

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**FABRIZIO DUARTE TISSOT**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**UMA ANÁLISE DA PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA  
EM MOTORES ASSÍNCRONOS**

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**UMA ANÁLISE DA PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA  
EM MOTORES ASSÍNCRONOS**

Projeto de Diplomação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FABRIZIO DUARTE TISSOT

## **UMA ANÁLISE DA PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGA EM MOTORES ASSÍNCRONOS**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Prof. Dr. Luís Alberto Pereira, UFRGS

Doutor pela Universität Kaiserslautern – Kaiserslautern, Alemanha

Porto Alegre, dezembro de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus amados pais, Neiva e Jorge, pelo carinho, pela educação maravilhosa, pela liberdade, pelo estímulo a prática consciente do livre arbítrio e das suas conseqüências, pelo incentivo natural, e até inconsciente pela busca de conhecimento, do certo e do correto, do diferente, do novo, e por sempre oferecer o melhor para mim. Exemplos de vida que me mostraram que o melhor caminho é o caminho do bem comum.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos colegas de todas as turmas e cursos que tive o prazer de conviver em todos estes anos, por tornarem esta jornada mais produtiva e alegre. Em especial aos colegas José Mariano Arigony, Maurício Grafulha, Henrique Hall, Jean Winter, pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas ao longo da graduação, pelas longas e produtivas discussões sobre os mais diversos temas, e apoio na revisão deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, não apenas pela sua orientação e acompanhamento na elaboração e desenvolvimento deste trabalho apenas, mas principalmente pela contínua dedicação e preocupação com o real aprendizado dos alunos durante todo o curso. Que sua conduta para com os estudantes possa servir de inspiração para outros professores.

Ao Brasil, por propiciar um ensino superior de qualidade, com material humano acima da média, mesmo com todas as carências e falta de investimento que este setor enfrenta desde sempre, sendo este um setor onde o investimento maciço nunca deve ser considerado suficiente.

À Universidade e seus funcionários, por propiciarem um ambiente tão acolhedor quanto possível, dando base para que possamos exercer com tranquilidade as atividades a que somos submetidos, formando bons profissionais e pessoas melhores. E aos demais professores em especial aos que exercem sua atividade com vigor e dedicação, devotados ao ensino.

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta metodologia para obtenção de curva de tempo versus corrente do motor, a partir somente do ensaio da corrente de partida, para comparação coerente com as curvas de atuação dos dispositivos de proteção. Também compara o emprego das curvas obtidas, em relação ao uso direto curva da corrente de partida medida, à metodologia mecânica/elétrica utilizada pelos fabricantes e em relação às proteções de sobrecorrente usuais recomendadas.

**Palavras-chaves: Proteção de Motores. Curva de Partida de Motores. Proteção Contra Sobrecarga.**

## **ABSTRACT**

The present work shows a method to obtain a motor startup time-current curve, from the startup current data only, coherent to compare with trip curves of protection devices. Also compare the consequences of the utilization of the results against the direct use of the original startup current data and the mechanical/electrical method used by the manufacturer and the usual recommended overload protection.

**Keywords: Motor Protection. Motor Startup Curve. Overload Protection.**

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	OBJETIVOS .....	16
2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	17
2.2	MOTOR DE INDUÇÃO .....	17
2.2.1	MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR DE GAIOLA DE ESQUILO .....	17
2.3	CIRCUITOS DE PROTEÇÃO E COMANDO .....	18
2.3.1	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO .....	19
2.3.1.1	FUSÍVEIS .....	19
2.3.1.2	DISJUNTORES .....	20
2.3.1.3	RELÉS DE SOBRECARGA TÉRMICOS .....	21
2.3.1.4	SENSORES DE TEMPERATURA .....	22
2.3.1.5	RELÉS ELETRÔNICOS .....	23
2.3.2	CONTADORAS .....	23
2.4	SOBRECARGA TÉRMICA .....	24
3	TIPOS DE CURVAS TEMPO-CORRENTE (TXI VS. IXT) .....	26
3.1	CURVA DE TEMPO DECORRIDO .....	26
3.2	CURVA DE TEMPO DE DURAÇÃO .....	27
4	MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS .....	30
4.1	BANCADA DIDÁTICA .....	30
4.2	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO .....	31
4.3	ENSAIOS .....	33
4.4	SOFTWARE .....	36
5	METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DOS DADOS .....	37
5.1	ANÁLISE NUMÉRICA DA CORRENTE DE PARTIDA .....	37
5.1.1	SUBDIVISÃO POR NÍVEIS DE CORRENTE .....	38
5.1.2	SUBDIVISÃO PELA DERIVADA .....	39
5.2	MÉTODO DO CONJUGADO E CORRENTE VS. VELOCIDADE .....	42
5.3	RESULTADOS DOS MÉTODOS .....	48
5.4	ANÁLISE DE RESULTADOS DOS MÉTODOS .....	50
6	ANÁLISE DA PROTEÇÃO PARA OS CASOS ESTUDADOS .....	52
6.1	PROTEÇÃO COM FUSÍVEL .....	52
6.2	PROTEÇÃO COM DISJUNTOR IEC .....	54
6.3	PROTEÇÃO COM RELÉ TÉRMICO .....	55
6.4	RESUMO DAS PROTEÇÕES CONTRA SOBRECARGA .....	57
7	ALTERNATIVAS AO USO DA CURVA IXT DE DURAÇÃO .....	58
8	CONCLUSÃO .....	61
9	REFERÊNCIAS .....	64
	APENDICE A: DIAGRAMA DE LIGAÇÃO .....	66

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição do Consumo de Energia Elétrica por Setor .....	13
Figura 2 – Distribuição do Consumo de Energia nas Indústrias .....	14
Figura 3 – Estatística da Causa de Falhas em Motores Elétricos .....	15
Figura 4 – Classes de Isolamento e Vida Útil .....	25
Figura 5 – Curva de partida “Tempo Decorrido” de motor de 10cv com carga de inércia.....	27
Figura 6 – Curva tipo “Tempo de Duração” .....	28
Figura 7 – Curvas tipo “Tempo Decorrido” até interrupção de disjuntor IEC 25A.....	29
Figura 8 – Bancada didática .....	30
Figura 9 – Osciloscópio Digital Agilent DSO3102A.....	32
Figura 10 – Analisador de Energia Embrasul RE6000.....	33
Figura 11 – Curva característica de Conjugado vs. Rotação de freio eletromagnético.....	34
Figura 12 – Ensaio da corrente de partida motor 1,5cv sem carga.....	35
Figura 13 – Ensaio da corrente de partida motor 1,5cv com carga (C <sub>nom</sub> ).....	36
Figura 14 – Curva da corrente de partida “Tempo de Duração” e limites térmicos do motor .	37
Figura 15 – Curva da corrente de partida, subdivisão por $\Delta I = 10\%I_{max}$ .....	38
Figura 16 – Curva da corrente de partida, subdivisão pela derivada.....	40
Figura 17 – Método Níveis de Corrente: "Curva I <sub>xt</sub> " vs. "Pontos txI" .....	41
Figura 18 – Método Derivada: "Curva I <sub>xt</sub> " vs. "Pontos txI" .....	41
Figura 19 – Motor 1,5cv: Curva de conjugado e corrente vs. Velocidade .....	45
Figura 20 – Motor 10cv: Curva de conjugado e corrente vs. Velocidade .....	45
Figura 21 – Motor 1,5cv: Suportabilidade térmica e Corrente “Tempo de Duração” .....	47
Figura 22 – Motor 10cv: Suportabilidade térmica e Corrente “Tempo de Duração”.....	47
Figura 23 – Comparação dos métodos com curva corrente ensaiada (1,5cv) .....	49
Figura 24 – Comparação dos métodos com curva corrente ensaiada (10cv) .....	49
Figura 25 – Diagrama Fusível .....	52
Figura 26 – Motor 1,5cv e fusível Diazed 4A .....	53
Figura 27 – Motor 1,5cv e fusível Diazed 10A .....	53
Figura 28 – Diagrama Disj. IEC .....	54
Figura 29 – Motor 1,5cv e disjuntor IEC 6A - Curva D.....	54
Figura 30 – Diagrama Relé Térmico .....	55
Figura 31 – Motor 1,5cv e relés térmicos 4A.....	56
Figura 32 – Motor 10cv e relés térmicos 20A.....	56
Figura 33 – Ponto de rotor bloqueado do motor e elementos de proteção .....	58
Figura 34 – Curva corrente de partida do motor e curvas de atuação .....	59

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Classes de Disparo.....	22
------------------------------------	----

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Fusíveis: Categorias de Aplicação.....	20
Quadro 2 – Dispositivos de Proteção versus Sobrecargas.....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS

A: ampere

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CA: Corrente Alternada.

cv: cavalo vapor, (1cv = 736W)

DELET: Departamento de Engenharia Elétrica

DZ: Diazed

EASA: Electrical Apparatus Service Association

IEC: International Electrotechnical Commission

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

ks/s: quilo samples per second. Mil amostras por segundo.

MITRGE: Motor de Indução Trifásico, Rotor de Gaiola de Esquilo.

PGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PTC: Positive temperature coefficient. Coeficiente de temperatura positivo.

rpm: Rotações por minuto

RMS: Root Mean Square. Raiz Média Quadrática.

RTD: Resistance temperature detector. Detector de temperatura resistivo.

