levando-se em consideração a segurança e integridade do produto, equipamentos e/ou pessoal envolvido.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS E DE FUNCIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO INDEPENDENTE.

A máquina de CC é um dos três tipos básicos de máquinas elétricas (Máquinas CC, máquinas síncronas e máquinas de indução) que ainda tem sido largamente utilizada em determinados tipos de indústrias, principalmente por ser capaz de permitir ajustes finos de torque e de velocidade em seu funcionamento.

Neste capítulo é feita uma recapitulação geral sobre o princípio de funcionamento e principais características desse tipo de máquina.

2.1.1 Princípios básicos de funcionamento da máquina de Corrente Contínua

Na máquina CC o campo magnético é criado por um conjunto de pólos, os quais são dispostos ao longo da periferia da parte externa fixa, chamada de estator.

Os pólos norte e sul são dispostos de forma alternada. O enrolamento presente nos pólos e que gera o campo magnético indutor ou principal e é também chamado de enrolamento de campo.

Este enrolamento é alimentado a partir de uma fonte de corrente contínua, produzindo assim um campo magnético.

Os condutores em que a corrente solicitada pela carga circula, são espiras, as quais são conectadas umas às outras de forma a formarem um enrolamento fechado.

Este enrolamento está montado sobre uma estrutura cilíndrica que gira, por esse motivo chamado de rotor. Este enrolamento é chamado de enrolamento da armadura, ou ainda de induzido. Assim, a máquina CC constitui-se de duas partes fundamentais:

- **Estator:** Onde o enrolamento de campo é alojado;
- **Rotor:** Onde o enrolamento induzido é alojado.

2.1.2 – Principais partes construtivas de uma máquina CC

A seguir é feita uma breve descrição das principais partes construtivas de uma máquina CC, as quais são mostradas esquematicamente na Figura 1.

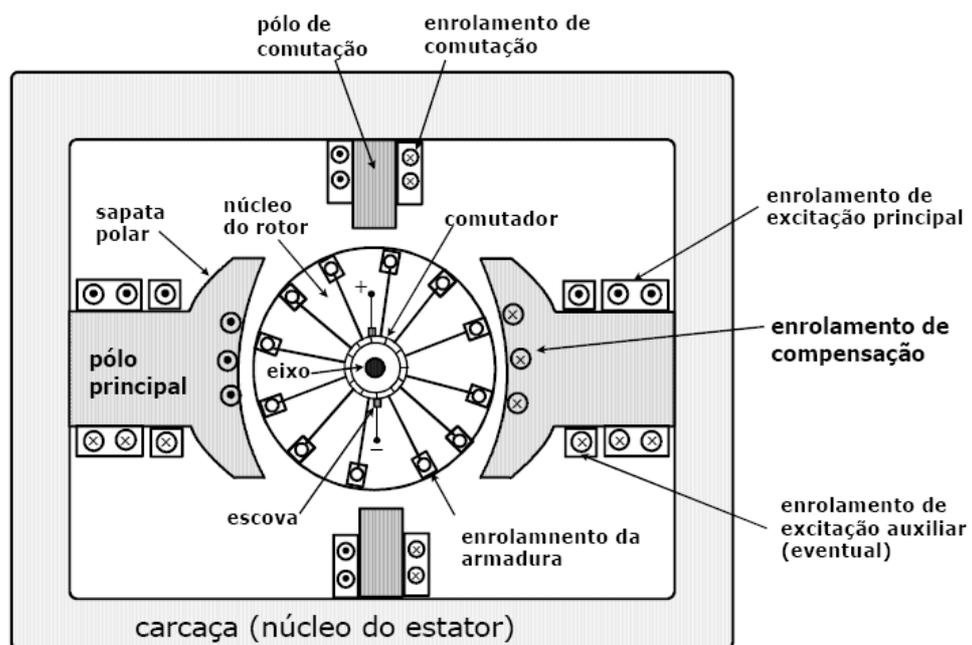


Figura 1 - Corte transversal da máquina de corrente contínua mostrando as partes constituintes principais.

2.1.3 – Partes constituintes do estator

- **Carcaça:** É a estrutura que suporta todas as demais partes. Também tem por função conduzir o fluxo magnético de um pólo ao outro.
- **Pólos de excitação principal:** Constitui um núcleo magnético formado por um conjunto de chapas laminadas. Têm por função produzir o fluxo magnético. As suas extremidades são mais largas e constituem as sapatas polares.
- **Enrolamento principal de campo:** O enrolamento principal de campo é bobinado sobre o pólo de excitação principal. É alimentado em corrente contínua e estabelece assim um campo magnético.
- **Enrolamento auxiliar de campo:** Igualmente alojado sobre o pólo principal. À semelhança do enrolamento de compensação, tem por função compensar a reação da armadura reforçando o campo principal.
- **Pólos de comutação:** São alojados na região entre os pólos e constituídos por um conjunto de chapas laminadas justapostas.
- **Enrolamentos de comutação:** São percorridos pela corrente da armadura, sendo ligados em série com este. Têm por função facilitar a comutação e evitar o aparecimento de centelhamento no comutador.
- **Enrolamentos de compensação:** São alojados em ranhuras na superfície dos pólos excitação (sapatas polares). Têm por finalidade eliminar os efeitos do campo da armadura e melhorar a comutação. É mais comum em máquina de alta potência, devido ao custo adicional de fabricação e dos materiais.
- **Conjunto porta-escovas e escovas:** O porta-escovas é a estrutura mecânica que aloja as escovas. É montado de tal forma que possa ser girado para um perfeito ajuste da comutação da máquina. As escovas são constituídas de material condutor e deslizam sobre o comutador quando este gira; elas são pressionadas por molas contra a superfície do comutador. As escovas também conectam o circuito externo da máquina com o enrolamento da armadura.

2.1.4 – Partes constituintes do rotor

- **Núcleo magnético:** É constituído de um pacote de chapas de aço magnético laminadas, com ranhuras axiais para alojar o enrolamento da armadura.
- **Enrolamento da armadura:** É composto de um grande número de espiras em série ligadas ao comutador. O giro da armadura faz com que seja induzida uma tensão neste enrolamento.
- **Comutador:** É constituído de lâminas de cobre (lamelas) isoladas uma das outras por meio de lâminas de mica (material isolante). Tem por função transformar a tensão alternada induzida numa tensão contínua.
- **Eixo:** É o elemento que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor a uma carga a ele acoplada.

A Figura 2 mostra um esquema dos principais enrolamentos das máquinas CC usuais.

Deve-se notar que apenas os enrolamentos da armadura e de campo são obrigatórios, os demais dependem das características que a máquina deve apresentar para a aplicação em questão.

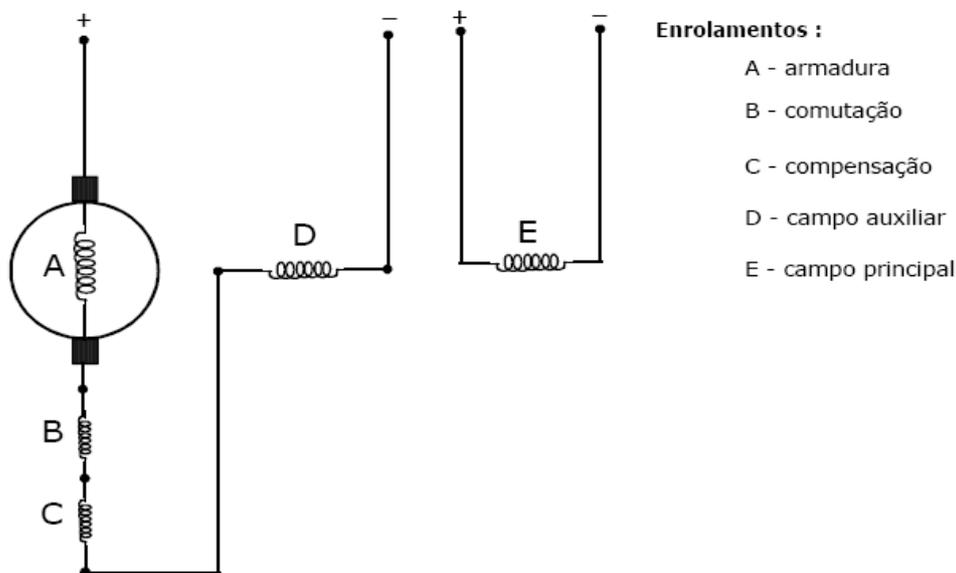


Figura 2 - Esquema geral de conexão dos enrolamentos da máquina de corrente contínua.

2.1.5 – Principais conexões dos enrolamentos dos motores CC

As características de potência, velocidade e torque da máquina CC estão intimamente ligadas à forma de conexão dos enrolamentos de campo e armadura. Assim, para cada aplicação específica deve-se conectar a máquina de forma adequada.

A máquina de CC, objeto de estudo nesse trabalho, é a de excitação independente, cuja representação esquemática simplificada pode ser vista na Fig. 3.

Neste tipo de conexão tanto o enrolamento da armadura como o do estator são ligados a fontes de tensões independentes uma da outra.

A Figura 3 ilustra este caso, sendo que somente os enrolamentos da armadura e de excitação são mostrados. Neste tipo de conexão a velocidade da máquina pode ser ajustada tanto pelo ajuste da tensão da armadura como pela tensão de campo.

A característica torque versus velocidade é igualmente mostrada.

Este tipo de conexão ainda é amplamente utilizada no meio industrial, onde se requer controles precisos de velocidades com torques variáveis, como por exemplo no acionamento de bobinadeiras de laminadores a frio de aços planos.

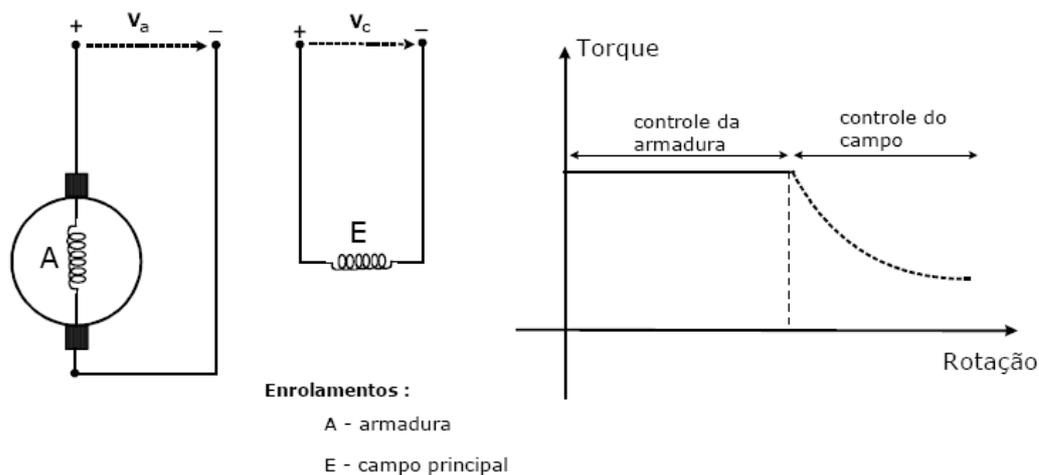


Figura 3 - Esquema de conexão para a máquina CC de excitação independente.

2.1.6 – Rendimento do motor CC

O rendimento é definido como a relação em percentual entre a potência útil convertida no eixo (potência mecânica) pela potência absorvida pela máquina (potência elétrica de entrada).

A diferença entre ambas as quantidades se constituem nas perdas que ocorrem na máquina.

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} \cdot 100 = \frac{(P_e - P_p)}{P_e} \cdot 100$$

η - Rendimento em percentual

P_m - Potência mecânica (útil) no eixo [W]

P_e - Potência elétrica de entrada [W]

P_p - Potência de perdas [W]

As perdas de potências que se verificam nas máquinas elétricas são de diversas origens e podem ser resumidamente classificadas por:

- **Perdas mecânicas:** Devida aos atritos mecânicos e ventilação nas partes girantes.
- **Perdas joule:** É o calor gerado nos diversos enrolamentos devido à resistência elétrica dos mesmos.
- **Perdas no ferro:** Perdas por histerese e perdas por correntes parasitas (Foucault).

Como as perdas dependem da condição de carga e de rotação da máquina, elas não são constantes durante a operação da máquina.

Desta forma o rendimento não se mantém igualmente constante.

A Figura 4 ilustra uma curva típica do rendimento de um motor CC em função da carga no eixo e em função da rotação. Pode-se verificar que o rendimento atinge um máximo em torno dos valores nominais de projeto da máquina.

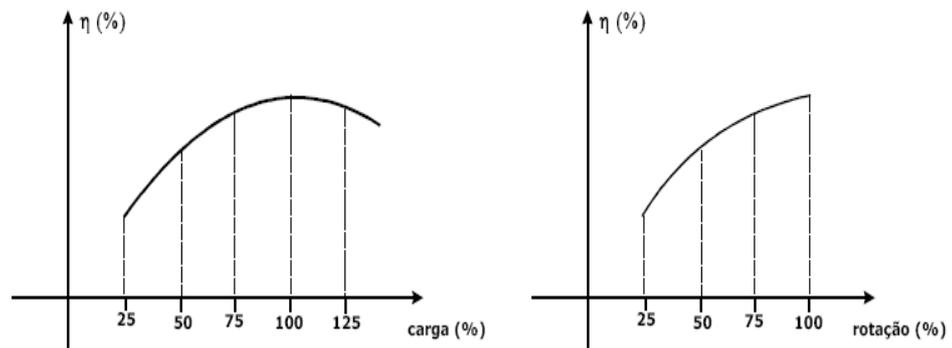


Figura 4 - Curvas típicas de rendimento para um motor CC

2.1.7 – Valores nominais

São os parâmetros que definem os valores permitidos de operação da máquina sem que a mesma sofra prejuízos permanentes.

Eles são definidos pelo fabricante, podendo também ser previamente especificados pelo usuário. Todas as máquinas são munidas de uma placa de identificação, onde os dados nominais são gravados.

Os principais valores nominais da máquina CC são as seguintes:

- **Potência nominal:** É a máxima potência extraível da máquina em operação contínua. A máquina não deve operar por longos períodos com potência maior que esta.
- **Rotação nominal:** É a rotação de trabalho da máquina. Caso a máquina se destina a trabalhar com velocidade variável, existe uma velocidade mínima e máxima.
- **Tensão nominal de armadura:** Define a tensão de operação normal da máquina, não sendo possível operar com tensão superior a esta. Operação com tensão reduzida é possível, desde que a potência nominal seja reduzida na mesma proporção.
- **Corrente nominal de armadura:** Define a corrente de operação normal da máquina, não sendo possível operar por longos períodos com corrente superior a esta.
- **Tensão nominal de campo:** É a tensão de alimentação do enrolamento de campo.
- **Corrente nominal de campo:** É a corrente de alimentação do enrolamento de campo. O campo não deve trabalhar por longos períodos com corrente maior que esta.