$t_p$  : Pick-up time, tempo de disparo

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USB: Universal Serial Bus

V: volt

$J$ : Momento de Inércia ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )

$J_e$ : Inércia total conectada ao eixo ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )

$J_m$ : Momento de inércia do eixo do motor ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )

$J_l$ : Momento de inércia da carga ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )

$m_l$ : Massa da carga

$r_l$ : Raio girante da carga

$t_a$ : Tempo de aceleração (segundos)

$\omega$ : Velocidade angular ( $\text{rad/s}$ )

$\Delta\omega$ : Variação de velocidade ao longo do tempo  $t_a$  (RPM ou  $\text{rad/s}$ )

$\alpha$ : Aceleração angular ( $\text{rad/s}^2$ )

$C$ : Conjugado ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )

$C_a$ : Conjugado médio de aceleração ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )

$C_l$ : Conjugado médio da carga ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )

$C_m$ : Conjugado médio motor ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )

## 1 INTRODUÇÃO

A continuidade no funcionamento de linhas de produção e a eficiência de processos industriais sempre serão assuntos considerados de interesse nas áreas de Engenharia ao qual tal processo é pertinente. Dentro das possíveis variáveis que conduzem a estes dois aspectos, a eficiência energética tem se tornado mais e mais importante, por caracterizar boa prática de consumo de insumos, responsabilidade com o meio ambiente e por reverter diretamente na fatura de energia elétrica e indiretamente em outras fontes de custo do industriário.

Desta forma, o correto dimensionamento mecânico, correta especificação do grau de proteção em função das condições ambientes e o uso de técnicas de proteção adequadas para motores elétricos nas linhas de produção resulta em maior vida útil do motor, e um melhor desempenho eletromecânico ao longo deste período. Esta melhoria no desempenho dos motores, além de garantir a continuidade do processo, pode também significar eficiência energética.

Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [1] informam que a indústria consumia 46,74% do total de energia produzida no país em 2007 e fabricantes de máquinas elétricas [2] estimam que 55% desta energia é consumida por motores na indústria.

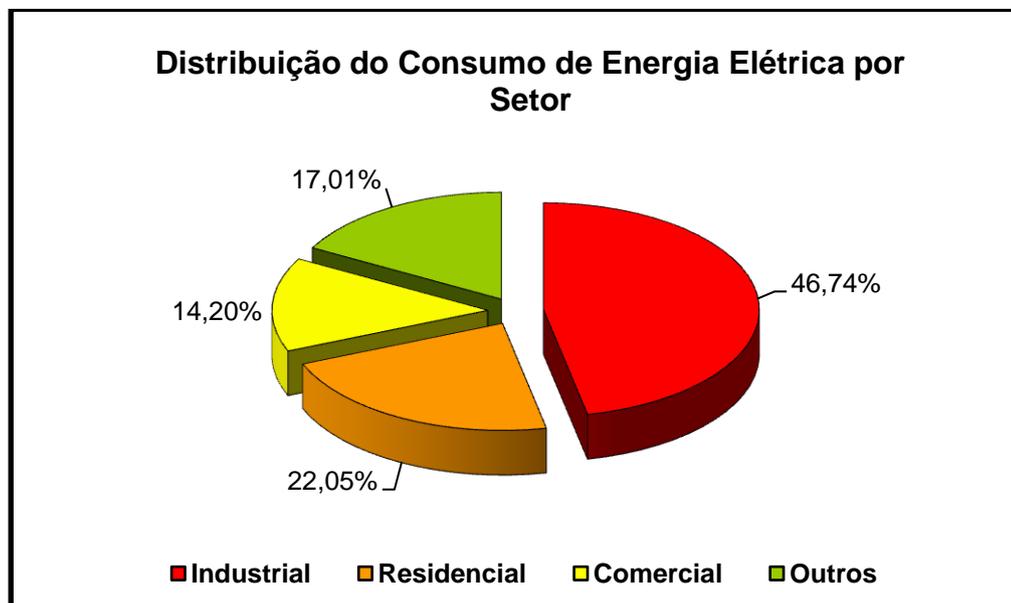
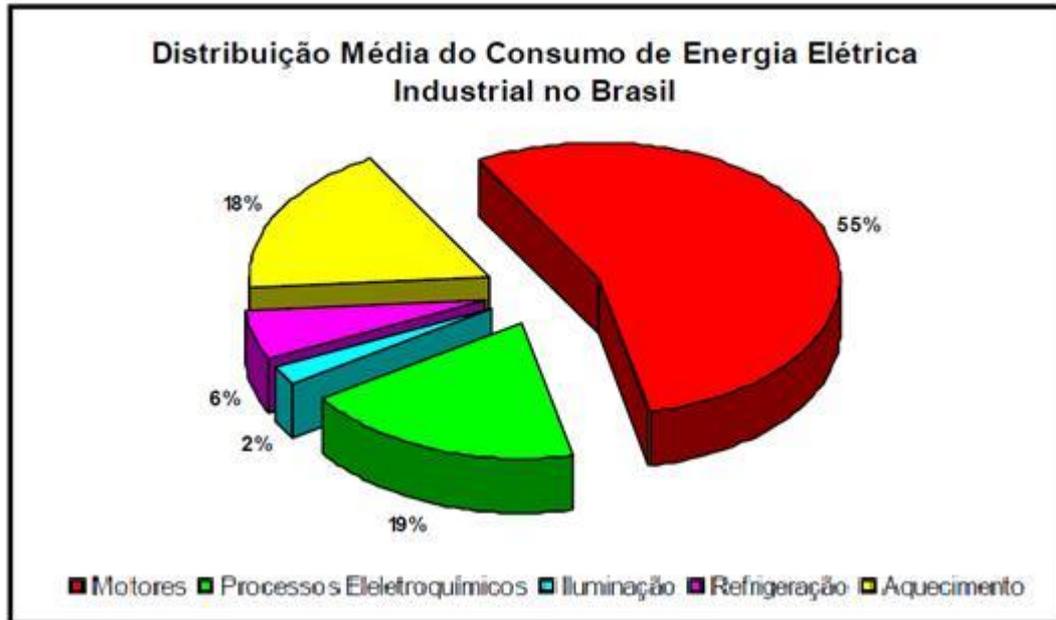


Figura 1 – Distribuição do Consumo de Energia Elétrica por Setor



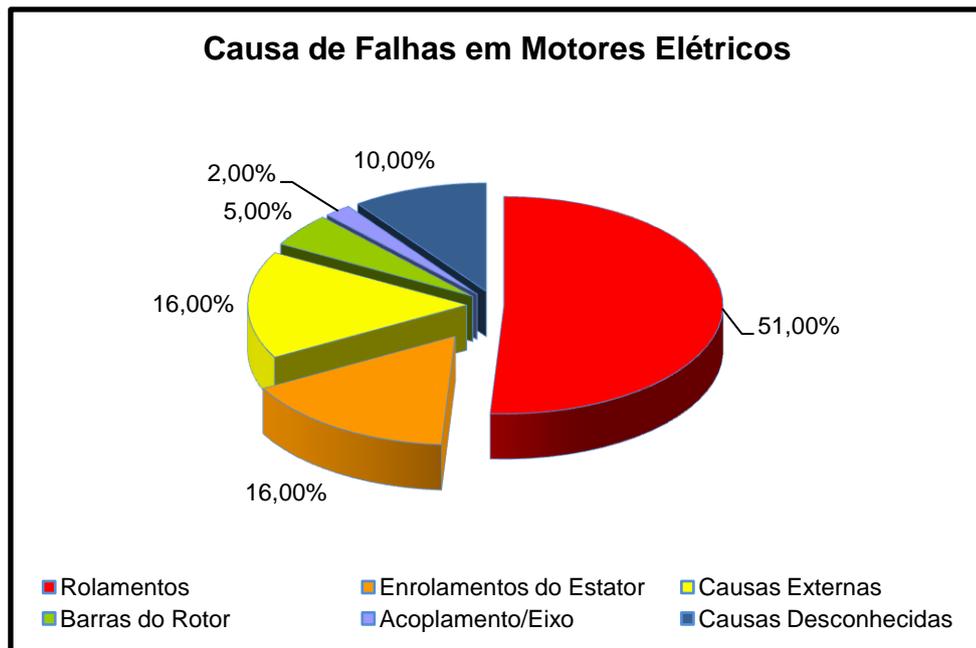
**Figura 2 – Distribuição do Consumo de Energia nas Indústrias**

Assim sendo, em torno de 26% da **energia elétrica** consumida no Brasil decorre do uso de motores elétricos pela indústria.

Salvo exceções em segmentos específicos, observa-se no parque fabril brasileiro a predominância de motores elétricos com mais de dez anos de funcionamento, instalações elétricas mal dimensionadas e equipes de manutenção com cultura técnica simplória, restrita a manutenção corretiva. Estes fatores contribuem, sem dúvida, para redução da vida útil e do desempenho mecânico e, por conseguinte, elétrico, dos motores instalados.

De acordo com a Electrical Apparatus Service Association (EASA) [3], a maior parte das falhas ocorridas em motores elétricos é decorrente de problemas nos mancais/rolamentos dos motores, de forma que a natureza e solução deste tipo de problema são de origem mecânica, e a realização de medições apropriadas para prever a falha é de fácil entendimento e reduz drasticamente a importância deste tipo de evento. Entretanto, a segunda maior causa de falhas é de origem elétrica, chegando a 16% do total de falhas e ocorrem nos enrolamentos do estator, devido principalmente a sobretensões e sobrecargas.

Nas falhas em decorrência de sobretensão e sobrecarga, as proteções utilizadas ou não existiam ou eram inadequadas para as especificações do equipamento. A aplicação adequada de dispositivos de proteção possibilita a utilização otimizada dos motores, em suas capacidades máximas, sem prejuízo ou redução da vida útil do seu sistema de isolamento. Juntamente com a relevância dos demais dados, surge a necessidade de analisar as alternativas de proteção comumente utilizadas na proteção de motores elétricos em geral.



**Figura 3 – Estatística da Causa de Falhas em Motores Elétricos**

É comum que máquinas maiores, acima de 100cv, recebam das empresas que as utilizam, maiores investimentos financeiros em função do seu custo, inicial e operacional, e de suas funções nos processos. Estes investimentos podem ser na forma de projetos detalhados das instalações elétricas e de automação, contratação de pessoal específico da área de engenharia, treinamento das equipes de manutenção e planejamento da manutenção.

Entretanto, máquinas menores não recebem os mesmos recursos, mesmo nos casos em que detenham importância equivalente no processo. Desta forma, é natural entender que dos casos de falhas nos enrolamentos do estator, a maioria ocorra nestas máquinas, por representarem o maior número de unidades instaladas e por contarem com técnicas de proteção simplificadas.

## 1.1 OBJETIVOS

Com base nos dados apresentados, que denotam a importância deste tipo de máquina, este trabalho visa concentrar-se especificamente no entendimento do nível de sobrecarga ao qual estão expostos os Motores de Indução Trifásicos, Rotor de Gaiola de Esquilo (MITRGE) de na faixa de potências até 10cv instalados a jusante de dispositivos de proteção tradicionais. Para tal este trabalho apresenta uma maneira formal de construir a curva tempo-corrente (txI) da partida do motor de forma a comparar corretamente com as curvas de atuação dos elementos de proteção. Este método leva em conta somente o comportamento da corrente ao longo da partida do motor.

É necessário ainda o entendimento da dinâmica da máquina durante a partida, quanto ao conjugado e corrente em função da velocidade para comparação com o método proposto, e também dos limites térmicos aos quais as máquinas podem ser expostas sem ser permanentemente danificadas.

A partir desta comparação, podem-se verificar as interferências nos dimensionamentos dos elementos de proteção realizados através da corrente de partida, verificando o quanto estas máquinas estão expostas a condições específicas de sobrecarga que, ao ocorrer, causarão dano incremental e cumulativo a máquina e ao seu funcionamento, e ainda as consequências das interferências em regime permanente quanto a sobrecargas.

## **2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS**

Todos os elementos constituintes dos circuitos cuja proteção será analisada e comparada ao funcionamento do motor podem influenciar diretamente sobre os resultados e sobre a relevância da análise adotada àquele caso. Assim, apresentar-se-á uma contextualização de cada elemento constituinte, definindo o foco utilizado no decorrer trabalho.

### **2.2 MOTOR DE INDUÇÃO**

A máquina de indução ou assíncrona é a mais utilizada das máquinas em corrente alternada (CA) podendo ser utilizada como motor ou gerador. O enrolamento do estator cria um campo magnético rotativo que induz corrente alternada no enrolamento do rotor por efeito de transformador, sendo esta a origem do nome deste tipo de máquina [5].

Desta forma, a máquina de indução pode ser vista como um transformador generalizado em que potência elétrica é transferida entre rotor e estator conjuntamente com uma mudança de frequência e um fluxo de potência mecânica.

Existem duas configurações para o rotor podendo este ser do tipo bobinado ou gaiola de esquilo. No do tipo bobinado, o rotor consiste de um enrolamento polifásico, semelhante ao estator, cujos terminais são acessíveis em função de um conjunto de anéis e escovas.

Neste trabalho, será tratado apenas do motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo (MITRGE).

#### **2.2.1 MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR DE GAIOLA DE ESQUILO**

O motor de indução com rotor de gaiola de esquilo tem seu rotor configurado por condutores dispostos paralelamente entre si, e que são unidos nas suas extremidades por anéis

que os curto-circuitam. Em máquinas pequenas, as barras e os anéis são fundidos, formando uma peça única. Em máquinas de porte elevado, é necessário que o rotor seja montado, soldando as barras aos anéis.

A simplicidade de tal construção apresenta vantagens notáveis em relação ao rotor bobinado e constante no modelo de máquina mais utilizado atualmente. Algumas vantagens são decorrentes da ausência do conjunto anéis e escovas, tornando a fabricação do MITRGE mais rápida e barata, e com manutenção reduzida em comparação ao modelo de rotor bobinado.

Para correto e unívoco dimensionamento da proteção e dos dispositivos de manobra são necessárias as seguintes especificações:

- potência, tensão e corrente nominais;
- tipo de partida (direta leve, direta pesada, estrela-triângulo);
- coordenação tipo 1, 2 ou total;
- corrente de curto circuito no ponto da instalação.

### **2.3 CIRCUITOS DE PROTEÇÃO E COMANDO**

O conjunto de equipamentos que permite ligar e desligar um motor constitui o que se chama de “circuito de proteção e comando do motor”. São indispensáveis para a utilização segura e para a proteção do mesmo, permitindo:

- ligar e desligar o motor local ou remotamente;
- proteger o motor e a rede elétrica contra sobrecarga;
- proteger o motor e a rede elétrica contra curtos-circuitos e eventuais falhas ou que possam ocorrer no motor;
- permitir intertravamentos com o processo;
- oferecer total segurança ao operador.

Este circuito pode assumir diversas configurações conforme a aplicação do motor, número de enrolamentos, necessidade de inversão de rotação, necessidade de redundância, prioridade de investimento na instalação. Independentemente da configuração necessária para cada motor, os elementos que configuram o circuito de proteção e comando do motor são:

- elementos de proteção (curto circuito e sobrecarga);
- dispositivos de manobra (contadoras);
- dispositivos de comando (botoeira, contatos auxiliares, relés temporizadores, sinaleiros).

### **2.3.1 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO**

Serão analisados elementos de proteção de utilização geral e corriqueira, como fusíveis, disjuntores termomagnéticos fixos e ajustáveis e disjuntores-motor/relés de sobrecarga.

Para a análise do nível de sobrecarga ao qual um motor pode estar submetido quando da utilização de certas configurações de equipamentos de proteção, serão comparadas as curvas de atuação normalizadas destes equipamentos.

#### **2.3.1.1 FUSÍVEIS**

Um fusível, como definido pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [6], é um elemento de proteção contra sobrecorrentes constituído por um elemento de abertura de circuito que é aquecido e derretido pela passagem da sobrecorrente através deste. Desta forma o elemento chamado de fusível compreende todas as partes que formam a unidade capaz de realizar a função prescrita podendo, ou não, ser o dispositivo completo a ser conectado no circuito elétrico. A norma brasileira de fusíveis segue o padrão europeu [16].

<b>Tipo Fusível</b>	<b>Aplicação Típica</b>	<b>Faixa Operação</b>
gG	Aplicação geral. Essencialmente para proteção de condutores	Total
gM	Proteção de Motores	Total
aM	Proteção para circuitos de motores. Apenas curto-circuito	Parcial
gN	Fusível de ação rápida Norte Americano para aplicação geral, principalmente proteção de condutores (exemplo: Classe L e Classe J)	Total
gD	Fusível retardado Norte Americano para proteção de circuitos de motores e proteção de condutores (exemplo: classe AJT, RK5e A4BQ)	Total
aR	Fusível padrão IEC 269 para proteção de semicondutores	Parcial
gTr	Proteção de transformadores	Total
gR, gS	Fusível para produtores de condutores e semicondutores	Total
gL, gF, gI	Fusíveis para proteção de condutores (substituídos pelo tipo gG)	Total

**Quadro 1 – Fusíveis: Categorias de Aplicação**

Um fusível possui as seguintes características funcionais:

- combina os elementos sensores e interruptores em um único elemento;
- age de forma direta, em resposta a uma combinação de magnitude e duração da corrente que percorre o circuito;
- em geral, não inclui elementos para abertura manual e interrupção do circuito energizado, necessitando de outros dispositivos para realizar esta função (chaves seccionadoras para fusíveis);
- é um elemento monofásico. Somente os elementos nas fases submetidas a sobrecorrente respondem de forma a desenergizar as fases do circuito ou equipamento sob falta.
- após ter interrompido a sobrecorrente e o motivo da falta corrigido, a continuidade é restabelecida pela substituição do elemento sensível a corrente.

### 2.3.1.2 DISJUNTORES

Disjuntores, como definido pela IEEE [6], são dispositivos projetados para abrir e fechar um circuito por meios não automáticos e também abrir um circuito automaticamente

em condições predeterminadas de sobrecarga de corrente, sem dano a si próprio quando aplicado corretamente dentro das suas especificações. Um disjuntor é usualmente projetado para operação não freqüente, embora alguns tipos sejam adequados para operação freqüente.

Existem diversas classificações para disjuntores. Entre as classificações existentes, podem-se destacar:

- Corrente e tensão nominais;
- Nível de interrupção em curto circuito;
- Necessidade de manutenção;
- Tipo de disparador (térmico, magnético, termomagnético, eletrônico);
- Capacidade de ajuste dos parâmetros de disparo;
- Característica da curva de atuação térmica.