2.2 – FRENAGEM DINÂMICA DA MCC DE EXCITAÇÃO INDEPENDENTE

A máquina de corrente contínua de excitação independente se caracteriza por ter duas fontes de alimentações independentes, ou seja, uma para o circuito de excitação (Campo) e outra para o circuito de armadura.

Se quando em movimento, houver uma falta de suprimento de energia elétrica, devido a um problema interno ou da Concessionária, o circuito da armadura continuará girando devido à energia cinética acumulada.

Se nenhuma providência for tomada para cessar esse movimento, isso só virá a ocorrer quando toda essa energia for dissipada pelos atritos existentes nos mancais e por sua própria ventilação.

Por outro lado, se na ocorrência de uma falta de energia elétrica, o circuito de excitação for convenientemente alimentado através de uma fonte independente (Baterias), a máquina então tornar-se-á um gerador de CC a vazio, fazendo surgir nos terminais do circuito de armadura, uma força eletromotriz induzida.

Assim, se ao circuito da armadura, for conectado um banco de resistores devidamente dimensionado, a máquina então passa a dissipar quase toda a energia cinética acumulada em energia térmica, através da circulação de corrente elétrica pelos referidos resistores.

Isso é feito com o objetivo de se reduzir ao mínimo, o tempo necessário para a paralisação da máquina, tendo em vista que, devido à ausência de fornecimento regular de energia elétrica, já não mais existe nenhuma ação de controle sobre a mesma.

2.3 – HISTÓRICO DA FRENAGEM

Pode se listar a evolução histórica dos sistemas de frenagem das máquinas de corrente contínua, como sendo:

2.3.1 –Paralisação própria pelo atrito interno nos mancais e ventilação.

2.3.2 –Frenagem mecânica.

2.3.3 –Frenagem dinâmica à auto-excitação.

2.3.4 –Frenagem dinâmica a campo escalonado.

2.3.5 –Frenagem dinâmica a campo mínimo.

2.3.1 – Paralisação própria pelo atrito interno nos mancais e ventilação

Com o advento da utilização de máquinas de corrente contínua no meio industrial, inicialmente não houve nenhuma preocupação em se prover uma forma de paralisação das máquinas, em caso de falta de energia.

Assim sendo, quando o fenômeno ocorria, as máquinas só iriam cessar seu movimento, quando toda a energia cinética acumulada fosse dissipada sob forma de calor através dos atritos dos próprios mancais e dos mancais do equipamento acionado e em muito menor quantidade, pela ventilação da máquina.

Evidentemente, isso desencadeou uma série de transtornos e prejuízos, pois o tempo necessário à paralisação era bastante extenso, tendo em vista as perdas por atrito e ventilação tanto nas máquinas elétricas quanto nos equipamentos acionados, serem praticamente inexpressivas, como efetivamente deveriam ser, em função da necessidade de um bom rendimento global do sistema.

Os projetistas do sistema elétrico e mecânico foram levados então a pensar numa forma de solucionar o problema.

Na maioria das situações, o fator tempo era o principal objeto de análise, ou seja, todo o maquinário acionado deveria ser paralisado no menor tempo possível, com o objetivo de se minimizar os prejuízos decorrentes de um acionamento sem controle.

Uma primeira alternativa imaginada então, foi a de se instalar um sistema de frenagem mecânica no conjunto.

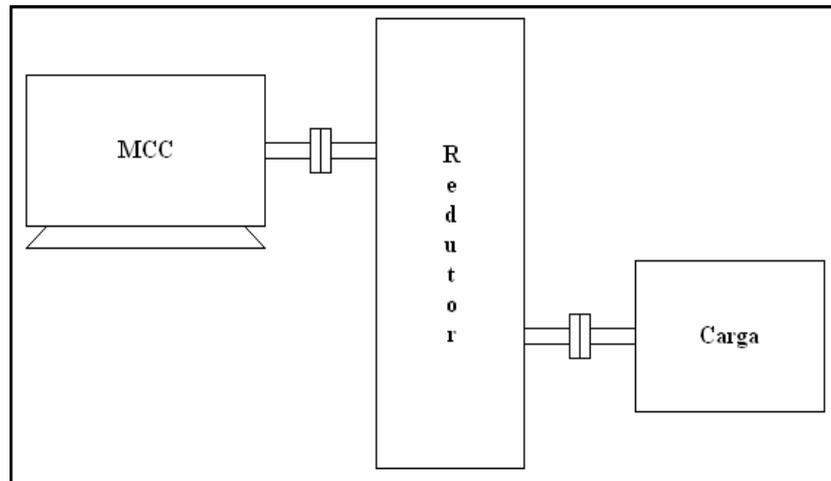


Figura 5 - Frenagem por atrito e ventilação

2.3.2 – Frenagem mecânica

Como é de se esperar, a frenagem mecânica nada mais é que a ação de um dispositivo mecânico, em um determinado ponto do equipamento, onde através do atrito, se busca a transformação da energia cinética acumulada, em energia térmica, dissipando-a sob forma de calor.

Esses dispositivos, por questões de otimização de dimensionamento, são instalados preferencialmente no eixo do motor onde na maioria das situações está presente o menor torque de todo o equipamento acionado.

Para isso, é instalado um disco ou tambor de freio nesse eixo e sapatas são pressionadas contra ele, nos dois lados, para desencadear a ação frenante por atrito.

As sapatas são mantidas afastadas do disco, por meio de um eletroímã, que vence a ação contrária de molas.

Na ocorrência de uma falta de energia, a força devido ao eletroímã deixa de existir e então as molas automaticamente pressionam as sapatas de encontro ao disco, promovendo a ação frenante.

Existe um compromisso muito forte, nesse sistema, com relação ao torque de frenagem aplicado pelas sapatas, pois, se o mesmo não for devidamente dimensionado, poderá acarretar uma torção do eixo da máquina elétrica e/ou do equipamento acionado danificando-os por deformação plástica.

Um outro agravante desse processo é a forma como esse torque é aplicado, pois ele ocorre na forma de um "degrau".

Isso do ponto de vista mecânico, requer uma atenção especial em seu dimensionamento.

Outro inconveniente seria a geração intensa de calor nos locais de atrito, principalmente nas cargas com altas energias cinéticas acumuladas.

Esse tipo de problema normalmente era contornado, projetando-se um disco de diâmetro maior, para que fosse possível uma maior área de dissipação térmica.

Tal solução demandava um maior espaço físico para montagem, um maior custo na aquisição e instalação, um rigoroso controle em seu balanceamento, para se evitar vibrações nocivas à máquina.

Em contrapartida, o momento de inércia do conjunto sofria um acréscimo devido ao efeito volante do mesmo.

Atualmente esse tipo de freio é usado, mas com a função de freio de estacionamento, ou seja, com o propósito de manter o equipamento paralisado e não com a função de paralisá-lo.

Evidentemente, que para essa nova função, suas dimensões se tornaram bastante modestas em relação ao caso citado anteriormente.

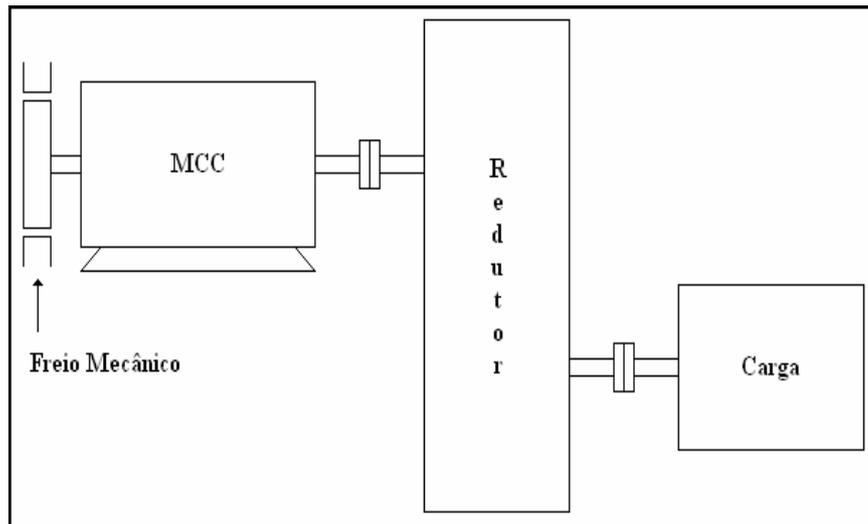


Figura 6 - Frenagem mecânica.

2.3.3 – Frenagem dinâmica à auto excitação

Esse método de frenagem consiste em se conectar o circuito de excitação, em paralelo com o circuito da armadura e fazer com que o magnetismo remanescente presente nos pólos de excitação, iniciem um processo de amortecimento da máquina, transformando-a em um gerador CC derivação.

Como principal vantagem, pode-se falar da não necessidade de uma fonte externa de alimentação (baterias) para a alimentação do circuito de excitação da máquina, o que resulta em uma diminuição nos custos de aquisição e implantação.

Em contrapartida, é necessário existir um circuito de controle que discrimine qual é o sentido da força contra-eletromotriz presente na hora da queda de energia, pois o campo produzido pela corrente que irá circular no enrolamento de excitação, terá que reforçá-lo, sob pena da máquina zerá-lo, ou seja, não amortecer, o que significa ausência de força eletromotriz induzida e conseqüentemente, ausência da frenagem dinâmica.

Como o circuito do campo é altamente indutivo (Constante de tempo alta) e a tensão inicial provocada pelo remanescente é baixa, o circuito levará um tempo precioso até atingir seu amortecimento, o que pode comprometer a eficiência da frenagem, sob determinadas condições.

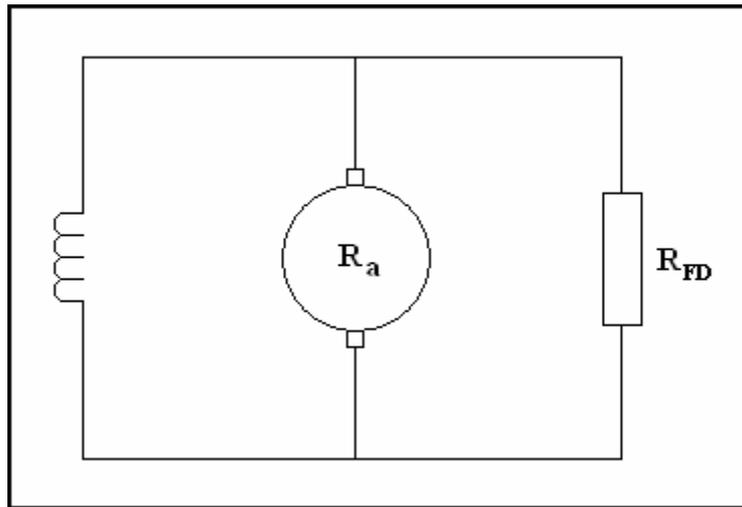


Figura 7 – Frenagem à auto-excitação

2.3.4 – Frenagem dinâmica a campo escalonado

Esse método consiste em se tentar manter o fluxo de excitação em um valor tal que multiplicado pela rotação atual da máquina, faça com que o circuito da armadura tente atingir uma força eletromotriz gerada igual ou bem próxima à nominal.

Isso é feito por etapas, curtocircuitando-se resistores previamente dimensionados e inseridos em série com o enrolamento de excitação.

Com essa prática, consegue-se uma melhora na eficiência de frenagem, tendo em vista que a mesma quantidade de energia cinética poderá ser dissipada em um menor espaço de tempo.

Como desvantagem é necessário um circuito de controle e de comando, que através do monitoramento da velocidade da máquina, faça com que os contatores atuem no momento exato.

A rigor, se trata de um "reostato" no circuito de excitação, com variações em "degraus".

Para que o método em questão atingisse a plenitude de sua eficiência, o número de contatores necessários tenderia a infinito, o que definitivamente, tornaria inviável o projeto.

Ver-se-á que o método proposto nesse trabalho adota a mesma filosofia, porém o controle de excitação é feito a todo o momento e eletronicamente.

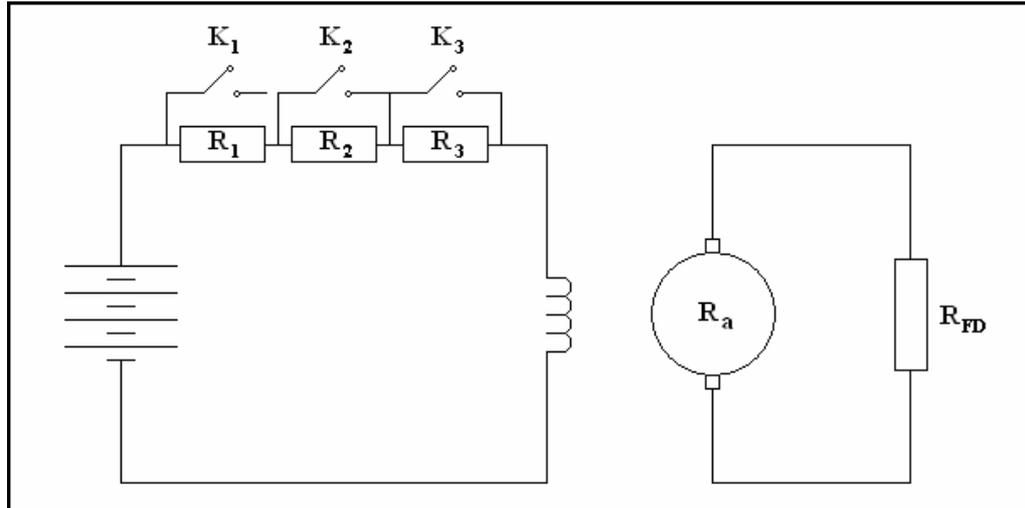


Figura. 8 - Frenagem a campo escalonado.

2.3.5 – Frenagem dinâmica à campo mínimo de excitação

(Método Usual)

Esse método parte do pressuposto que na hora da queda de energia, a máquina possa estar em sua pior condição de frenagem, ou seja, girando à máxima velocidade possível.

Como a força eletromotriz gerada (E) é o resultado do produto do fluxo de excitação $[k\phi]$ pela velocidade angular da máquina (n) e que para segurança da máquina, a mesma nunca deverá ultrapassar a tensão nominal de armadura (U_N), o projetista garante que em qualquer situação de velocidade isso sempre irá ocorrer, ou seja, nunca no decorrer da frenagem ter-se-á uma tensão gerada, maior que a tensão nominal da armadura ($E \leq U_N$), pois o campo sempre estará com o menor valor de fluxo possível.

Sabendo-se que a energia elétrica dissipada no banco de resistores de frenagem é proporcional ao quadrado dessa tensão e essa por sua vez, é diretamente proporcional à velocidade, pode se concluir que a eficiência de frenagem caia com o quadrado da rotação da máquina levando todo o conjunto a um tempo de frenagem relativamente longo.

Doravante iremos nos referir a esse método como método USUAL.

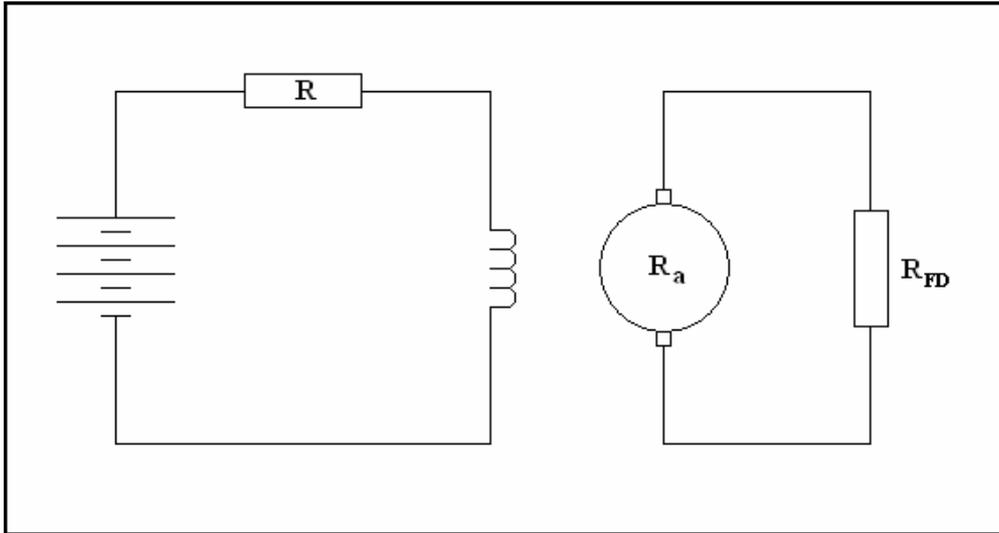


Figura 9 – Frenagem a campo mínimo – MÉTODO USUAL

Capítulo 3

DESENVOLVIMENTO

3.1 – METODOLOGIA EMPREGADA

A metodologia utilizada foi a de se realizar a frenagem dinâmica, mantendo-se a fem induzida igual à fem nominal, no intervalo de velocidade máxima até velocidade base, da máquina.

Isso é obtido, fazendo-se o controle da corrente de excitação da máquina, através de um conversor CC/CC (Chopper), intercalado entre uma fonte DC previamente dimensionada (Substituta do banco de baterias) e o enrolamento de excitação.

A rigor, a fem induzida no circuito de armadura é que deveria ser controlada, porém, devido a existência da resistência do enrolamento de armadura, a monitorização e controle da fem teriam que ser indiretas, pois a tensão disponível nos terminais da máquina seria a diferença entre a mesma e a queda na referida resistência.

Optou-se então por um controle indireto da fem, ou seja, passou-se a controlar a corrente de frenagem que nada mais é que o resultado da divisão dessa fem pela soma da resistência de armadura com a resistência do banco de resistores utilizados para a frenagem.

Como essas resistências praticamente não sofrem variações durante a frenagem, então, nessas circunstâncias, a corrente de frenagem pode ser considerada uma "imagem" fiel da fem gerada na máquina, ou seja, existe uma proporcionalidade direta entre ambas.

Assim, resta ao circuito de controle, manter a corrente de frenagem constante no intervalo considerado e igual ao quociente da fem nominal da máquina pela soma da resistência de armadura com a resistência do banco de resistores,

Adotaremos, para essa corrente, o valor de uma vez e meia a corrente nominal da máquina. (1 –Siemens- www.sea.siemens.com/step/templates/lesson.mason?dcd:4:4:4)

Quanto à corrente de excitação, o controle deixará de intervir em seu crescimento, quando a mesma atingir seu valor nominal, ou seja, quando a máquina atingir sua velocidade-base, daí a razão do sistema agir no intervalo citado. (Velocidade máxima até velocidade-base).

Doravante iremos nos referir a esse método como método PROPOSTO.

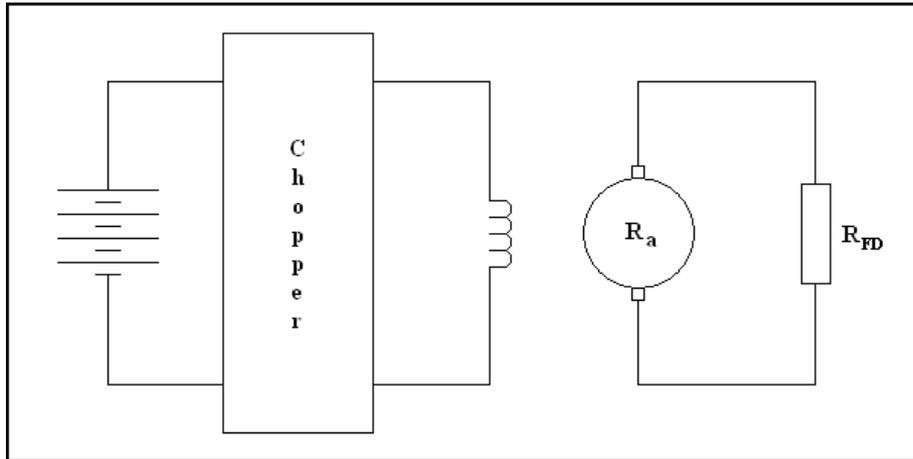


Figura 10 - Frenagem à fem nominal – MÉTODO PROPOSTO

3.2 – PREMISSAS

3.2.1 – Tipo de máquina de Corrente Contínua

Esse trabalho foi desenvolvido para máquinas de corrente contínua para uso industrial, com excitação independente e com pólos de comutação e compensação.

3.2.2 – Perdas

Tendo em vista o alto rendimento das máquinas de corrente contínuas industriais e as consideráveis inércias envolvidas, o método proposto não levará em consideração as perdas por atrito, ventilação, histereses e Foucault tendo em vista suas mínimas e, portanto, inexpressivas contribuições no processo de frenagem.

3.2.3 – Efeito da temperatura nos valores ôhmicos dos resistores de frenagem

Os resistores utilizados nos bancos de frenagem dinâmica são dimensionados e montados em uma disposição tal que o efeito da temperatura na variação de seus valores ôhmicos seja desprezível.

No desenvolvimento prático desse trabalho, os resistores utilizados não têm essa característica, ou sejam, sofrem variações em seus valores durante a frenagem.

3.2.4 – Máxima corrente de frenagem

A máxima corrente de frenagem adotada será de 1,5 vezes a corrente nominal da máquina. (1 –Siemens- www.sea.siemens.com/step/templates/lesson.mason?dcd:4:4:4)

3.2.5 – Circuito de potência

Como se vê pela Fig. 11, o circuito de potência é bastante simples, pois trata-se de um conversor CC/CC (Chopper), alimentado por uma tensão DC fixa, que em função da relação entre os tempos que o IGBT fica ligado (t_{ON}) e o tempo em que fica desligado (t_{OFF}), provoca uma variação no valor médio da tensão DC de saída, que por sua vez alimenta o enrolamento de excitação da máquina.

Como consequência, a corrente de excitação (I_{EXC}) irá variar, provocando uma variação no fluxo indutor da máquina ($K\Phi$).

Quando o IGBT está cortado (t_{OFF}), o diodo free wheeling se encarrega de promover a descarga da energia armazenada no indutor.

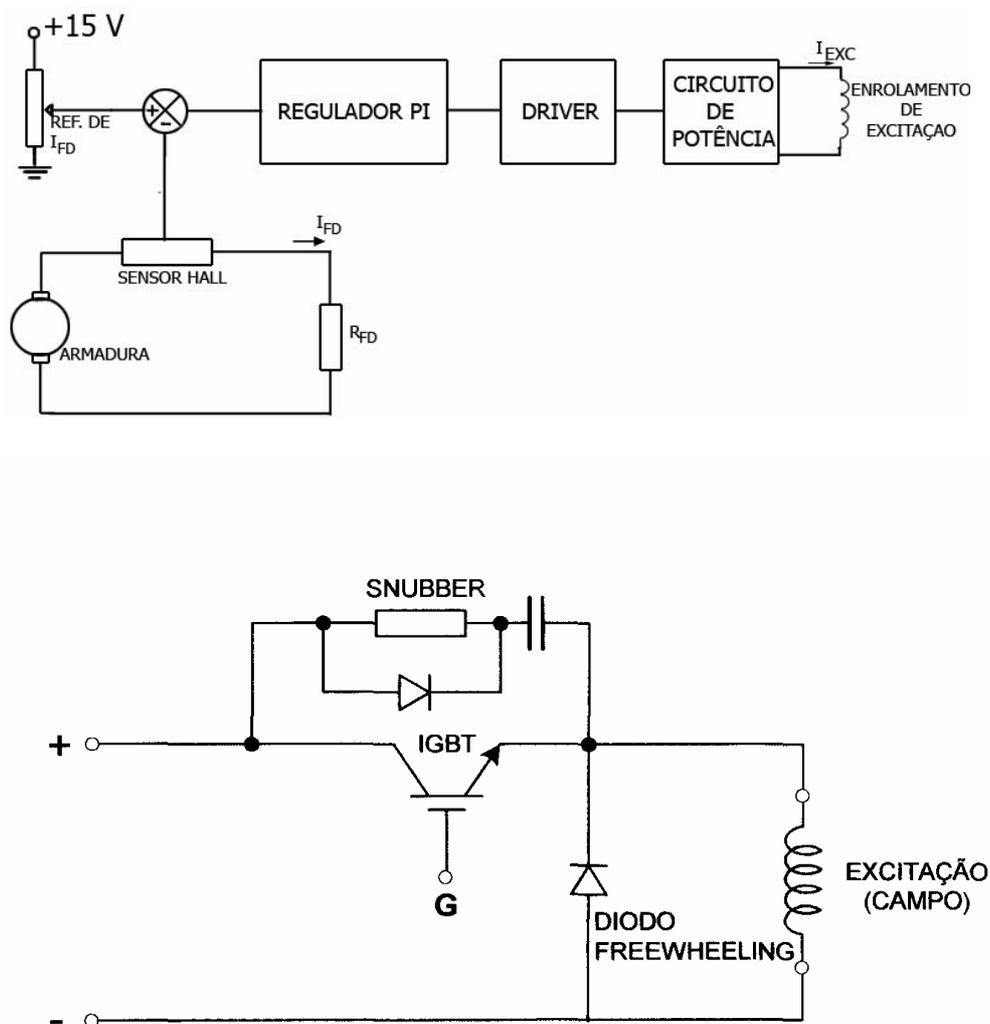


Figura 11 - Circuito de potência da excitação

3.2.6 – Circuitos de controle

O circuito de controle, (Fig. 12), tem como principal objetivo, manter constante a fem em um valor igual ao nominal (E_N), no intervalo compreendido entre a velocidade máxima (n_M) e a velocidade base (n_B) da máquina.

Isso é conseguido, através do monitoramento de sua corrente de frenagem (I_{FD}), que nada mais é que o quociente da fem citada (E_N) pela resistência total de frenagem ($R_a + R_{FD}$).

Esse monitoramento é feito por um sensor Hall de corrente.

Como a fem é o resultado do produto do fluxo indutor ($K\Phi$) pela velocidade da máquina (n), a variável a ser atuada será pois a corrente de excitação da máquina (I_{EXC}). A corrente de excitação (I_{EXC}) também é monitorada através de outro sensor Hall de corrente.

O circuito de controle atua então, variando essa corrente (I_{EXC}), para provocar a variação do fluxo indutor da máquina ($K\Phi$) e com isso manter a corrente de frenagem (I_{FD}) constante, no intervalo considerado.

Quando a máquina atingir sua velocidade-base, o circuito não mais permitirá a elevação da corrente de excitação, pois a mesma já terá atingido seu valor nominal.