As principais normas pertinentes as especificações dos disjuntores são a NBR NM 60898 [10] e a IEC 60947-2 [15]

### 2.3.1.3 RELÉS DE SOBRECARGA TÉRMICOS

O relé de sobrecarga térmico é um dispositivo eletromecânico onde o deslocamento do contato é produzido pelo aquecimento de parte do relé sob a ação de correntes elétricas, resultando na operação dos contatos de força ou outra mudança abrupta que induza outro dispositivo a realizá-lo (contatoras) [6]. São divididos em classes de disparo, de acordo com a característica da curva e o tempo típico de abertura para uma determinada condição de sobrecarga de corrente [7].

As classes de disparo existentes são 5, 10A, 10, 20 e 30, e sua utilização decorre diretamente da inércia do sistema na partida do motor. A classe 5 está disponível apenas em alguns poucos fabricantes e em dispositivos com funcionamento eletrônico. As classes 10A e 10 são as mais comuns, encontradas em todas as marcas com facilidade no mercado e estão

associadas a tempos de partida normais. Por fim, as classes 20 e 30 estão disponíveis em boa parte dos fabricantes, e estão associados a tempos de partida prolongados.

**Tabela 1 – Classes de Disparo**

<b>Classe de Disparo</b>	<b>Tempo de Disparo <math>t_p</math> (s)</b>
5	$2 < t_p \leq 5$
10A	$2 < t_p \leq 10$
10	$4 < t_p \leq 10$
20	$6 < t_p \leq 20$
30	$9 < t_p \leq 30$

Os tempos de disparo descritos significam que o dispositivo pode atuar a partir do limite inferior de tempo, entretanto o dispositivo deve atuar em tempos inferiores ao limite superior. É possível ainda encontrar fabricantes com faixas de tempo de disparo reduzidas (ou seja, com maior valor inferior e valor superior igual) aumentando a precisão quanto à proteção projetada.

#### 2.3.1.4 SENSORES DE TEMPERATURA

As proteções térmicas com termostatos, termistores (PTC) e termoresistores (RTD) constituem soluções de aplicação específica e comumente mais onerosas. Termistores e termostatos são encontrados em máquinas a partir de 15cv em baixa tensão. Os RTDs são destinados principalmente a máquinas de alta tensão, sendo utilizados em máquinas de baixa tensão somente para aplicações críticas [8].

A utilização de sensores de temperatura na proteção de motores depende da sua especificação no momento da fabricação do motor e torna-se possível projetar proteções de inibição de partida em função de reserva térmica do motor a partir de modelos térmicos de primeira ordem, redes neurais e outras técnicas de proteção por temperatura, ligadas ou não a sobrecargas ou sobrecorrentes. O interesse neste projeto é analisar situações comumente encontradas nas instalações e motores de menor porte, desta forma estas proteções não serão analisadas.

### 2.3.1.5 RELÉS ELETRÔNICOS

Existem dispositivos eletrônicos com a capacidade de prover conjuntos de proteções as máquinas elétricas, muitas delas referentes à sobrecarga nos enrolamentos, outras referentes à temperatura. Uma característica destes dispositivos é a de que possuem ajustes nas suas curvas de atuação, seja através da seleção de curvas pré-definidas, realização de curvas personalizáveis, curvas de atuação dependente da tensão aplicada, da velocidade ou da temperatura do motor.

Neste último caso, das temperaturas, cada relé possui lógica específica, onde alguns estimam a temperatura pelas correntes de seqüência positiva e negativa, e outros medem efetivamente a temperatura do motor, projetando, através de modelos térmicos matemáticos de primeira ordem, redes neurais ou outro, a reserva térmica do motor, a evolução da temperatura para certos carregamentos ou outros aspectos pertinentes [4] [11]. Além dos relés dedicados para proteção, conversores de frequência também possuem proteções eletrônicas contra sobrecarga.

### 2.3.2 CONTADORAS

Contadoras são dispositivos que ao receber sinal elétrico estabelecem ou interrompem um circuito elétrico com corrente nominal de pelo menos 5 (cinco) ampéres em seus contatos principais. Podem ser operadas repetidamente [6].

As contadoras (assim como os relés térmicos) devem ser especificadas de acordo com um critério de coordenação quanto ao nível de curto circuito no ponto da instalação e com os danos aceitos durante a operação sob este curto circuito [7].

- Coordenação Tipo 1: é aceitável que em caso de curto circuito os dispositivos sejam danificados. O circuito de partida pode não ser capaz de operar e deve

ser inspecionado; se necessário, a contatora e/ou o relé térmico deve(m) ser substituídos e o disjuntor rearmado.

- Coordenação Tipo 2: em caso de curto circuito, a contatora e o relé térmico não devem ser danificados, enquanto a soldagem dos contatos da contatora é permitida desde que sejam facilmente separáveis e sem qualquer deformação significativa.
- Coordenação total: nenhum dano ou risco é aceito para os dispositivos que compõem a partida do motor e o retorno em serviço pode ser feito sem inspeção ou manutenção.

## **2.4 SOBRECARGA TÉRMICA**

Em MITRGE de pequeno porte há maior sensibilidade quanto à sobrecarga térmica no estator, independentemente das condições de operação, enquanto nas de porte elevado esta limitação térmica ocorre no rotor para condições de escorregamento elevado e no estator para funcionamento em regime permanente. O enrolamento do estator e a gaiola do rotor de um MITRGE podem exceder as temperaturas para os quais seu isolamento foi projetado em função de um número considerável de razões. Algumas delas são:

- travar na partida, ou seja, permanecer com velocidade zero e tensão aplicada aos enrolamentos do estator. Isto pode ocorrer em caso de nível de tensão baixo, alimentação desequilibrada e/ou problemas mecânicos.
- falhar ao partir em acelerar até sua rotação nominal em função de conjugado de aceleração inadequado, permanecendo neste ponto de operação, eventualmente sem ventilação adequada.
- sobrecarga mecânica contínua estando próximo de sua rotação nominal.
- alta temperatura ambiente ou limitação na capacidade de ventilação.

- número de partidas por unidade de tempo acima do projetado para a máquina.
- presença de harmônicos

Das causas citadas, as pertinentes para o objeto deste trabalho são a primeira, a segunda e a terceira, onde a sobrecarga caracteriza-se por qualquer condição que demande sobrecorrente por tempo suficiente, capaz de elevar a temperatura dos enrolamentos do estator acima do limite imposto pela classe da isolação.

Como referência, pode-se considerar que o isolamento tem uma vida útil de 25000hrs sob temperatura nominal da respectiva classe. O aumento de temperatura causa deterioração gradativa da isolação, numa taxa de 50% da vida útil para cada 10°C de temperatura de operação contínua.

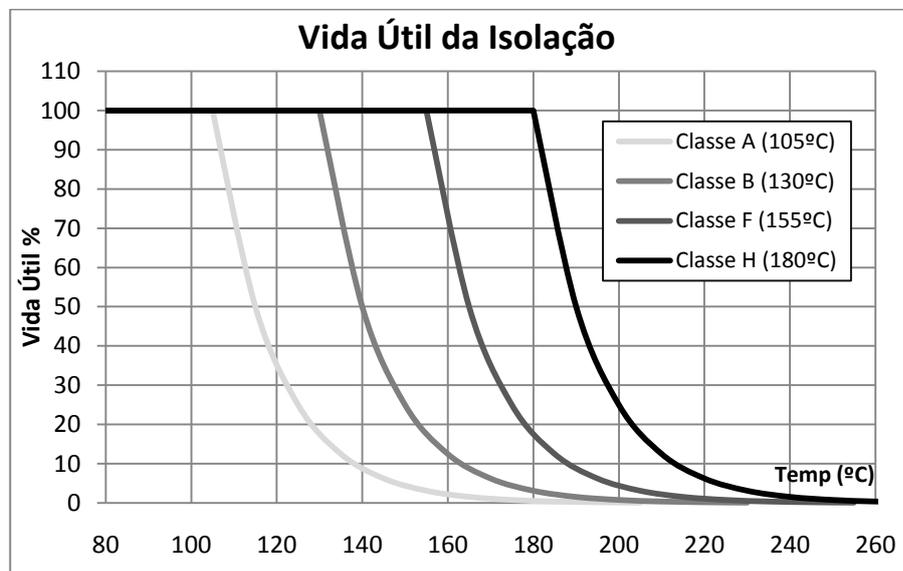


Figura 4 – Classes de Isolamento e Vida Útil

### 3 TIPOS DE CURVAS TEMPO-CORRENTE (txI vs. Ixt)

Curvas do tipo tempo vs. corrente são o padrão aceito pela indústria para prever a operação de dispositivos e analisar o comportamento de seletividade sob sobrecarga e condições de falta. Interpretações conservativas das curvas desenhadas têm sido suficientes ao longo de muitos anos e provêm desempenho aceitável. Entretanto, o aumento na ênfase em melhor seletividade, enquanto ainda se busca proteção otimizada de equipamentos, demanda predições mais precisas e, portanto, melhores interpretações das curvas [14].