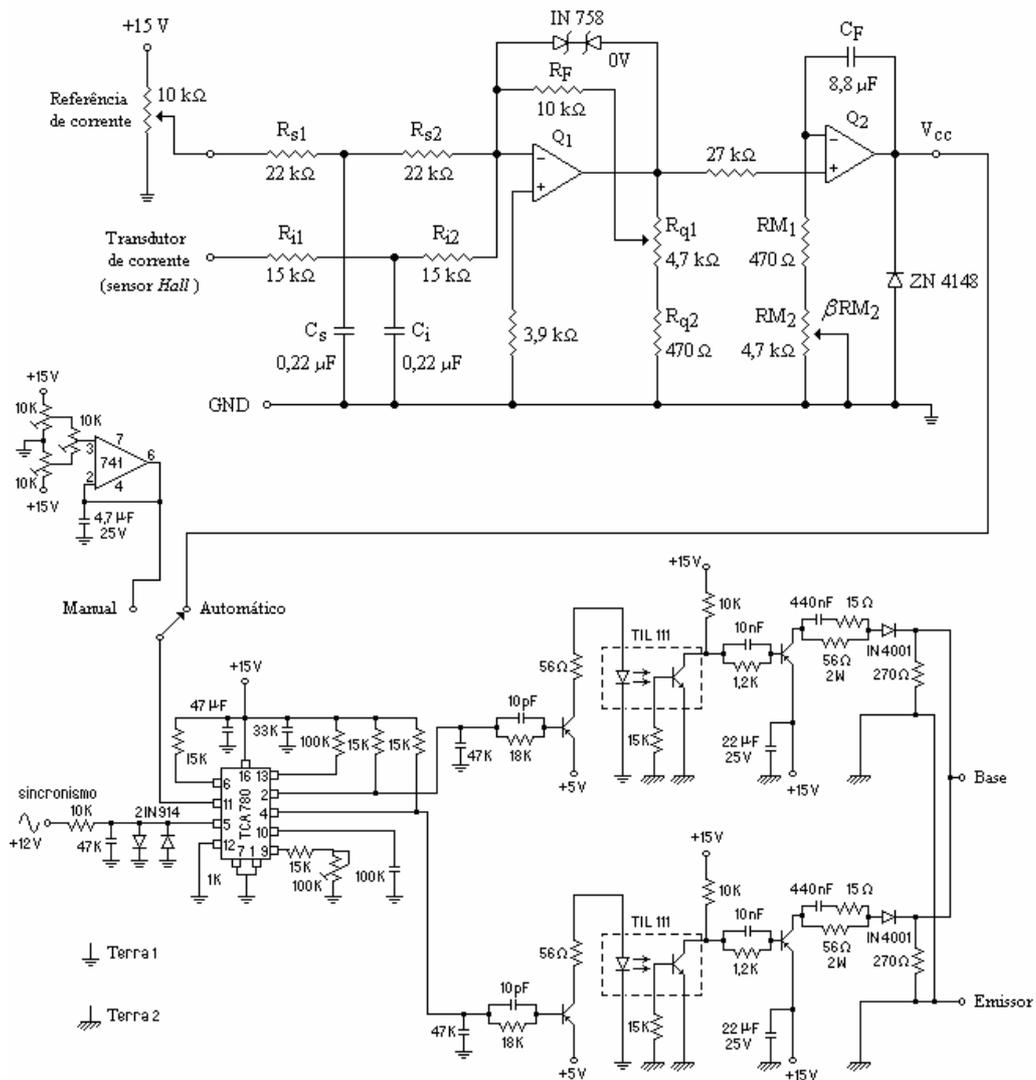
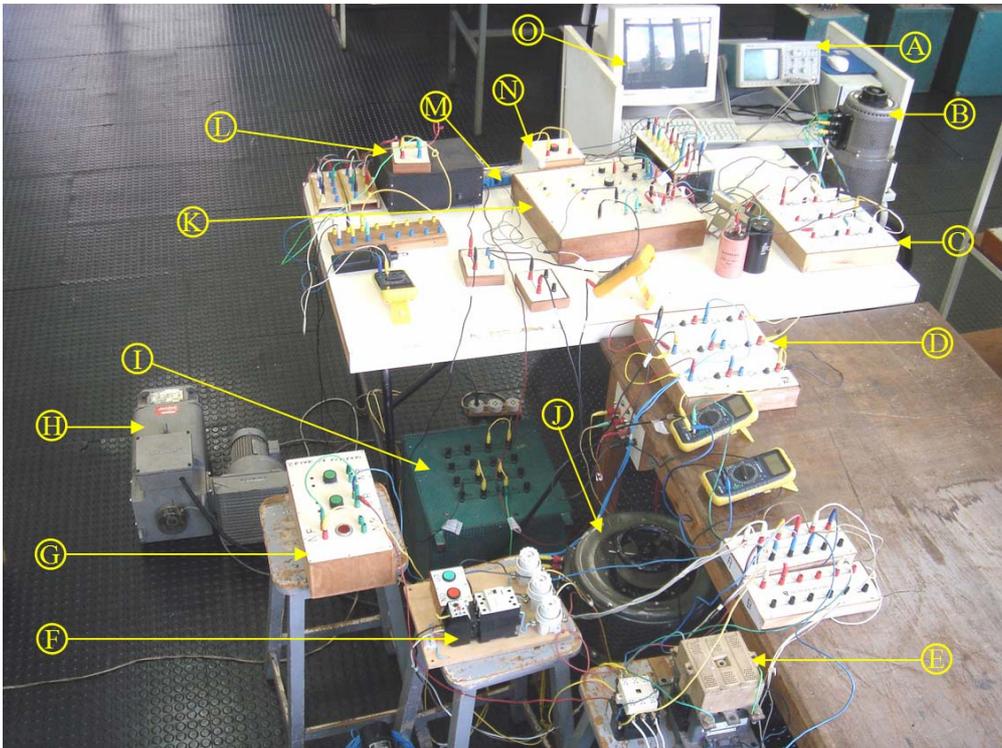


Figura 12 - Circuito de controle da excitação.

3.2.7 – Inexistência de informações específicas

Não foi possível localizar nenhum material relativo a frenagem dinâmica à máxima fem, por isso a revisão bibliográfica se limita única e exclusivamente à teoria acadêmica sobre as partes construtivas e características de funcionamento de motores de Corrente Contínua.

3.2.8 – BANCADA UTILIZADA



A – Osciloscópio digital

B – Variador de tensão para o circuito de excitação – Entrada 220 V – Saída 0 a 240 V

C – Ponte retificadora trifásica a seis diodos para circuito de excitação.

D – Ponte retificadora trifásica a seis diodos para circuito da armadura.

E – Contatores "P" e "G"

F – Contator de alimentação do motor de ventilação da máquina de corrente contínua.

G – Caixa de comando para os contatores "P" e "G"

H - Máquina de corrente contínua.

I - Banco de resistores de frenagem dinâmica.

J - Variador de tensão para o circuito de armadura – Entrada 220 V – Saída 0 a 240 V

K – Conversor CC/CC - Chopper

L - Fonte DC estabilizada de +15 / 0 / -15 V.

M – Sensores Hall para corrente de excitação e de frenagem dinâmica.

N – Caixa de comando para início de frenagem dinâmica

O - Microcomputador para aquisição dos gráficos obtidos no osciloscópio.

3.3 – MÁQUINA UTILIZADA

Todo o trabalho foi desenvolvido em uma máquina com os seguintes dados de placa:

FABRICANTE : SIEMENS

TIPO : 1GG5114 – OWE 44

Nº : 32935

IP : 23

CLASSE DE ISOLAMENTO

POLO PRINCIPAL : F

INTERPOLOS : F

ROTOR : F

NBR 5116

REG

V	A	RPM	kW
59.....380	25,0	50.....1850	0,2.....7,6
380	25,0	1850.....5100	7,6
380	25,0.....19,7	5100.....6000	7,6.....6,0

EXC : 310 [V]50 V

0,9 [A]0,15 A

Peso : 0,98 t

3.4 – PRINCIPAIS PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO ESTUDO REALIZADO

3.4.1 – Tempo de frenagem

Ver Anexo I.

Pelo método USUAL, a previsão teórica do tempo de frenagem T_{CM} , é dada por :

$$T_{CM} = \frac{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot \ln n_M}{(k\phi_N)^2 \left(\frac{n_B}{n_M}\right)^2} \quad \text{s}$$

Pelo método PROPOSTO:

$$T_{EM} = \frac{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}{(k\phi_N)^2} \cdot \left[\frac{n_M^2 - n_B^2}{2n_B^2} + \ln n_B \right] \quad \text{s}$$

Ao se estabelecer uma comparação entre os dois tempos, tem-se :

$$\frac{T_{CM}}{T_{EM}} = \frac{\frac{(2\pi)^2 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot J \cdot \ln n_M}{(k\phi_N)^2 \cdot \left(\frac{n_B}{n_M}\right)^2}}{\frac{(2\pi)^2 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot J \cdot \left[\frac{(n_M^2 - n_B^2)}{2n_B^2} + \ln n_B \right]}{(k\phi_N)^2}}$$

Expressão esta que pode ser desenvolvida e simplificada, obtendo-se :

$$\frac{T_{CM}}{T_{EM}} = \frac{\left(\frac{n_M}{n_B}\right)^2 \cdot \ln n_M^2}{\left(\frac{n_M}{n_B}\right)^2 - 1 + \ln n_B^2}$$

Representando-se a relação entre $\frac{n_M}{n_B}$ por um índice k_V , tem-se :

$$k_V = \frac{n_M}{n_B} \quad \therefore \quad n_M^2 = k_V^2 \cdot n_B^2$$

$$\frac{T_{CM}}{T_{EM}} = \frac{k_V^2 (\ln k_V^2 + \ln n_B^2)}{k_V^2 - 1 + \ln n_B^2}$$

Nas máquinas industriais, o índice K_V normalmente situa-se entre 2 e 4, ou seja,

$$2 \leq k_V \leq 4$$

Através de uma rápida análise matemática, pode-se concluir que, para uma mesma n_B quanto maior for K_V , mais significativa é a diferença entre T_{CM} e T_{EM} .

Por exemplo, suponha-se uma máquina com velocidade base de 900 rpm

Para $K_V = 2$ $T_{CM} / T_{EM} = 3,61$

Para $K_V = 3$ $T_{CM} / T_{EM} = 6,58$

Para $K_V = 4$ $T_{CM} / T_{EM} = 9,16$

Uma análise de validação da fórmula a ser ponderada é a seguinte:

Suponha-se que a máquina não trabalhe com o campo (Excitação) enfraquecido.

Nessas condições, sua velocidade "máxima" é a própria velocidade-base, ou seja

$$n_M = n_B, \text{ portanto } K_V = 1.$$

Ao se substituir esse valor na fórmula, conclui-se que $T_{CM} = T_{EM}$

Resultado totalmente previsível, tendo em vista que em qualquer um dos métodos, (USUAL OU PROPOSTO), a excitação a ser utilizada durante toda a frenagem é a própria excitação nominal da máquina permanecendo nesse patamar do início ao término da frenagem.

A seguir serão apresentados os gráficos da variação da velocidade em relação ao tempo, o qual possibilita a determinação do tempo de frenagem para o método Usual e o método Proposto, respectivamente nas figuras 13 e 14.

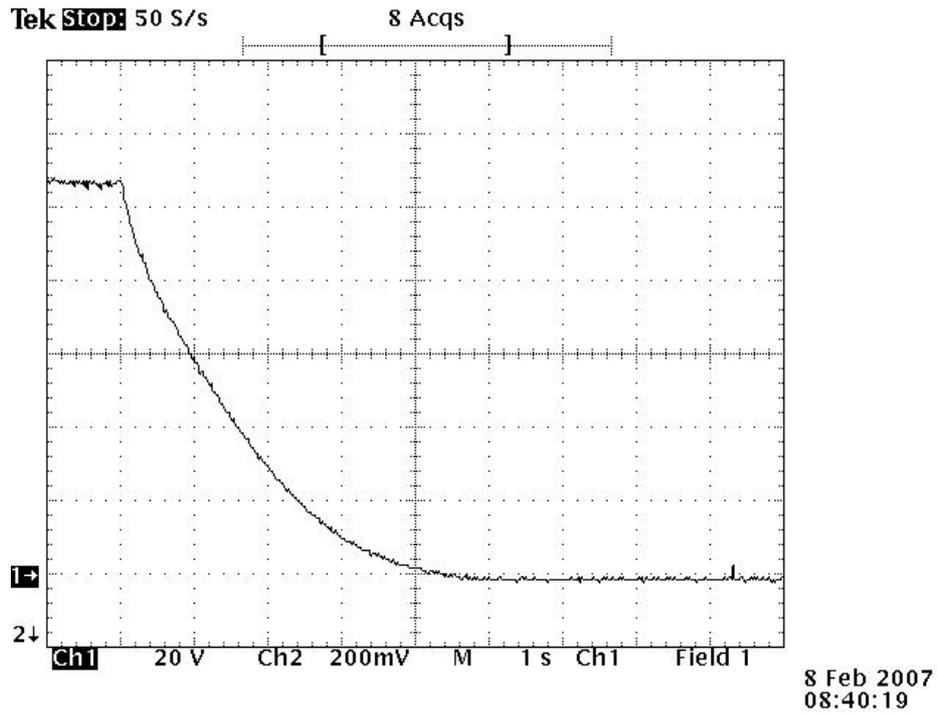


Figura 13 – Velocidade x Tempo – Método USUAL.

ESCALAS :

Velocidade (Ch 1) - 563,95 rpm/divisão - $n \cong 5.921$ rpm

Tempo (Horizontal) - 0,2 s/divisão - $t \cong 5,6$ s

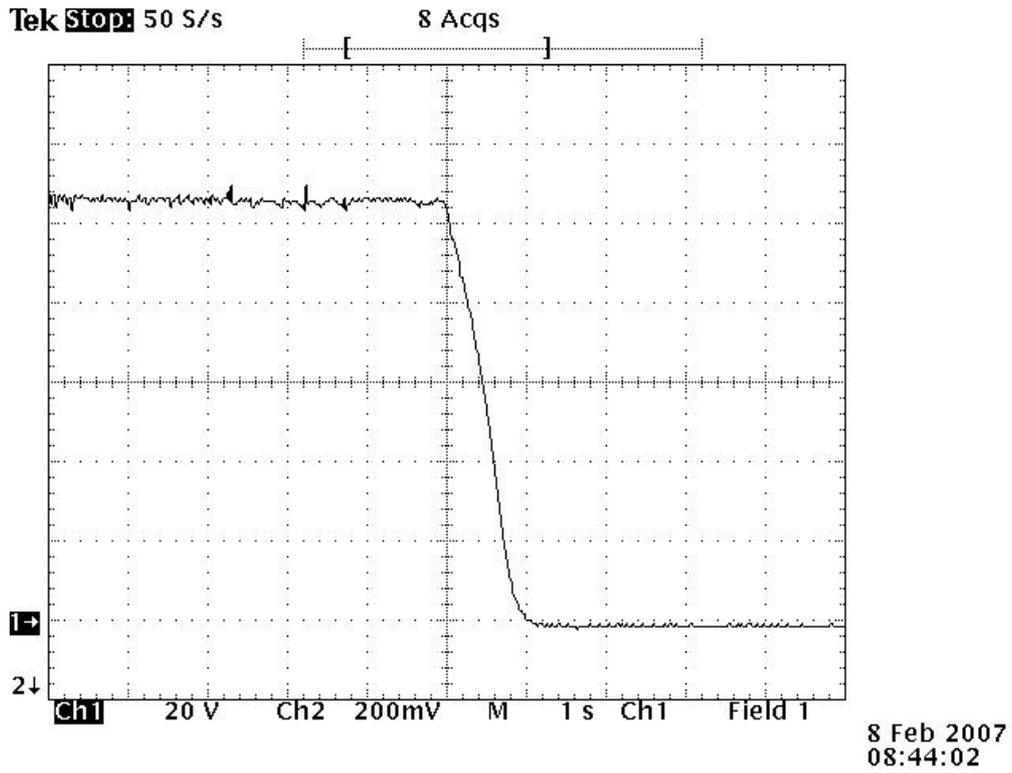


Figura 14 – Velocidade x Tempo – Método PROPOSTO.

ESCALA :

Velocidade - (Ch1) - 563,95 rpm/divisão - $n \cong 5.725$ rpm

Tempo (Horizontal) – 0,2 s/divisão - $t = 0,8$ s

3.4.2 – Correntes de frenagem

Ver Anexo VI

–Método USUAL.