Para projetar corretamente a proteção contra sobrecarga de um motor, suportando também a corrente de partida, deve-se comparar a curva de atuação (txI) do elemento de proteção com a curva de partida do motor e sua curva de suportabilidade térmica (txI). As duas últimas devem ser apresentadas observando condições de tensão e escalas conforme normativa pertinente [9]

Os dados do motor (curvas conjugado/corrente versus rotação) não são, em geral, de fácil obtenção ou fornecidos pelos fabricantes e o que se observa na prática é que projetistas realizam o ensaio de partida sob carga do motor (Ixt), e utilizam esta curva, em conjunto com as curvas de atuação, em um mesmo gráfico, para determinar o elemento de proteção adequado. Esta prática, entretanto, apesar de fornecer uma solução simples e com resultado aparentemente satisfatório, é inadequada do ponto de vista teórico, pois a curva de atuação do dispositivo de proteção é diferente da curva da corrente de partida do motor em um aspecto conceitual. A seguir, apresenta-se esta distinção.

#### 3.1 CURVA DE TEMPO DECORRIDO

O tipo de curva aqui denominado de curva de “Tempo Decorrido” é o tipo de curva mais intuitivo, onde “I” é o valor RMS da corrente passante por uma das fases do elemento de

proteção/enrolamento de fase do motor, e “t” é o instante de tempo em que cada corrente ensaiada ocorreu. Quanto ao motor, a curva da corrente de partida ensaiada trata-se de uma curva do tipo  $I_{xt}$  deste tipo e pode ser observada na figura 5. No momento, a curva é apresentada a fim de ilustrar as diferenças, e os detalhes do motor e das condições de partida serão vistos em 4.1.

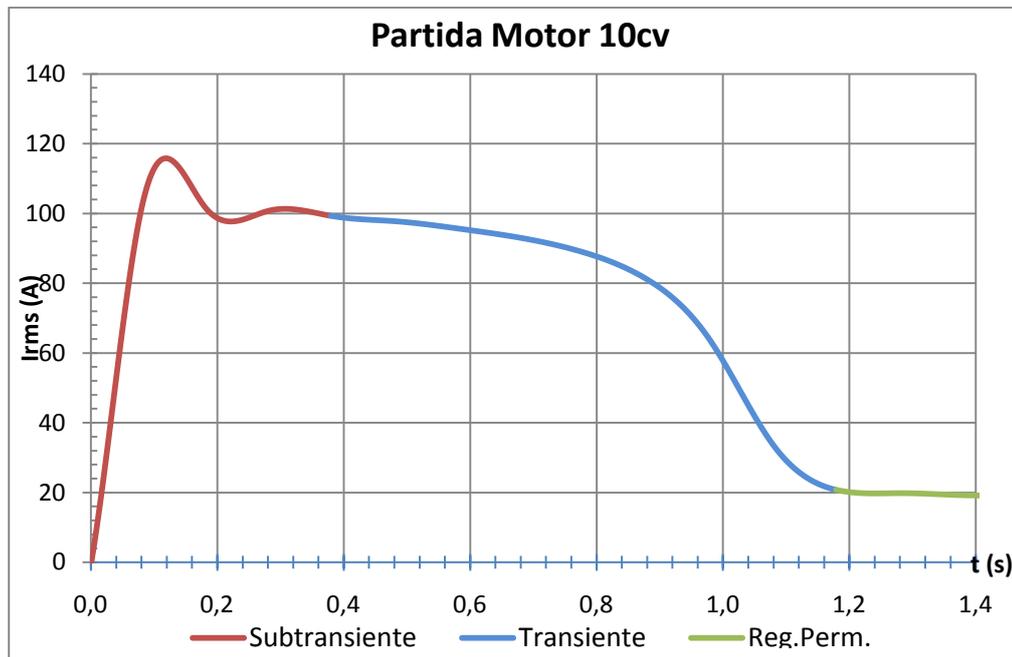


Figura 5 – Curva de partida “Tempo Decorrido” de motor de 10cv com carga de inércia

### 3.2 CURVA DE TEMPO DE DURAÇÃO

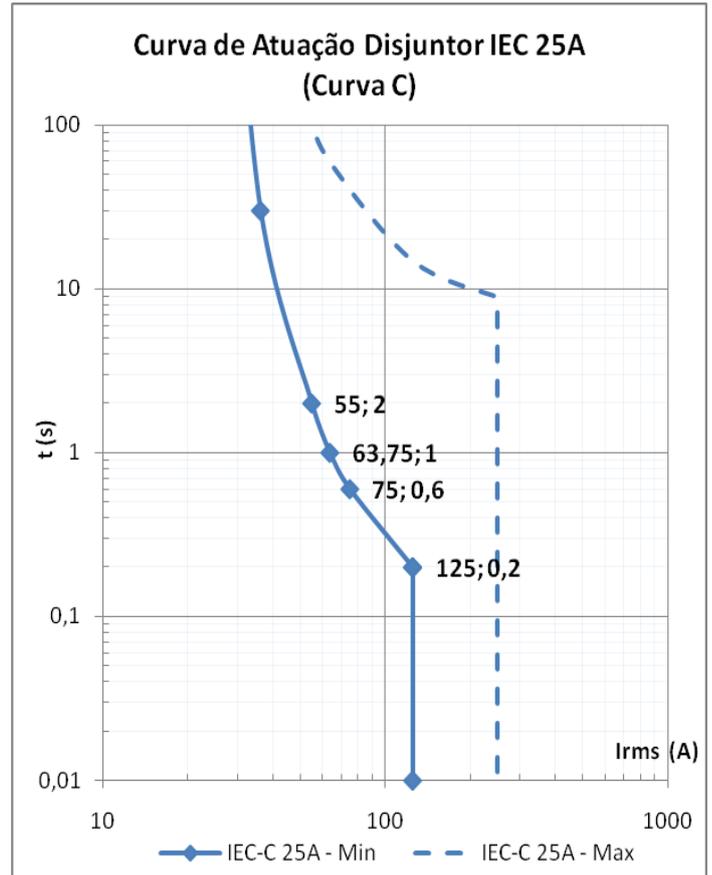
Quanto ao elemento de proteção, a curva é do tipo  $t \times I$ , onde “I” é o valor RMS da corrente passante por uma das fases do elemento de proteção/borne do motor e “t” é o tempo de duração desta corrente. É importante saber para quais condições a curva está desenhada e neste caso é comum pressupor que o elemento não possuía correntes de qualquer magnitude nos instantes anteriores, sendo chamada de curva a frio. Sempre que necessário, e previsto em norma, esta mesma curva é apresentada considerando um ou mais pontos de operação. Tipicamente, apresenta-se o ponto de operação onde o elemento está sob corrente nominal, sendo chamada de curva a quente.

Outro dado importante é para o caso onde o elemento de proteção for utilizado de maneira diferente da usual, como no exemplo onde nem todos os pólos são utilizados. É o caso de um motor monofásico ligado em um elemento de proteção trifásico. No caso de uma ligação fase-neutro, é possível simular uma ligação trifásica fazendo à corrente passar por todos os pólos e validando a utilização da curva. Já no caso de uma ligação fase-fase, um dos pólos ficará, invariavelmente, sem utilização. Em muitos casos tal ligação modifica o comportamento tempo-corrente do elemento e esta alteração deve ser considerada.

No caso dos relés térmicos, a existência de carregamento elétrico nominal reduz o tempo de atuação de 25% a 30% [19]. Para o caso de falta defase, ou de carga ligada a apenas dois pólos também há redução no tempo de atuação, porém menos acentuada.

Na figura 6 apresenta-se um trecho da curva de atuação de um disjuntor do tipo minidisjuntor, ou também chamado disjuntor IEC, com corrente nominal de 25A, curva C. A área entre as duas curvas é a região de operação do disjuntor. Pode-se observar duas curvas duas do tipo txI no mesmo gráfico.

A curva sólida representa as correntes de atuação mínimas e a curva tracejada as correntes de atuação máximas definidas em norma [10] em função do tempo de duração das correntes. Os valores de alguns pontos da curva sólida estão evidenciados, onde o primeiro valor é “I” e o segundo é “t” “Tempo de Duração”.



**Figura 6 – Curva tipo “Tempo de Duração” disjuntor IEC 25A**

Desta forma, os dois tipos de curva, apresentados em 3.1 e 3.2 não podem ser observados em um mesmo gráfico, uma vez que o eixo “t” representa informações diferentes. Para que isto seja possível, é necessária a análise da curva da corrente de partida ensaiada, de forma a obter outra curva, compatível com a curva do elemento de proteção quanto aos tempos de duração das correntes durante a partida do motor.

A fim de estabelecer uma analogia entre os dois tipos de curva mencionados, na figura 6 estão os degraus de corrente ao qual o disjuntor foi submetido e os tempos totais que tais correntes perduraram até abertura do circuito pelo elemento de proteção [11] [12]. As curvas de “Tempo Decorrido” que geraram os pontos ilustrados da curva de “Tempo de Duração” da curva 6 estão apresentada na figura 7.

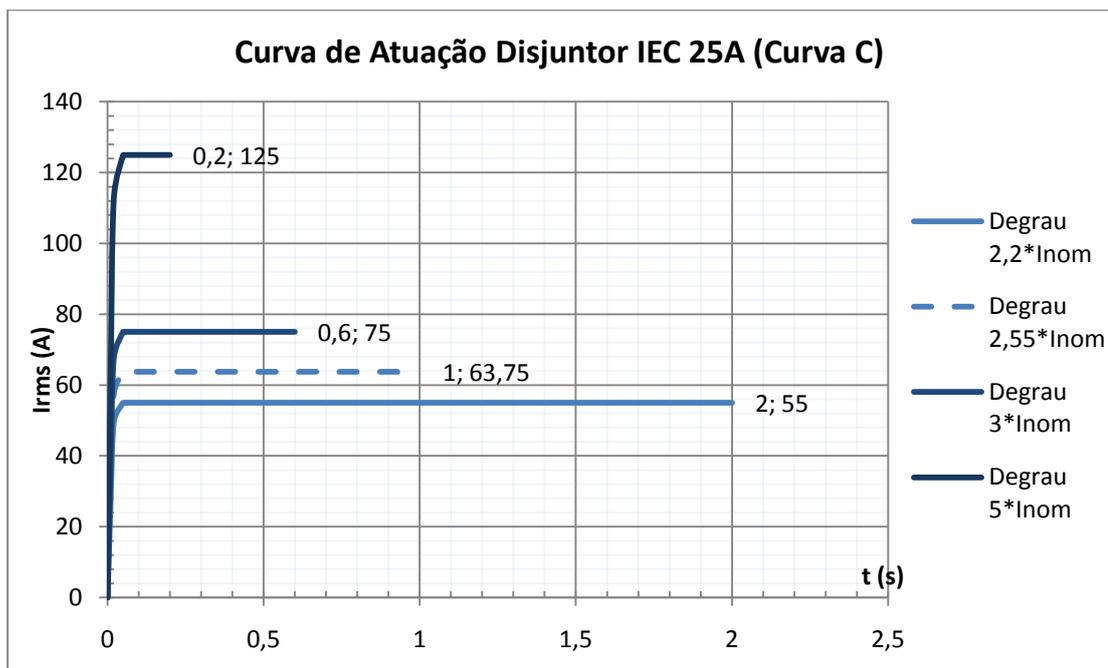


Figura 7 – Curvas tipo “Tempo Decorrido” até interrupção de disjuntor IEC 25A

Concluindo a analogia, estas curvas podem, sim, ser apresentadas lado a lado com a curva de corrente de partida do motor em um mesmo gráfico, do tipo “Tempo Decorrido”, embora não possuam um significado pertinente quanto à proteção da máquina.

## 4 MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS

### 4.1 BANCADA DIDÁTICA

Para que os métodos propostos fossem testados, foi necessária a obtenção de coleção de dados das correntes de partida. Os ensaios foram realizados aproveitando parcialmente as funcionalidades da Bancada Didática WEG de Controle de Velocidade Motores AC [13], existente no LMEAE/UFRGS. O diagrama de ligação utilizado encontra-se no Apêndice A.



Figura 8 – Bancada didática

Esta bancada dispõe de:

- Motor trifásico Alto Rendimento Plus W21, 1,5cv (1,1kW), 4 pólos, 380V(Y)-220V( $\Delta$ ) – ligado em 220V, 60Hz;
- Conversor de Frequência CFW-09 com controle de velocidade externo, resistor de frenagem;
- Acoplamento elástico ao freio Foucault eletromagnético com ajuste de corrente;

- Disjuntor motor, interruptor diferencial e fusíveis Diazed 16A para proteção de toda a bancada;
- Conjunto de comutadoras e contatos auxiliares para elaboração de atividades e simulação de testes (falta de fase, fuga de corrente, falta de referência de velocidade no inversor, sobrecorrente na saída do inversor);
- 2 Dinamômetros;
- Transformador de entrada, permitindo alimentação trifásica em 220V, 380V ou 440V.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, fez-se necessária a utilização de dados provenientes de outras máquinas, para comparação. Na indisponibilidade de equipamento de medição portátil para medição nas plantas industriais, utilizou-se uma coleção de dados medidos em 2008, de um motor da marca WEG, com mais de 10 anos de funcionamento. Seguem alguns dados do motor:

- Motor trifásico standard WEG, 10cv, enrolamento duplo (6 pólos e 8 pólos);
- 380V(Y)-220V( $\Delta$ ) – ligado em 380V, 60Hz;

Na ocasião da medição o motor de 10cv encontrava-se instalado no processo, que consiste de rolo metálico utilizado na bobinagem de parte ativa de transformadores, apresentando inércia moderada.

## **4.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO**

Para medição de corrente durante os testes na bancada didática, utilizou-se resistor shunt em série com uma das fases do motor e osciloscópio digital Agilent DSO3102A.



**Figura 9 – Osciloscópio Digital Agilent DSO3102A**

Dos equipamentos disponíveis para medição, o DSO3102A, apesar de taxa de amostragem adequada as necessidades (na faixa de 1ks/s), não dispunha das especificações medição mais adequadas, uma vez que não registra medidas trifásicas ou de valores RMS das correntes e os dados gravados possuem formato em notação científica com apenas 3 algarismos significativos. Entretanto, sua comunicação com o computador é simplificada pela existência de porta para barramento de comunicação Universal Serial Bus (USB) direta ao computador (ou impressora) através de cabo, e também USB específica para memória flash portátil.

As correntes RMS foram calculadas posteriormente, já no computador, a partir das medidas de corrente instantânea, senoidal, coletados pelo osciloscópio. Esta etapa insere uma oscilação nos gráficos de corrente, em função do número de amostras utilizadas no cálculo discreto, tratada ainda com a aplicação de uma média móvel.

Todo o tratamento nos dados insere um erro adicional, mas mantém a coerência entre os valores. Sem dúvida, a utilização de equipamento específico para aplicação eliminaria esta etapa do processo dando mais precisão às medidas utilizadas.



**Figura 10 – Analisador de Energia Embrasul RE6000**

Já a coleção de dados antiga, referente ao motor de 10cv, foi realizada utilizando equipamento de medição RMS, adequada a transientes, com ajuste de TC adequado ao nível de corrente e software para tratamento dos dados. Das potencialidades de medida do instrumento em relação aos dados medidos na oportunidade, é pertinente o fato de que na oportunidade, o equipamento não havia sido programado para registrar **transientes** de corrente, situação de interesse na partida dos motores.

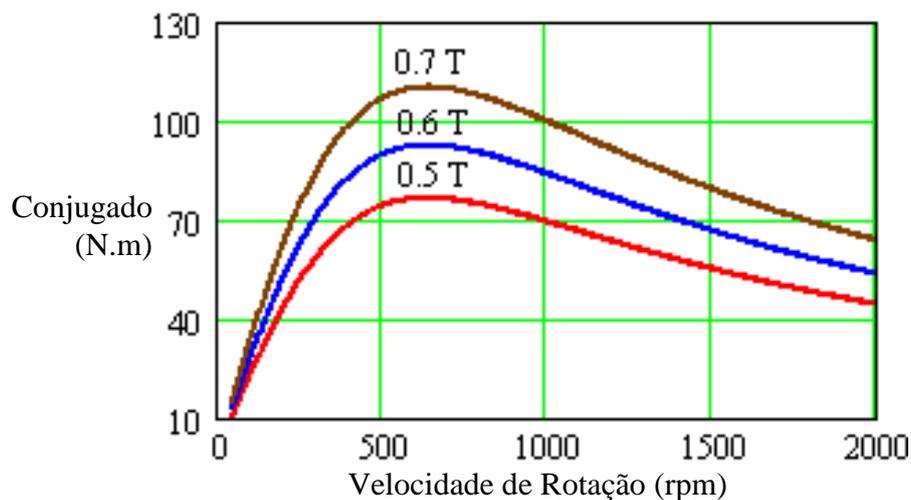
Assim os dados de corrente, apesar de medidos na taxa máxima de amostragem, que é de 8kHz, foram registrados na memória com a taxa **normal** de 10Hz e durante toda a partida foram registrados apenas alguns pontos. A fim de aplicar os mesmos métodos em ambos os conjuntos de dados, o conjunto de dados antigo foi interpolado por splines cúbicas através do software Matlab resultando em coleção de dados comparável aos dados coletados.

### **4.3 ENSAIOS**

Realizaram-se ensaios de partida de um motor trifásico. Nos ensaios, objetivou-se levantar as curvas de corrente de partida para diferentes condições de carga mecânica. Entretanto, nestes ensaios, observou-se através dos dinamômetros e dos ajustes de carga no freio de Foucault que para se alcançar o conjugado nominal, a corrente necessária excedia a

corrente nominal. Atribuiu-se essa ocorrência ao nível de tensão abaixo do nominal, oscilando entre 210 e 215V nos terminais do motor.

O freio de Foucault depende da velocidade de giro do rotor/disco para gerar conjugado resistente [17] caracterizando uma carga variável no tempo ao longo da partida e constante em regime. O conjugado resistente aumenta até certa velocidade em função da interação do campo aplicado ao movimento do disco, e a partir de certa velocidade decai em função da diminuição da penetração do campo no disco. A velocidade de giro do motor em que este fenômeno ocorre depende das características do circuito magnético como disposição das bobinas, espessura do disco e tamanho do entreferro. Para ilustrar o fenômeno pode ser observada a figura 11, referente ao freio utilizado na referência [17], onde se observa o conjugado resistente produzido em função da velocidade de rotação e da indução associada.