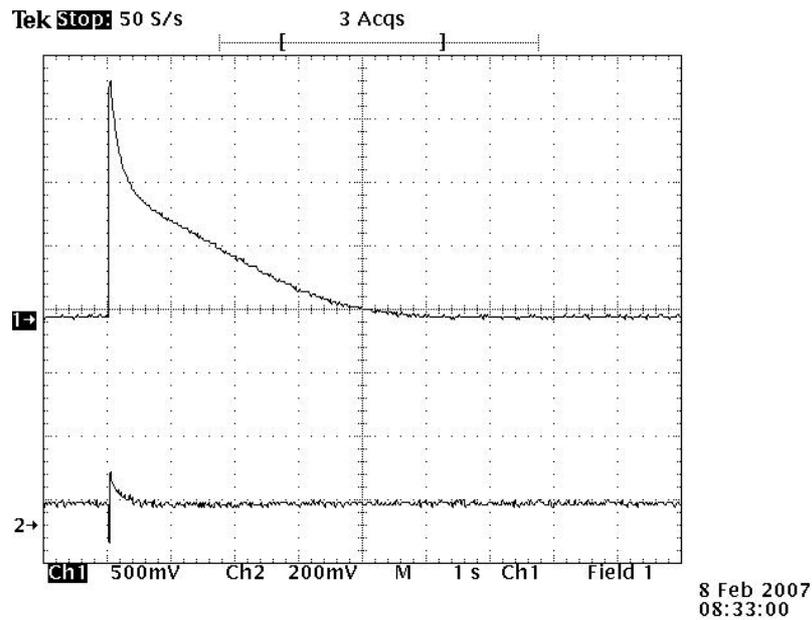


Figura 15 - Corrente de Frenagem (CH 1) - Método USUAL

ESCALAS :

Corrente de frenagem – Ch1 - 2 A/divisão

Corrente de excitação – Ch2 – 0,08 A/divisão

Horizontal – 0,2 s/divisão

No **método USUAL**, a corrente em função do tempo é calculada através da expressão :

$$I = 1,5 I_N \cdot e^{-\frac{(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{(2\pi)^2 \cdot n_M^2 J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t} \quad \text{A}$$

- Método PROPOSTO

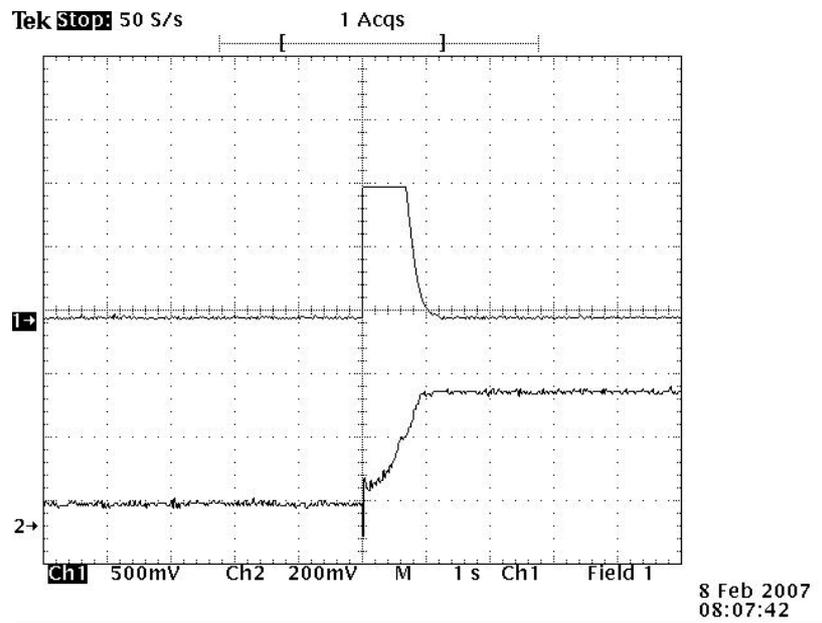


Figura 16 - Corrente de Frenagem (CH 1) - Método PROPOSTO

ESCALA :

Corrente de Frenagem – Ch1 - 2 A/divisão

Corrente de excitação – Ch 2 – 0,08 A/divisão

No método PROPOSTO,

De n_M até n_B - ($E = E_N$)

$$I = \frac{k\phi.n_B}{60(R_a + R_{FD})} = \frac{E_N}{(R_a + R_{FD})} = 1,5.I_N \quad A$$

De n_B até zero – ($k\phi = k\phi_N$)

$$I = 1,5.I_N e^{-\frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2.J.(R_a + R_{FD})}.t} \quad A$$

3.4.3 – Torque de frenagem

Ver anexo III

Método USUAL

$$M_{ELET} = \frac{\left[k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_M} \right]^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} \cdot n_M \cdot e^{-\frac{\left[k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_M} \right]^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}} \quad \text{N.m}$$

Método PROPOSTO

De n_M até n_B

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot n_B^2}{2\pi \cdot 60 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot \sqrt{n_M^2 - \frac{2(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}}} \quad \text{N.m}$$

De n_B até zero

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot n_B}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} \cdot e^{-\frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t} \quad \text{N.m}$$

CONCLUSÕES :

-No método USUAL, a variação do torque se dá de forma exponencial desde a velocidade máxima até à parada da máquina.

O máximo torque ocorrerá no início da frenagem e vale :

$$M_{ELET} = 1,5 \cdot \frac{M_N}{K_V} \quad \text{N.m}$$

Como o menor valor de K_V é 2, a máquina atingirá no máximo 75% de seu torque nominal.

-No método PROPOSTO, a análise deve ser feita nas duas regiões distintas de atuação, a saber :

De n_M até n_B

Inicialmente ($t=0$), o torque tem o mesmo valor do previsto no método USUAL, ou seja:

$$M_{ELET} = 1,5 \cdot \frac{M_N}{K_V} \quad \text{N.m}$$

Quando a máquina atingir sua velocidade-base, o torque terá atingido seu maior valor que é :

$$M_{ELET} = 1,5 \cdot M_N$$

De n_B até zero

O torque irá variar de seu máximo valor ($1,5 M_N$) até zero de uma forma exponencial.

IMPORTANTE :

Com relação à integridade mecânica da máquina e equipamentos, dois aspectos com relação ao torque devem ser avaliados:

TORQUE MÁXIMO DE FRENAGEM SUPORTÁVEL

Como foi visto anteriormente, o máximo torque presente na máquina, no método PROPOSTO, é de 1,5 vezes seu torque nominal.

Isso não constitui nenhum motivo de preocupação, tendo em vista que em seu projeto o fabricante da mesma, leva em consideração eventuais sobrecargas de maiores intensidades.

Evidentemente que o equipamento por ela acionado, deve ser também avaliado quanto ao problema em questão. (7 – Pág. 77)

Ver Anexo III.

VARIAÇÕES NO TORQUE DE FRENAGEM EM RELAÇÃO AO TEMPO

Tanto no método método USUAL quanto no PROPOSTO,, uma situação peculiar de gradiente de torque (dM_{ELET} / dt), ocorre no início do processo de frenagem, pois a corrente de armadura, em um pequeno espaço de tempo varia de zero a seu máximo valor, em um pequeno espaço de tempo, tendo em vista o circuito de armadura, ser quase que puramente resistivo.

O mesmo não ocorre no circuito de excitação, dado à sua alta indutância, o que provoca uma certa lentidão na criação do fluxo indutor, conseqüentemente, no torque.

No método PROPOSTO, quando a máquina durante a frenagem, tem sua velocidade se aproximando de sua velocidade-base, nota-se que o gradiente de torque (dM_{ELET} / dt) se torna mais acentuado e assume valores que irão demandar análises criteriosas por parte dos engenheiros mecânicos. (7 – Pág. 77) – Ver Anexo III.

Tais valores, se não forem bem avaliados, podem levar os eixos da máquina e do conjunto acionado à região de *deformação plástica*, provocando trincas internas e finalmente à fraturas.

Evidentemente tal efeito tem que ser evitado, redimensionando-se os resistores de frenagem, para que a corrente de frenagem atinja valores tais que, na pior condição, o gradiente de torque (dM_{ELET} / dt) promova esforços torsionais dentro da região de *deformação elástica*, o que torna-se uma condição perfeitamente segura para a máquina e o equipamento acionado.

Nessa nova condição operacional, o método PROPOSTO evidentemente teria sua eficiência de frenagem reduzida, pois, para que o gradiente de torque se torne menor, é necessário que a curva de torque seja mais "suave", o que naturalmente implicará em um tempo de frenagem maior.

Vale a pena ressaltar que as condições de frenagem regenerativa dessas máquinas/equipamentos são tão rigorosas quanto as propostas nesse estudo.

Capítulo 4

RESULTADOS OBTIDOS

4.1 – TEMPOS DE FRENAGEM

4.1.1 – Método Usual

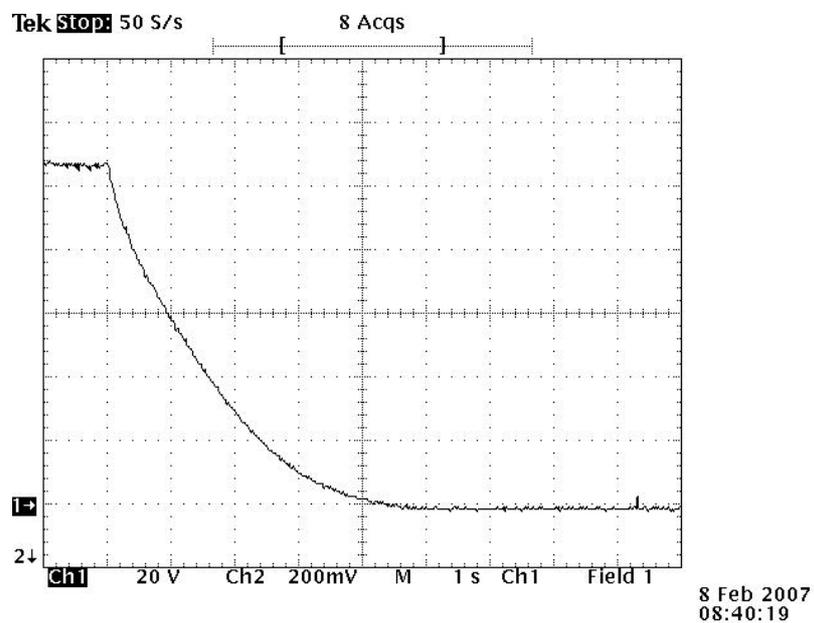


Figura 17 - Velocidade x Tempo - Método USUAL

ESCALAS :

Velocidade (Ch 1) - 563,95 rpm/Divisão - $n \cong 5.921$ rpm

Tempo (Horizontal) - 0,2 s/Divisão - $t \cong 5,6$ s

4.1.2 – Método proposto

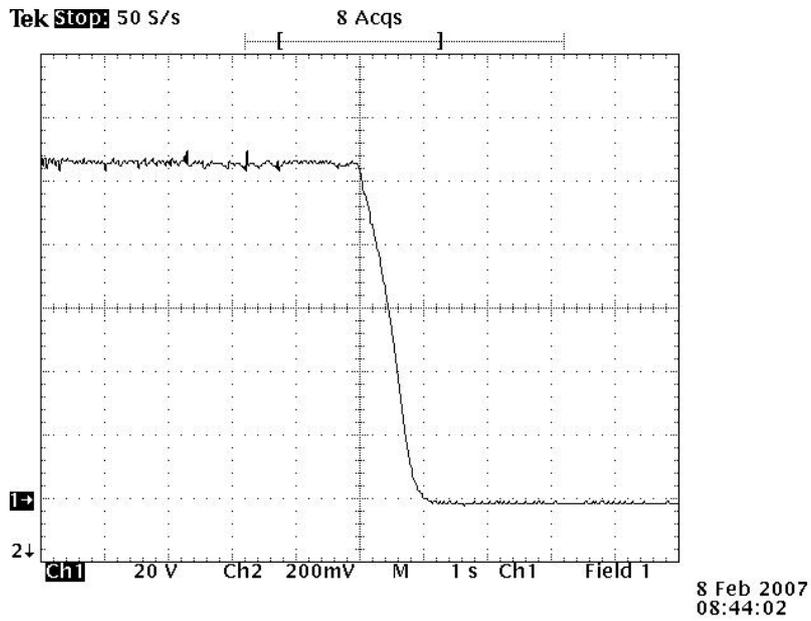


Figura 18 - Velocidade x Tempo - Método PROPOSTO

ESCALA :

Velocidade (Ch1) 563,95 rpm/Divisão - $n \cong 5.725$ rpm

Tempo (Horizontal) - 0,2 s/Divisão - $t = 0,8$ s

4.2 – CORRENTE DE FRENAGEM X TEMPO

4.2.1 – Método usual

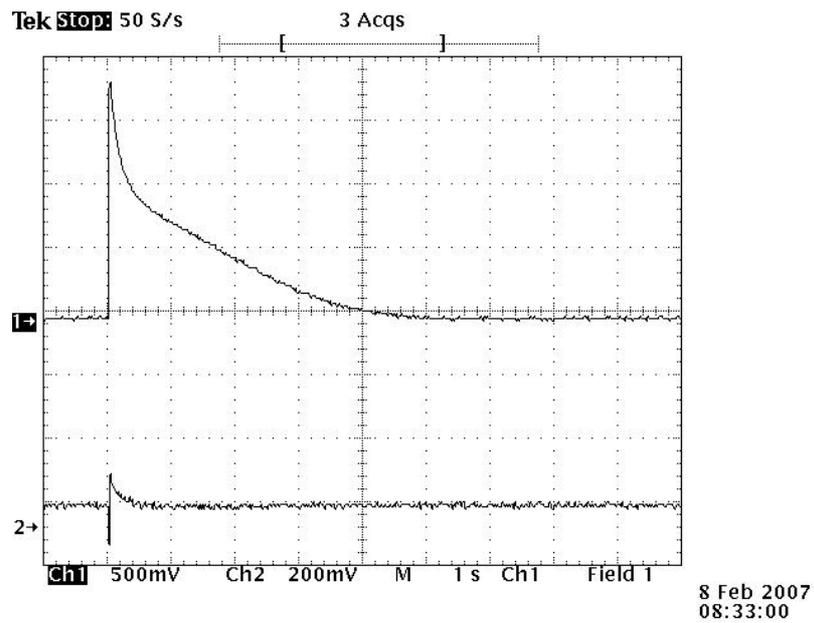


Figura 19 - Corrente de frenagem (CH 1) x Tempo - Método USUAL

ESCALAS :

Corrente de frenagem – Ch1 - 2 A/Divisão

Corrente de excitação – Ch2 – 0,08 A/Divisão

4.2.2 – Método proposto

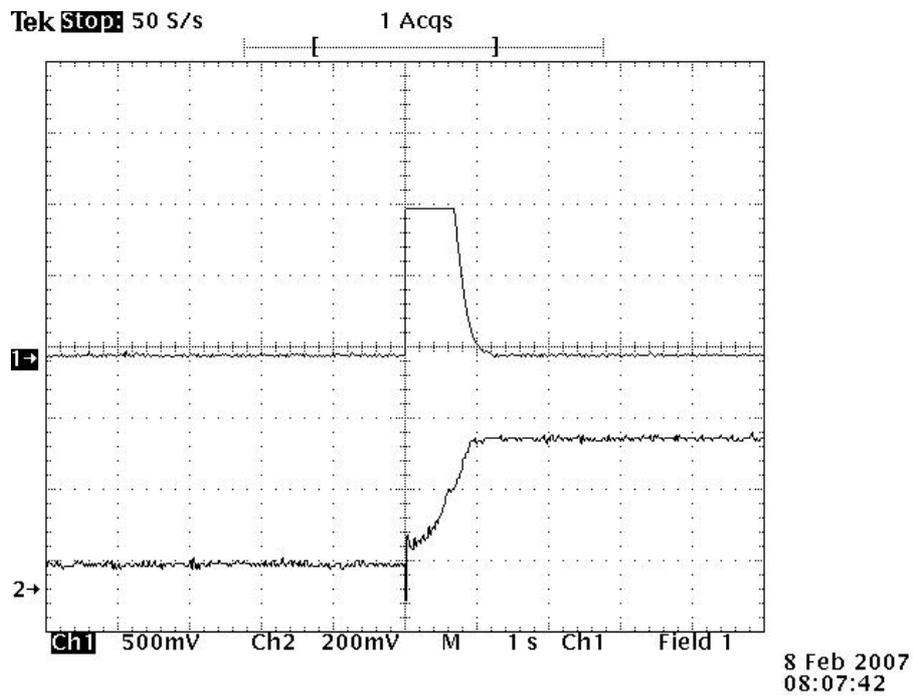


Figura 20 - Corrente de frenagem (CH 1) x Tempo - Método PROPOSTO

ESCALA :

Corrente de Frenagem – Ch1 - 2 A/Divisão

Corrente de excitação – Ch 2 – 0,08 A/Div

Capítulo 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 – CONTINUIDADE NA UTILIZAÇÃO DO MÉTODO USUAL

A rigor, os dirigentes técnicos de qualquer planta industrial, que tenham unidades acionadas por máquinas de corrente contínua de excitação independente, nunca se preocuparam em aprimorar seu sistema de frenagem dinâmica por falta de energia, basicamente por dois motivos:

O primeiro é que com o passar do tempo, a certeza de não interrupção do fornecimento de energia elétrica vem aumentando devido às novas técnicas incorporadas pelas concessionárias, à alta tecnologia dos materiais/equipamentos utilizados e às altas multas contratuais envolvidas por cortes não programados.

Também se deve levar em conta, a melhoria da qualidade da manutenção industrial, que tem possibilitado uma redução significativa de desligamentos provocados por problemas internos.

Isso realmente faz com que a quantidade de interrupções não programadas no fornecimento de energia elétrica tenha uma tendência de declínio com o passar dos anos.

Um segundo aspecto que deve ser abordado é que o empresário, de um modo geral, encara esse tipo de evento quase como um acontecimento sazonal e praticamente inevitável em períodos chuvosos, devido à incidência de descargas atmosféricas nas redes aéreas de energia elétrica.

Por isso tem computado em seus custos, os prejuízos que a utilização do método usual de frenagem possam acarretar.

Até pouco tempo, a tecnologia dos conversores CC/CC (Chopper) não era muito bem dominada e ainda representava um investimento de custo relativamente alto, inviabilizando-se então o controle da corrente de excitação, como é necessário no método que propomos.

Atualmente, com o avanço da tecnologia de controle e a facilidade em se adquirir, até mesmo de se construir conversores CC/CC (Chopper), o projeto proposto nesse trabalho torna-se

bastante promissor , pois numa análise, mesmo que superficial, ver-se-á que a relação custo/benefício o torna bastante atrativo.

Vale a pena ressaltar que a potência do conversor a ser utilizado (Chopper) é dimensionada para no máximo 5% da potência total da máquina comandada, pois irá trabalhar somente com o circuito de excitação da mesma.

5.2 – REDUÇÃO SIGNIFICATIVA NO TEMPO DE FRENAGEM

Como pode ser constatada através do estudo teórico no Anexo I, a redução no tempo de frenagem é bastante significativa.

Essa redução traz como principais benefícios, menores danos ao produto em processo, menores danos aos equipamentos e menores riscos de acidentes às pessoas presentes ao local do evento.

Como exemplos de danos ao equipamento, pode-se citar os impactos causados por uma chapa rompida em uma bobinadeira ou desbobinadeira de um laminador a frio; a falta de lubrificação nos redutores e a falta de lubrificação em seus mancais, em consequência da ausência da energia elétrica necessária ao bombeamento do óleo lubrificante.

Como dano ao produto, pode-se citar uma desbobinadeira de um laminador demorando a parar e a quantidade de material que é desenrolado desordenadamente.

Com relação às pessoas, principalmente em períodos noturnos de trabalho, é evidente que quanto menor o tempo de parada de um equipamento, menor o risco de acidentes pessoais.

5.3 – BAIXO CUSTO E FACILIDADE DE IMPLANTAÇÃO

O método proposto consiste em um banco de baterias em quantidade suficiente para promover a alimentação nominal da excitação da máquina, carregadores de baterias, circuito de controle, baterias para o circuito de controle, conversor CC/CC (Chopper), contator de potência, painéis, cabos e o banco de resistores de frenagem..

O circuito de excitação da máquina tem sua potência situada na faixa de 2 a 5% da potência nominal da mesma, portanto, mesmo sendo a máquina de alta potencia, o chopper necessário trabalhará com baixas potências, o que torna o custo de aquisição ou fabricação própria, bastante atraente.

Vale a pena ressaltar que parte desses equipamentos como uma parte das baterias, contator de potência, banco de resistores e cabos já existem se o equipamento já dispõe do método usual de frenagem.

Os materiais adicionais a serem adquiridos são mais baterias para se atingir a tensão de excitação nominal do campo, um conversor CC/CC, um circuito de controle, duas baterias para a regulação eletrônica e um carregador para as mesmas.

5.4 – VALOR MÁXIMO DA CORRENTE DE FRENAGEM

A máquina CC industrial é projetada para suportar valores maiores que 1,5 vezes sua corrente nominal, por um tempo muito maior que o necessário à uma frenagem dinâmica, portanto, qualquer máquina de corrente contínua de excitação independente de uso industrial, pode trabalhar com essa corrente durante o período previsto no método proposto, sem nenhum tipo de problema.(1-Siemens)

Vale a pena ressaltar que em uma frenagem regenerativa, o valor adotado para a corrente de armadura é de também 1,5 vezes a corrente nominal da máquina ou mais.

5.5 – MOMENTO DE INÉRCIA DO CONJUNTO / CURVA DE MAGNETIZAÇÃO DA MÁQUINA.

O momento de inércia do conjunto assim como a curva de magnetização da máquina, são dados irrelevantes para o controle, pois o método proposto irá controlar a corrente de frenagem. Evidentemente, quanto maior o momento de inércia de um equipamento, maior o tempo necessário para que o mesmo consiga parar, em uma frenagem dinâmica, porém o conhecimento do valor de inércia total do conjunto torna-se imperioso para a determinação do torque e gradiente de torque máximo a que o equipamento estará sujeito.

5.6 – VALOR ABSOLUTO E GRADIENTES DE TORQUE

A implantação do método proposto só deverá ser concretizada, após ter sido verificado que os valores de torques envolvidos e os gradientes de torque durante a frenagem, *não ofereçam nenhum tipo de riscos à integridade da máquina/equipamento.*

5.7 – CONDIÇÕES INADEQUADAS PARA O LEVANTAMENTO DOS RESULTADOS

Infelizmente, não foi possível a disponibilização de uma máquina de corrente contínua em condições adequadas para utilização nesse trabalho.

A máquina utilizada apresenta os seguintes problemas:

- Não correspondência entre os dados de placa e os obtidos em ensaio, como exemplo cita-se a tensão e corrente nominais de excitação.
- Problemas mecânicos em sua tampa dianteira, o que a leva a atritos intermitentes com valores interferentes nos ensaios.

Não foi possível também se obter um banco de resistores adequados à frenagem dinâmica, ou seja, com baixo valor de variação de seu valor ôhmico com a variação de temperatura.

De qualquer forma, mesmo com todas as limitações citadas, dentre outras, os valores obtidos nos ensaios validam de uma maneira bem satisfatória os valores previstos pelos cálculos teóricos desenvolvidos nesse trabalho.

5.8 – ALIMENTAÇÃO DO CIRCUITO DE CONTROLE

Como o sistema proposto estará atuando numa condição de falta de energia, uma alimentação de +12V, 0 e -12V será necessária para o funcionamento do circuito de controle.

Isso é conseguido através de duas baterias, à parte, conectadas em série, ou seja, o pólo positivo de uma conectada ao pólo negativo da outra.

Nesse ponto temos o 0 V, que então seria conectado ao comum da regulação.

O pólo positivo de uma seria o +12V e o pólo negativo da outra, o -12V, necessários ao controle.

5.9 – TABELA COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS USUAL E PROPOSTO

Tabela 1 – Tabela comparativa dos métodos de frenagens USUAL e PROPOSTO

	TEMPO DE FRENAGEM	VALOR MÁXIMO DE TORQUE	CUSTOS E FACILIDADES DE IMPLANTAÇÃO	GRADIENTES DE TORQUE	AQUECIMENTO DA MÁQUINA DURANTE A FRENAGEM
MÉTODO USUAL	MAIOR	MENOR QUE O NOMINAL	BATERIAS PARA EXCITAÇÃO, BANCO DE RESISTORES, CARREGADOR DE BATERIAS	ADMISSÍVEL	ACEITÁVEL
MÉTODO PROPOSTO	MUITO MENOR	1,5 VEZES O NOMINAL	MATERIAIS COMPLEMENTARES, MAIS BATERIAS PARA EXCITAÇÃO, 2 BATERIAS PARA O CONTROLE, CARREGADOR PARA AS BATERIAS DO CONTROLE, CONVERSOR CC/CC CHOPPER, CIRCUITO DE CONTROLE	SUJEITO À ANÁLISES	ACEITÁVEL

5.10 – PROPOSTA DE ESTUDOS FUTUROS

5.10.1 – Frenagem dinâmica a torque constante

Ver Anexo VIII

Se por algum motivo particular da carga acionada, for interessante se promover uma frenagem dinâmica à torque CONSTANTE, o material do Anexo VIII permite a elaboração de um circuito de controle adequado para tal.

5.10.2 – Frenagem dinâmica para outras configurações de máquinas de corrente contínua

Verificar a possibilidade de se otimizar a frenagem dinâmica para máquinas de Corrente Contínua série, composta aditiva e composta subtrativa.

5.10.3 – Frenagem dinâmica otimizada no intervalo de n_B até zero

Estudar a possibilidade de se reduzir ainda mais o tempo de frenagem da máquina, atuando-se no intervalo compreendido entre a velocidade-base e zero.

Como proposta para futuros estudos, no processo de frenagem proposto, quando a máquina atingir sua velocidade-base (n_B), pode-se suprimir momentaneamente a regulação da excitação da máquina, curto-circuitar R_{FD} através de outro IGBT e reiniciar-se novamente a frenagem com $I_{FD} = 1,5 I_N$.

Tecnicamente é perfeitamente possível se implementar esse arranjo, mas somente um estudo adequado da relação custo/benefício é que irá ditar a palavra final sobre o assunto.

Capítulo 6

ANEXOS

ANEXO I

COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE FRENAGEM DINÂMICA A CAMPO MÍNIMO (MÉTODO USUAL) E O MÉTODO PROPOSTO NO TRABALHO

1. Tempo de Frenagem a Campo Mínimo – (T_{CM})

Tem-se da teoria de máquinas de corrente contínua, a seguinte equação :

$$E = \frac{k\phi \cdot n}{60} \quad V$$

Onde,

E – força eletromotriz - V

$k\phi$ – fluxo do pólo indutor - Wb

n – rotação da máquina - rpm

No processo estudado neste trabalho, parte-se do princípio que no momento do início da frenagem, a máquina se encontra em sua pior condição de frenagem ou seja, à velocidade máxima (n_M).

Para que a força eletromotriz gerada não ultrapasse seu valor nominal, injeta-se no indutor uma tensão tal que irá provocar o aparecimento de um valor de fluxo ($k\phi_M$) de tal forma que:

$$\frac{k\phi_M \cdot n_M}{60} = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60} = E_N$$

Então

$$k\phi_M = k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_M}$$

Desconsiderando-se os torques devido ao atrito e ventilação, pode-se afirmar que:

$$M_{ELET} + M_{CIN} = 0 \quad (01)$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi_M \cdot I}{2\pi} \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi_M \cdot n}{60}$$

$$I = \frac{k\phi_M \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi_M}{2\pi} \cdot \frac{k\phi_M \cdot n}{60(R_a + R_{FD})} \quad \text{como } k\phi_M = k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_m}$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot \left(\frac{n_B}{n_M}\right)^2 \cdot n}{2\pi \cdot 60 \cdot (R_a + R_{FD})} \quad (02)$$

Da mecânica, tem-se a seguintes equação

$$M_{CIN} = J \cdot \frac{dw}{dt} \quad \text{e sendo,} \quad w = \frac{2\pi}{60} \cdot n$$

obté-m-se,

$$M_{CIN} = \frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} \quad (03)$$

Substituindo-se as Eqs.(02) e (03) na Eq. (01), tem-se :

$$\frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{(k\phi_N)^2 \cdot \left(\frac{n_B}{n_M}\right)^2}{2\pi \cdot 60 \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot n = 0$$

$$\int_{n_m}^1 \frac{dn}{n} = - \frac{(k\phi_N)^2 \cdot \left(\frac{n_B}{n_M}\right)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \int_0^{T_{CM}} dt$$

Como a integral da velocidade resultará em um logaritmo, não se pode adotar como limite inferior o valor zero (Logaritmo inexistente), por isso se adota o valor de 1[rpm] que praticamente significa máquina parada, portanto obtém-se para o tempo de frenagem utilizando-se o método Usual, a seguinte equação :

$$T_{CM} = \frac{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot \ln n_M}{(k\phi_N)^2 \left(\frac{n_B}{n_M}\right)^2} \quad \text{s} \quad (04)$$

2. Tempo de Frenagem no Método Proposto – (T_{EM})

2.1 – Tempo de n_M até n_B – (T_I)

Nessas condições o referido método irá manter a força eletromotriz gerada igual a nominal (E_N).

$$M_{ELET} + M_{CIN} = 0$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi I}{2\pi} \quad \frac{k\phi \cdot n}{60} = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60} = E_N$$

$$\therefore k\phi = k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n}$$

$$I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi \cdot n}{60} \quad I = \frac{k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n} \cdot n}{60(R_a + R_{FD})} \quad I = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi I}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n} \cdot \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD}) \cdot n}$$

$$M_{CIN} = \frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$\frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD}) \cdot n} = 0$$

$$\int_{n_M}^{n_B} n dn = - \frac{(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{(2\pi)^2 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot J} \int_0^{T_1} dt$$

$$T_1 = \frac{(2\pi)^2 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot J}{(k\phi_N)^2} \cdot \frac{(n_M^2 - n_B^2)}{2n_B^2}$$