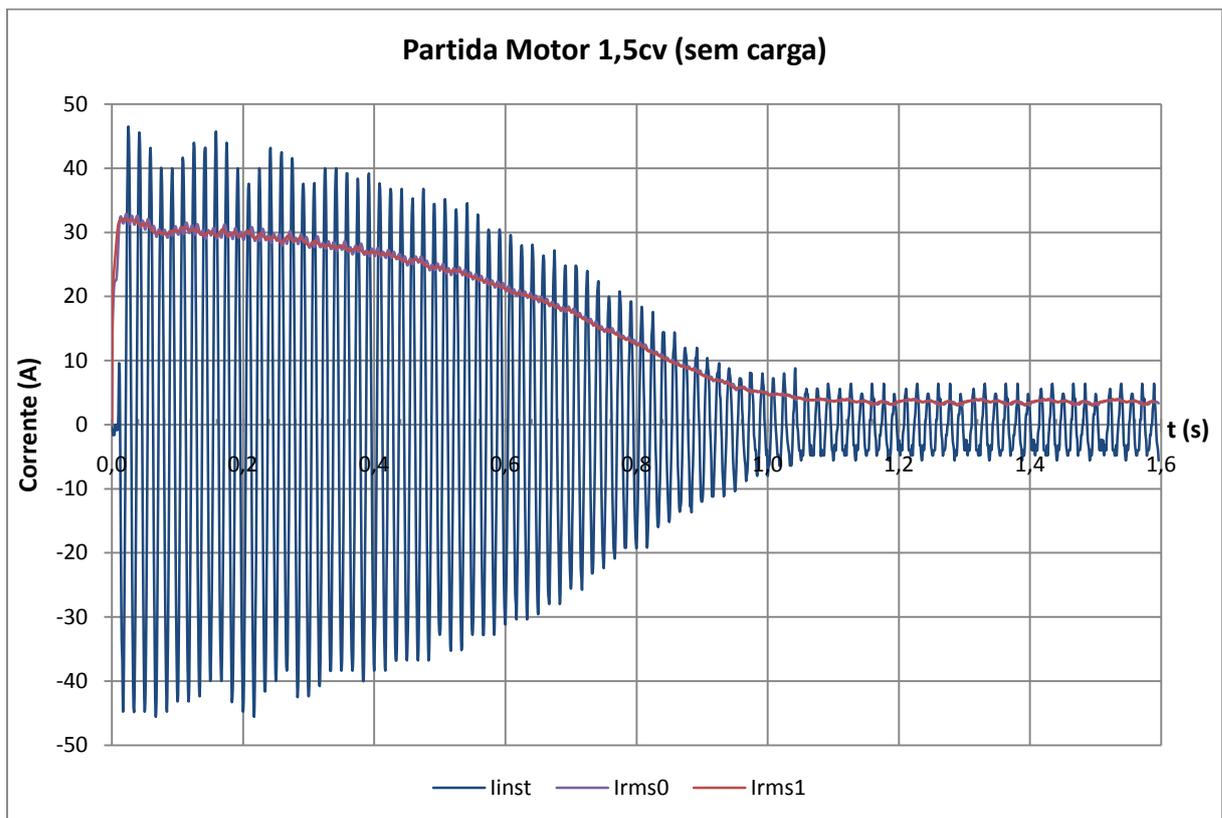
**Figura 11 – Curva característica de Conjugado vs. Rotação de freio eletromagnético**

Para ensaio de uma situação mais crítica seria adequada a utilização de carga de elevada inércia, juntamente com o freio para simulação de carga conjugado resistente variável com a velocidade.

Desta forma, adotaram-se como valores de carga os percentuais de corrente nominal, observados em regime, em substituição aos percentuais de conjugado nominal sendo o conjunto ensaiado sob as seguintes condições de corrente:

- $83\% * I_{\text{Nominal}}$  – Sem atuação do freio eletromagnético. Apenas disco de inércia.
- $100\% * I_{\text{Nominal}}$  – leitura dos dinamômetros de aproximadamente 70% da carga mecânica.
- $112\% * I_{\text{Nominal}}$  – leitura dos dinamômetros de aproximadamente 100% da carga mecânica.

Nas figuras 12 e 13, pode-se observar nos dados medidos, denominados de  $I_{\text{inst}}$  (corrente instantânea), e os dados tratados numericamente,  $I_{\text{rms0}}$  (corrente RMS) e  $I_{\text{rms1}}$  (corrente RMS após média móvel). Observou-se que apesar da variação de carga no eixo do motor, a corrente máxima e o tempo de subida da corrente não sofreram variação. O efeito da variação de carga foi especificamente o aumento do tempo de partida até o regime permanente.



**Figura 12 – Ensaio da corrente de partida motor 1,5cv sem carga**

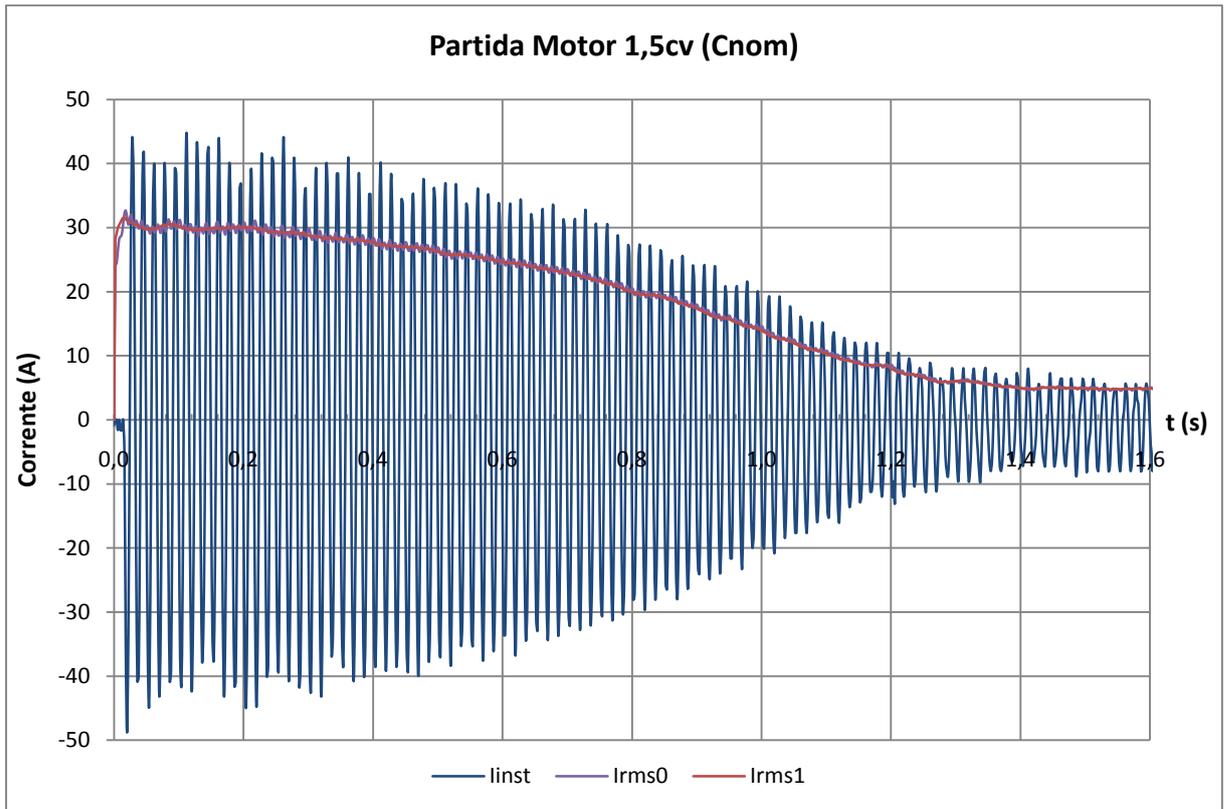


Figura 13 – Ensaio da corrente de partida motor 1,5cv com carga (Cnom)

#### 4.4 SOFTWARE

Foram desenvolvidas planilhas em EXCEL de forma a realizar todos os cálculos, gráficos e análises de forma prática e semi-automática, a fim de propiciar visualização rápida e ágil dos resultados de todas as iterações dos ensaios.

## 5 METODOLOGIAS PARA ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção apresentam-se as alternativas estudadas para tratar os dados de corrente de partida do motor a fim de produzir curva do tipo “Tempo de Duração”, comparável as curvas dos elementos de proteção, a partir das curvas de “Tempo Decorrido”. Objetivando uma análise simples da curva de partida de motores de indução os métodos apresentados foram utilizados para descrever o comportamento do motor apenas a partir da corrente, sem a utilização de tacômetros e dinamômetros.

Convém lembrar que as curvas originais de partida dos motores não devem ser diretamente comparadas aos gráficos dos dispositivos de proteção (conforme demonstrado no item 3), e estão representadas nos gráficos do tipo “ $t_x I$ ” justamente para fins de comparação com os gráficos “ $I_x t$ ”.

Na figura 14 observa-se curva típica da corrente de partida de motor, esta sim do tipo “Tempo de Duração”, fornecida pelo fabricante [8], juntamente com as curvas de suportabilidade térmica, e em conformidade com a IEEE Std 620 [9].