2.2 – Tempo de n_B até 1(rpm) – (T_2)

Nessa situação $k\phi = k\phi_N$

$$M_{ELET} + M_{CIN} = 0$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi \cdot I}{2\pi} \quad k\phi = k\phi_N \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi_N \cdot n}{60}$$

$$I = \frac{k\phi_N \cdot n}{60(R_a + R_{FD})} \quad M_{ELET} = \frac{k\phi_N}{2\pi} \cdot \frac{k\phi_N \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} \cdot n$$

$$M_{CIN} = \frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$\frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{(k\phi_N)^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} \cdot n = 0$$

$$\int_{n_B}^1 \frac{dn}{n} = - \frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \int_0^{T_2} dt$$

$$T_2 = \frac{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}{(k\phi_N)^2} \cdot \ln n_B$$

$$T_{EM} = T_1 + T_2$$

$$T_{EM} = \frac{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}{(k\phi_N)^2} \left[\frac{n_M^2 - n_B^2}{2n_B^2} + \ln n_B \right] \text{ s}$$

3. Comparação entre: T_{CM} e T_{EM} ,

$$\frac{T_{CM}}{T_{EM}} = \frac{\frac{(2\pi)^2 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot J \cdot \frac{\ln n_M}{\left(\frac{n_B}{n_M}\right)^2}}{(k\phi_N)^2}}{\frac{(2\pi)^2 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot J \cdot \left[\frac{(n_M^2 - n_B^2)}{2n_B^2} + \ln n_B\right]}{(k\phi_N)^2}}$$

Desenvolvendo e simplificando

$$\frac{T_{CM}}{T_{EM}} = \frac{\left(\frac{n_M}{n_B}\right)^2 \cdot \ln n_M^2}{\left(\frac{n_M}{n_B}\right)^2 - 1 + \ln n_B^2}$$

Admitindo $k_v = \frac{n_M}{n_B} \quad \therefore \quad n_M^2 = k_v^2 \cdot n_B^2$

$$\frac{T_{CM}}{T_{EM}} = \frac{k_v^2 (Lk_v^2 + \ln n_B^2)}{k_v^2 - 1 + \ln n_B^2}$$

Nas máquinas industriais, usualmente:

$$2 \leq k_v \leq 4$$

Para a máquina em estudo nesse trabalho

$$k_v = \frac{n_M}{n_B} \quad k_v = \frac{6000}{1850} \quad k_v = 3,243$$

$$\frac{T_{CM}}{T_{EM}} = \frac{(3,243)^2 [L(3,243)^2 + L(1850)^2]}{(3,243)^2 - 1 + L(1850)^2}$$

$$\frac{T_{CM}}{T_{EM}} \cong 7,45$$

Pode se perceber claramente, a substancial redução no tempo de frenagem pelo método proposto.

ANEXO II

COMPORTAMENTO DO TORQUE ELÉTRICO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DA MÁQUINA PARA O MÉTODO PROPOSTO

1. Intervalo de: n_M até n_B

Nessas condições, $E=E_N$.

Considera-se M_{AV} desprezível.

$$M_{ELET} = \frac{k\phi I}{2\pi} \qquad \frac{k\phi.n}{60} = \frac{k\phi_N.n_B}{60} = E_N$$

$$k\phi = k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n}$$

$$I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi.n}{60} \quad \therefore I = \frac{k\phi.n}{60(R_a + R_{FD})}$$

Mas
$$\frac{k\phi.n}{60} = E_N = \frac{k\phi_N.n_B}{60} \quad \therefore I = \frac{k\phi_N.n_B}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{1}{2\pi} \cdot k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n} \cdot \frac{k\phi_N.n_B}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{E_N^2 \cdot 60}{2\pi(R_a + R_{FD}) \cdot n}$$

No método proposto, faz-se $\frac{E_N}{R_a + R_{FD}} = 1,5 \cdot I_N$, então:

$$M_{ELET} = \frac{60 \cdot E_N \cdot 1,5 I_N}{2\pi \cdot n}$$

Da teoria de máquinas de C.C., desprezando-se M_{AV} .

$$E_N \cdot I_N = \frac{2\pi \cdot T_N \cdot n_B}{60}$$

$$M_{\text{ELET}} = \frac{1,5 \cdot 60}{2\pi \cdot n} \cdot \frac{2\pi \cdot T_N \cdot n_B}{60}$$

$$M_{\text{ELET}} = 1,5 \cdot T_N \cdot \frac{n_B}{n}$$

Para $n = n_M$

$$M_{\text{ELET}} = 1,5 T_N \cdot \frac{n_B}{n_M} = \frac{1,5 M_N}{\frac{n_M}{n_B}} \quad \text{mas} \quad \frac{n_M}{n_B} = k_V$$

$$M_{\text{ELET}} = \frac{1,5 M_N}{k_V}$$

Como k_V é sempre no mínimo igual a 2, o torque inicial de frenagem será sempre menor que o torque nominal da máquina.

2. Intervalo de: n_B até zero

$$M_{\text{ELET}} = \frac{k\phi \cdot I}{2\pi} \quad k\phi = k\phi_N \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi_N \cdot n}{60}$$

$$I = \frac{k\phi_N \cdot n}{60(R_a + R_{FD})} \quad M_{\text{ELET}} = \frac{k\phi_N}{2\pi} \cdot \frac{k\phi_N \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{\text{ELET}} = \frac{(k\phi_N)^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} \cdot n$$

Como se pode observar, na velocidade máxima o torque presente é menor que o torque nominal não provocando nenhum sobre esforço na máquina e/ou equipamento.

Na velocidade nominal, o torque atinge $1,5 M_N$ o que é perfeitamente aceitável em acionamentos por máquinas C.C. Daí em diante, o mesmo decresce linearmente com a velocidade até se extinguir totalmente.

ANEXO III

AVALIAÇÃO DO TORQUE X TEMPO NO MÉTODO DE FRENAGEM À CAMPO MÍNIMO E NO MÉTODO PROPOSTO

1. Método de Frenagem à Campo Mínimo

$$M_{ELET} = \frac{k\phi \cdot I}{2\pi} \quad k\phi = k\phi_M \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}}$$

$$E = \frac{k\phi_M \cdot n}{60} \quad I = \frac{k\phi_M \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_M)^2 \cdot n}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} \quad \frac{k\phi_M \cdot n_M}{60} = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60} = E_N$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_M})^2 \cdot n}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})}$$

$$\text{Como } n = n_M \cdot e \quad - \frac{(k\phi_M)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t$$

$$M_{ELET} = \frac{\left[k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_M} \right]^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} \cdot n_M \cdot e \quad - \frac{\left[k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_M} \right]^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}$$

2. Método de Frenagem Proposto

2.1 – De n_M até n_B

$$M_{ELET} = \frac{k\phi I}{2\pi} \quad k\phi = \frac{n_B}{n} k\phi_N$$

$$I = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{n_B}{n} \cdot k\phi_N \cdot \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot n_B^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD}) \cdot n}$$

Como: $n = \sqrt{n_M^2 - \frac{2(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t}$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot n_B^2}{2\pi \cdot 60 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot \sqrt{n_M^2 - \frac{2(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}}}$$

2.2 – De n_M até zero

$$M_{ELET} = \frac{k\phi \cdot I}{2\pi} \quad k\phi = k\phi_N \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}}$$

$$E = \frac{k\phi_N \cdot n}{60} \quad I = \frac{k\phi_N \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot n}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})}$$

Mas $n = n_B$ e $\frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t$ então:

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot n_B}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} \quad e \quad \frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t$$

ANEXO IV

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DO TEMPO NO MÉTODO USUAL E NO PROPOSTO

1. Campo Mínimo ($k\phi_M$)- MÉTODO USUAL

$$M_{CIN} + M_{ELET} = 0 \quad M_{CIN} = \frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi I}{2\pi} \quad k\phi = k\phi_M \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi_M \cdot n}{60}$$

$$I = \frac{k\phi_M \cdot n}{60(R_a + R_{FD})} \quad \therefore \quad M_{ELET} = \frac{k\phi_M}{2\pi} \cdot \frac{k\phi_M \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_M)^2 \cdot n}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})}$$

$$\frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{(k\phi_M)^2 \cdot n}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} = 0$$

$$\frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} - \frac{(k\phi_M)^2 \cdot n}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD})} = 0$$

$$\int_{n_M}^n \frac{dn}{n} = - \frac{(k\phi_M)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \int_0^t dt$$

$$\ln n - \ln n_M = - \frac{(k\phi_M)^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}$$

$$\ln \frac{n}{n_M} = - \frac{(k\phi_M)^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}$$

$$n = n_M \cdot e^{- \frac{(k\phi_M)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t}$$

2 – Método Proposto

2.1 – De n_M até n_B

$$M_{CIN} + M_{ELET} = 0 \quad M_{CIN} = \frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi I}{2\pi} \quad \frac{k\phi n}{60} = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60} \therefore k\phi = \frac{n_B}{n} \cdot k\phi_N$$

$$I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi n}{60} \therefore I = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60(R_a + R_{FD})}$$

Mas: $k\phi n = k\phi_N \cdot n_B \quad \therefore \quad I = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60(R_a + R_{FD})}$

$$M_{ELET} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{n_B}{n} \cdot k\phi_N \cdot \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD}) \cdot n}$$

$$\frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{2\pi \cdot 60(R_a + R_{FD}) \cdot n} = 0$$

$$\int_{n_M}^n n \cdot dn = - \frac{(k\phi_N) \cdot (n_B)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \int_0^t dt$$

$$\frac{n^2}{2} \Big|_{n_M}^n = - \frac{(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t$$

$$\frac{n^2 - n_M^2}{2} = - \frac{(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t$$

$$n^2 - n_M^2 = \frac{-2(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}$$

$$n^2 = n_M^2 - \frac{2(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}$$

$$n = \sqrt{n_M^2 - \frac{2(k\phi_N)^2 \cdot (n_B)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t}$$

2.2 – De n_B até zero

$$M_{CIN} + M_{ELET} = 0 \quad M_{CIN} = \frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi I}{2\pi} \quad k\phi = k\phi_N \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi_N}{60}$$

$$I = \frac{k\phi_N \cdot n}{60(R_a + R_{FD})} \quad \therefore \quad M_{ELET} = \frac{1}{2\pi} \cdot k\phi_N \cdot \frac{k\phi_N \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$M_{ELET} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{(k\phi_N)^2 \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$\frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{(k\phi_N)^2 \cdot n}{60(R_a + R_{FD})} = 0$$

$$\int_{n_B}^n \frac{dn}{n} = - \frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \int_0^t dt$$

$$\ln n \Big|_{n_M}^n = - \frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t$$

$$\ln n - \ln n_B = - \frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t$$

$$\ln \frac{n}{n_B} = - \frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t$$

$$n = n_B e^{- \frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t}$$

ANEXO V

COMPARAÇÃO ENTRE ENERGIAS CINÉTICAS NO MÉTODO PROPOSTO

Sabe-se que $E_{CIN} = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$ mas $\omega = \frac{2\pi}{60} n$

$$E_{CIN} = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi}{60} n \right)^2 \quad E_{CIN} = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 \cdot n^2$$

Na velocidade máxima (n_M), a energia cinética acumulada é:

$$E_{C_M} = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 \cdot n_M^2$$

Na velocidade base (n_B), sua energia será:

$$E_{C_B} = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 \cdot n_B^2$$

Então, nesse intervalo da frenagem (n_M até n_B) a energia dissipada foi:

$$\Delta E = E_{C_M} - E_{C_B} = \frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 \cdot (n_M^2 - n_B^2)$$

O valor percentual dessa energia cinética dissipada com relação à energia cinética total é:

$$\frac{\Delta E}{E_{C_M}} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 (n_M^2 - n_B^2)}{\frac{1}{2} J \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 n_M^2}$$

$$\frac{\Delta E}{E_{C_M}} \cdot 100 = \frac{n_M^2 - n_B^2}{n_M^2} = 1 - \left(\frac{n_B}{n_M} \right)^2 = 1 - \frac{1}{\left(\frac{n_M}{n_B} \right)^2}$$

Admitindo-se que $\frac{n_M}{n_B} = k_V$ então:

$$\frac{\Delta E}{E_{C_M}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{1}{k_V^2}\right) \cdot 100$$

Normalmente, nos motores industriais:

$$2 \leq k_V \leq 4$$

$$\text{Se } k_V = 2 \quad \frac{\Delta E}{E_{C_M}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{1}{2^2}\right) \cdot 100$$

$$\frac{\Delta E}{E_{C_M}} \cdot 100 = 75\%$$

$$\text{Se } k_V = 4 \quad \frac{\Delta E}{E_{C_M}} \cdot 100 = \left(1 - \frac{1}{4^2}\right) \cdot 100$$

$$\frac{\Delta E}{E_{C_M}} \cdot 100 = 93,75\%$$

Conclusão

Na pior condição ($k_V = 2$), quando o método proposto deixar de atuar, 75% da energia cinética acumulada já foi dissipada.

ANEXO VI

VARIAÇÃO DA CORRENTE DE FRENAGEM EM RELAÇÃO AO TEMPO

1. Método usual – $k\phi = k\phi_M$

$$M_{CIN} + M_{ELET} = 0 \quad k\phi = k\phi_M$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi \cdot I}{2\pi} \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi_M \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$I = \frac{k\phi_M \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

Como $n = n_M \cdot e^{-\frac{(k\phi_M)^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}}$ então:

$$I = \frac{k\phi_M \cdot n_M}{60(R_a + R_{FD})} \cdot e^{-\frac{(k\phi_M)^2 \cdot t}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})}} \quad A$$

2. Método Proposto – $E = E_N$

2.1 – De n_M até n_B

$$\frac{k\phi \cdot n}{60} = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60} = E_N \quad k\phi = k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n}$$

$$I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi \cdot n}{60}$$

$$I = \frac{k\phi.n}{60(R_a + R_{FD})} = \frac{k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n} \cdot n}{60(R_a + R_{FD})}$$

$$I = \frac{k\phi.n_B}{60(R_a + R_{FD})} = 1,5 \cdot I_N$$

$$I = 1,5 \cdot I_N = \text{constante}$$

2.2 – De n_B até zero – ($k\phi = k\phi_N$)

$$I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad E = \frac{k\phi_N.n}{60}$$

$$I = \frac{k\phi_N.n}{60(R_a + R_{FD})}$$

Como: $n = n_B \cdot e^{-\frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t}$

Então:

$$I = 1,5 I_N e^{-\frac{(k\phi_N)^2}{(2\pi)^2 \cdot J \cdot (R_a + R_{FD})} \cdot t} \quad A$$

ANEXO VII

DETERMINAÇÃO DE R_a E $k\phi_N$ DA MÁQUINA

Da teoria acadêmica, em regime estável, é válida a equação:

$$U = E + R_a I \text{ (despreza-se a queda de tensão nas escovas).}$$

Em condições nominais:

$$U_N = E_N + R_a I_N \text{ mas } E_N = \frac{k\phi_N \cdot n_N}{60} \therefore$$

$$U_N = \frac{k\phi_N \cdot n_N}{60} + R_a I_N \quad (01)$$

Com a máquina girando a vazio:

$$U_N = \frac{k\phi_N \cdot n_0}{60} + R_{a_0} I_0 \quad (02)$$

Também:

$$R_a = R_{a_0} \cdot \frac{234,5 + T_{NORMA}}{234,5 + T_{AMB}} \quad (03)$$

onde:

U_N	–	Tensão nominal de armadura	V
$k\phi_N$	–	Fluxo nominal do motor	Wb ou V.s
I_N	–	Corrente de armadura nominal	A
I_0	–	Corrente de armadura a vazio	A
n_M	–	Velocidade nominal da máquina	rpm
n_0	–	Velocidade a vazio da máquina	rpm
R_a	–	Resistência de armadura nas condições nominais	Ω

R_{a_0} – Resistência de armadura à vazio Ω

T_{AMB} – Temperatura ambiente $^{\circ}C$

T_{NORMA} – Temperatura do enrolamento de armadura, nas condições nominais do motor $^{\circ}C$

Da Eq.03

$$R_{a_0} = R_a \cdot \frac{234,5 + T_{AMB}}{234,5 + T_{NORMA}}$$

Substituindo-se esse valor na Eq.02

$$U_N = \frac{k\phi_N \cdot n_0}{60} + R_a I_0 \frac{234,5 + T_{AMB}}{234,5 + T_{NORMA}} \quad (04)$$

Da Eq.01:

$$\frac{k\phi_N \cdot n_M}{60} = U_N - R_a I_N \quad (05)$$

Da Eq.04:

$$\frac{k\phi_N \cdot n_0}{60} = U_N - R_a I_0 \frac{(234,5 + T_{AMB})}{234,5 + T_{NORMA}} \quad (06)$$

Dividindo-se a Eq.05 pela Eq.06, tem-se:

$$\frac{n_N}{n_0} = \frac{U_N - R_a I_N}{U_N - R_a I_0 \frac{(234,5 + T_{AMB})}{234,5 + T_{NORMA}}}$$

Fazendo $\frac{(234,5 + T_{AMB})}{234,5 + T_{NORMA}} = A_T$, então:

$$R_a = \frac{U_N - (n_0 - n_N)}{n_0 I_N - n_N I_0 \cdot A_T} \quad \Omega$$

Substituindo-se esse valor na Eq.05 e simplificando, tem-se:

$$k\phi_N = \frac{60U_N(I_N - A_T I_0)}{n_0 I_N - A_T n_N I_0} \quad \text{Wb}$$

Nota:

Para um cálculo rápido e estimativo, vale considerar que:

$$n_0 I_N - A_T n_N I_0 \cong n_0 I_N \quad \text{pois}$$

$$n_0 I_N \gggg A_T n_N I_0$$

Também:

$$I_N - A_T I_0 \cong I_N \quad \text{pois} \quad I_N \gggg A_T I_0$$

Assim:

$$R_a \cong \frac{U_N \cdot (n_0 - n_N)}{n_0 I_N} \quad \text{ou}$$

$$R_a \cong \frac{U_N}{I_N} \left(1 - \frac{n_N}{n_0}\right) \quad \Omega$$

e

$$k\phi_N = \frac{60 \cdot U_N \cdot I_N}{n_0 \cdot I_N} \quad \therefore$$

$$k\Phi_N \cong \frac{60U_N}{n_0} \quad \text{Wb}$$

ANEXO VIII

FRENAGEM A TORQUE CONSTANTE

Na frenagem

$$M_{ELET} + M_{CIN} = 0$$

Façamos com que o M_{ELET} se mantenha com um valor constante e igual a C_1 , no intervalo ente n_M e n_B , portanto:

$$M_{ELET} = C_1$$

$$M_{ELET} = \frac{k\phi I}{2\pi} \quad \text{mas} \quad I = \frac{E}{R_a + R_{FD}} \quad \text{e} \quad E = \frac{k\phi.n}{60}$$

$$\therefore \frac{k\phi.n}{60(R_a + R_{FD})} \quad \therefore \quad M_{ELET} = \frac{(k\phi)^2.n}{2\pi.60.(R_a + R_{FD})}$$

Como $M_{ELET} = C_1$, logo:

$$\frac{(k\phi)^2.n}{2\pi.60.(R_a + R_{FD})} = C_1 \quad (01)$$

Se $M_{ELET} = C_1$ e $M_{ELET} + M_{CIN} = 0 \quad \therefore \quad M_{CIN} = - C_1$.

$$\text{Como } M_{CIN} = J \cdot \frac{dw}{dt} \quad w = \frac{2\pi}{60} \cdot n \quad \therefore \quad M_{CIN} = \frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt}$$

$$\text{Então } \frac{2\pi}{60} J \cdot \frac{dn}{dt} = - C_1 \quad \text{ou} \quad dn = - \frac{60C_1}{2\pi J} dt$$

Integrando

$$\int_{n_M}^n dn = - \frac{60C_1}{2\pi J} \int_0^t dt$$

$$n = n_M - \frac{60C_1.t}{2\pi J} \quad (02)$$

Substituindo-se a Eq. 02 na Eq. 01 e simplificando, tem-se:

$$k\phi = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 60 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot C_1}{n_M - \frac{60C_1}{2\pi J} \cdot t}} \quad \text{Wb}$$

Observações:

1. Pela observação e análise matemática da fórmula de $k\phi$, nota-se que o fluxo irá aumentando seu valor à medida que o tempo passa, porém, quando seu valor for igual ao fluxo nominal da máquina ($k\phi = k\phi_N$), este valor deverá ser mantido até a paralisação final da máquina.

2. Quando a máquina estiver com $n \leq n_B$ e houver uma falta de energia, $k\phi$ deverá ser mantido constante e igual a $k\phi_N$.

3. Determinação do máximo valor de C_1

No instante $t=0$, estando a máquina em uma velocidade $n_1 > n_B$, tem-se:

Como

$$k\phi = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 60 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot C_1}{n_M - \frac{60 \cdot C_1}{2\pi J} \cdot t}}$$

para $n_M = n_1$ e $t=0$,

$$k\phi_1 = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 60 (R_a + R_{FD}) C_1}{n_1 - 0}}$$

$$(k\phi_1)^2 = \frac{2\pi \cdot 60 (R_a + R_{FD}) C_1}{n_1}$$

$$C_1 = \frac{(k\phi_1)^2 \cdot n_1}{2\pi \cdot 60 (R_a + R_{FD})} \quad (03)$$

Considerando uma condição operacional limite da máquina

$$\frac{k\phi_1 \cdot n_1}{60} = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60} \quad \therefore \quad k\phi_1 = k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_1}$$

Na Eq.03

$$C_1 = \frac{k\phi_N \cdot n_B}{60} \cdot \frac{1}{(R_a + R_{FD})} \cdot \frac{n_B}{n_1} \cdot \frac{k\phi_N}{2\pi}$$

$$C_1 = \frac{(k\phi_N \cdot \frac{n_B}{n_1})^2 \cdot n_1}{2\pi \cdot 60 \cdot (R_a + R_{FD})} \quad C_1 = \frac{(k\phi_N)^2 n_B^2}{2\pi \cdot 60 \cdot (R_a + R_{FD}) \cdot n_1}$$

$$\frac{k\phi_N \cdot n_B}{60} = E_N$$

$$C_1 = \frac{E_N}{R_a + R_{FD}} \cdot \frac{k\phi_N}{2\pi} \cdot \frac{n_B}{n_1}$$

Se dimensionarmos R_{FD} , de tal forma que:

$$\frac{E_N}{R_a + R_{FD}} = 1,5I_N$$

$$C_1 = 1,5I_N \cdot \frac{k\phi_N}{2\pi} \cdot \frac{n_B}{n_1} \quad \text{como} \quad \frac{k\phi_N I_N}{2\pi} = T_N$$

$$C_1 = 1,5T_N \cdot \frac{n_B}{n_1}$$

Como n_1 é sempre maior que n_B , então,

$$\frac{n_B}{n_1} < 1 \quad \text{logo} \quad C_1 < 1,5 T_N$$

Fica evidenciado que o valor **máximo** de C_1 é uma função da velocidade (n_1) onde se iniciará o processo de frenagem a torque constante.

Assim sendo, o menor valor de C_1 será quando $n_1 = n_M$, logo:

$$C_1 \leq 1,5 T_N \cdot \frac{n_B}{n_M}$$

ANEXO IX

AQUECIMENTO DA MÁQUINA DURANTE A FRENAGEM

Quando a máquina gira à uma velocidade n_m , a energia cinética acumulada é de :

$$E_{\text{CIN}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \left(\frac{2 \cdot \Pi}{60} \right)^2 \cdot n_M^2 \quad \text{Joule}$$

As energias dissipadas em R_a e R_{FD} são :

$$E_{R_a} = \int R_a \cdot I_{\text{FD}}^2(t) \cdot dt \quad E_{R_{\text{FD}}} = \int R_{\text{FD}} \cdot I_{\text{FD}}^2(t) \cdot dt \quad \text{portanto,}$$

$$E_{R_a} = R_a \cdot \int I_{\text{FD}}^2(t) \cdot dt \quad (01)$$

$$E_{R_{\text{FD}}} = R_{\text{FD}} \cdot \int I_{\text{FD}}^2(t) \cdot dt \quad (02)$$

Dividindo Eq. 02 pela Eq. 01, tem-se :

$$\frac{E_{R_{\text{FD}}}}{E_{R_a}} = \frac{R_{\text{FD}}}{R_a}$$

Então,

$$\frac{E_{R_{FD}}}{E_{R_a}} + 1 = \frac{R_{FD}}{R_a} + 1 \frac{E_{R_{FD}} + E_{R_a}}{E_{R_a}} = \frac{R_{FD} + R_a}{R_a}$$

$$\text{mas } E_{R_{FD}} + E_{R_a} = E_{CIN}$$

logo,

$$\frac{E_{R_a}}{E_{CIN}} = \frac{R_a}{R_{FD} + R_a} \quad (03)$$

Nas máquinas industriais, o torque de atrito e ventilação é desprezível perante os outros torques presentes na máquina, portanto, com boa aproximação, pode-se inferir que a potência eletromagnética é praticamente a potência mecânica da máquina.

Assim,

$$E_N \cdot I_N \cong P_{MEC} \quad \text{mas } \eta_N = \frac{P_{MEC}}{P_{ELET}} \quad \therefore P_{MEC} = \eta_N \cdot P_{ELET}$$

Como

$$P_{ELET} = U_N \cdot I_N \quad \text{logo,}$$

$$E_N = \eta_N \cdot U_N$$

Da teoria acadêmica,

$$U_N = E_N + R_a \cdot I_N$$

$$R_a = \frac{(1 - \eta_N) U_N}{I_N} \quad (04)$$

Do processo de frenagem,

$$I_{FD} = 1,5 \cdot I_N = \frac{E_N}{R_a + R_{FD}}$$

$$R_a + R_{FD} = \frac{\eta_N \cdot U_N}{1,5 \cdot I_N} \quad (05)$$

Substituindo a Eq. 04 e Eq. 05 na Eq. 03, tem-se:

$$E_{R_a} = \frac{(1 - \eta_N) \cdot 1,5}{\eta_N} \cdot E_{CIN}$$

$$\text{Como } E_{R_a} + E_{R_{FD}} = E_{CIN} \quad \therefore \quad E_{R_{FD}} = E_{CIN} - E_{R_a}$$

Substituindo o valor de E_{R_a} e simplificando, tem-se :

$$E_{R_{FD}} = \left(\frac{2,5 \eta_N - 1,5}{\eta_N} \right) \cdot E_{CIN}$$

No motor em que desenvolvemos nosso estudo, $\eta_N = 0,8$, portanto,

$$E_{R_a} = 37,5 \% \text{ de } E_{CIN}$$

$$E_{R_{FD}} = 62,5 \% \text{ de } E_{CIN}$$

COMENTÁRIOS

1) – Nas máquinas industriais, o valor do rendimento oscila entre 0,93 a 0,95, em média.

Para $\eta_N = 0,93$

$$E_{R_a} = 11,29 \% \text{ de } E_{CIN}$$

$$E_{R_{FD}} = 88,71 \% \text{ de } E_{CIN}$$

2) – O percentual de energia dissipada na resistência de armadura da máquina, independe do processo utilizado (USUAL OU PROPOSTO)

3) - Se a temperatura do enrolamento de armadura, estiver próxima do limite permitido por sua classe de isolamento, a ocorrência de uma frenagem dinâmica por falta de energia poderá provocar sua ultrapassagem, pois nesse momento, obviamente, deixa de existir a tão necessária ventilação forçada da máquina. Esses sistemas de ventilação são efetuados através de uma ventoinha acionada por um motor de indução trifásico. Uma forma de se evitar um sobreaquecimento do isolamento seria acionar, (mesmo que abaixo das condições nominais) o

motor da ventilação através de um conversor CC/AC, alimentado pelo conjunto de baterias utilizado para a excitação da máquina. Apesar de representar um custo adicional ao projeto, essa preocupação deve existir tanto para frenagens no método USUAL, quanto no PROPOSTO, pois se tratar de preservar a máquina de corrente contínua.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. www.sea.siemens.com/step/templates/lesson.mason?dcd:e:4:4, Regen & Dynamic Braking.
2. **Veshenevski, S.**, *Características de los motores em el accionamiento electrico*, Ed. MIR, Moscou, 1972.
3. **Martignoni, A.**, *Máquinas elétricas de corrente continua*, Ed. Globo, SP, 1987.
4. **Garik-Liwschitz, M.; Whiple, C.C.**, *Máquinas de corrente continua*, Ed. “Ao Livro Técnico”, RJ, 1958.
5. **Kosow, I.L.**, *Máquinas elétricas e transformadores*, Ed. Globo, SP, 1977.
6. www.diana.ee.pucrs/l~pereira/Eletrrotecnica/Apostila_MCC.pdf
7. **Carvalho, J.R.; Moraes, P.**, *Órgãos de máquinas – dimensionamento*, LTC Ed. Ltda., pág. 77, 1970.