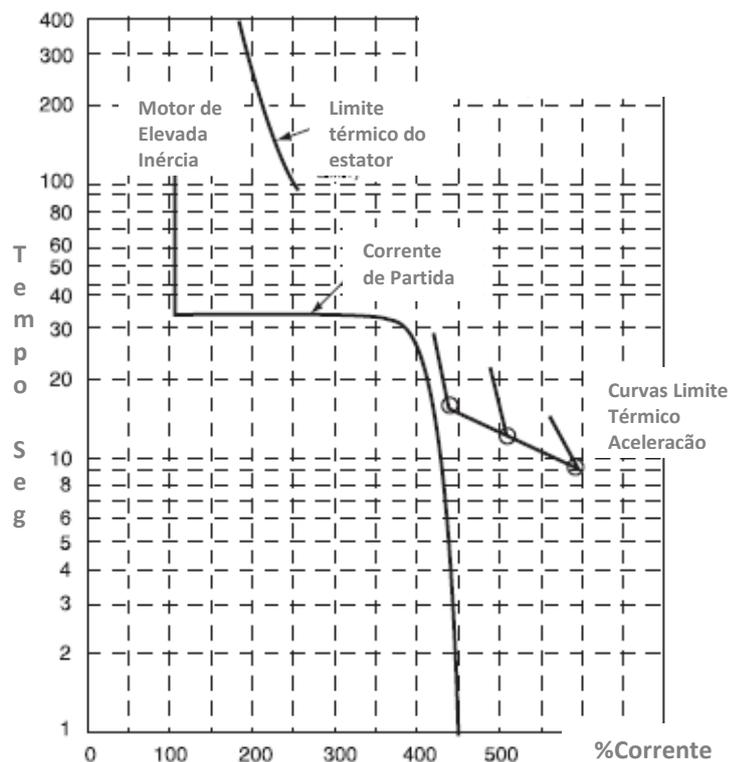


Figura 14 – Curva da corrente de partida “Tempo de Duração” e limites térmicos do motor

### 5.1 ANÁLISE NUMÉRICA DA CORRENTE DE PARTIDA

Uma alternativa para a obtenção de um conjunto de dados comparável a curva de atuação dos dispositivos de proteção é analisar numericamente os dados da corrente de partida

do motor. Apesar do tempo de duração total da partida de um motor ser de apenas alguns segundos, ainda assim é possível observar regiões bastante distintas. Uma distinção possível é em Subtransiente, Transiente e Regime Permanente, como ilustrado anteriormente na figura 5.

Entretanto, a curva de partida ensaiada foi dividida em diversos segmentos, a partir de critérios definidos para esta análise da curva. Foram utilizados dois critérios, o de percentual da corrente máxima e o de valor da derivada, que serão explanados a seguir.

### 5.1.1 SUBDIVISÃO POR NÍVEIS DE CORRENTE

Para os ensaios onde os valores medidos são de corrente instantânea, estes precisam ser tratados matematicamente, a fim de se obter como resultado final um gráfico de corrente RMS. O tratamento dado aos valores medidos foi o cálculo do valor RMS de 1 ciclo elétrico inteiro (8 ou 16 amostras, conforme o período de amostragem do ensaio), seguido de média móvel com número ótimo de termos, resultando na melhor convergência possível. Ainda assim, em função da origem dos dados o gráfico resultante apresenta elevado “ripple”.

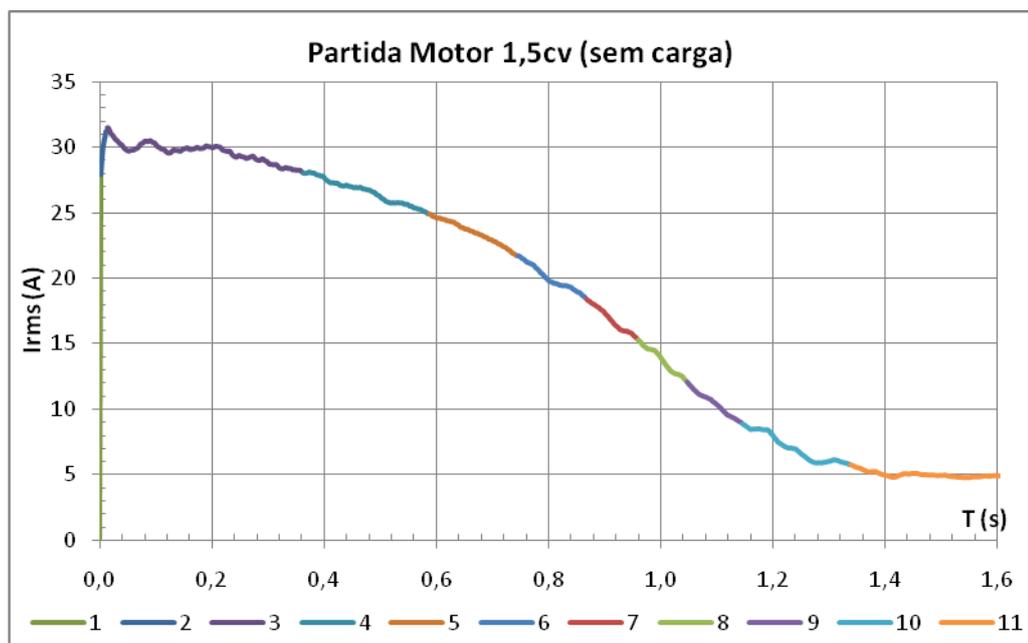


Figura 15 – Curva da corrente de partida, subdivisão por  $\Delta I = 10\% I_{max}$

Observou-se então o tempo de permanência da corrente dentro de faixas de corrente escolhidas, em conjunto com a média aritmética dos valores de corrente dentro de cada intervalo formando assim pontos de um gráfico “Ixt”. Estes pontos não compõem uma curva, mas delimitam uma região dentro da qual a corrente possui tal valor RMS durante o tempo ali apontado e, portanto, estão no formato “Tempo de Duração”.

Na figura 17, estão representados a curva original da corrente de partida do motor do tipo “Tempo Decorrido” (idêntica a figura 15), e os resultados obtidos a partir dos métodos de subdivisão níveis de corrente de 10% e 5% da corrente máxima.

### **5.1.2 SUBDIVISÃO PELA DERIVADA**

O segundo método distingue trechos da curva de “Tempo Decorrido” em função do valor absoluto da derivada entre dois ou mais pontos. Este método mostrou-se interessante do ponto de vista de identificação das regiões distintas da curva.

Os dados utilizados nesta análise foram aproveitados do banco de dados prévio, não tendo sido ensaiados nesta oportunidade, conforme citado anteriormente.

Entretanto, só é possível utilizá-lo quando a coleção de dados é proveniente de equipamentos de medição de corrente com característica RMS, uma vez que os dados de partida de motores coletados a partir destes equipamentos têm um comportamento instantâneo suave (sem “ripple”) e as oscilações medidas, se existirem, provêm de fato do processo, como pode ser visto nas oscilações registradas na figura 16.

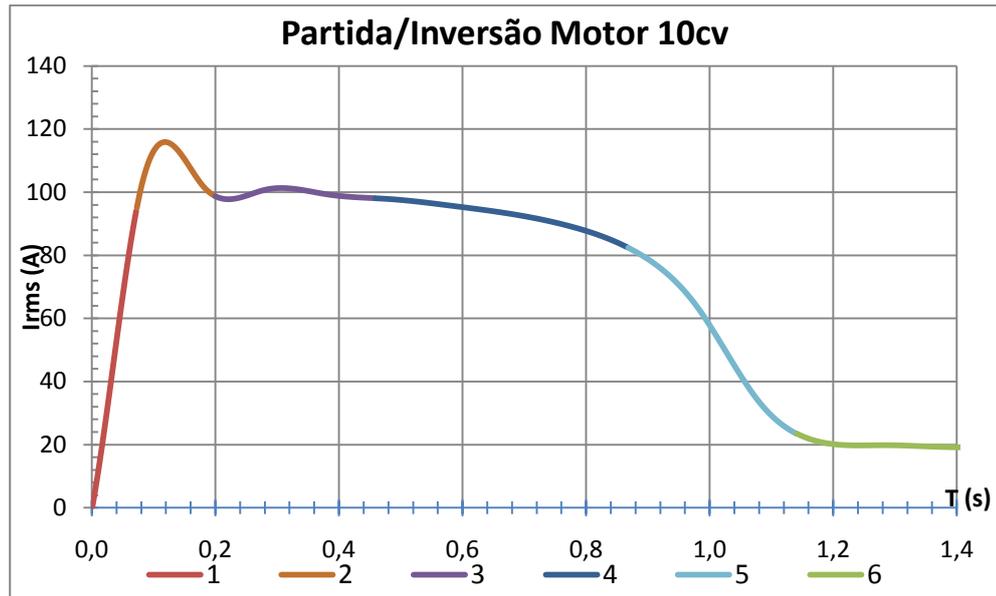


Figura 16 – Curva da corrente de partida, subdivisão pela derivada

Observou-se então o tempo de permanência da corrente dentro de faixas de derivada escolhidas em conjunto com a média aritmética dos valores de corrente dentro de cada intervalo, formando assim pontos de um gráfico “ $I_{xt}$ ”. Estes pontos não compõem uma curva, mas delimitam uma região dentro da qual a corrente possui tal valor RMS durante o tempo ali apontado e, portanto, estão no formato “Tempo de Duração”.

Na figura 18, estão representados a curva original da corrente de partida do motor (idêntica a figura 16), do tipo “Tempo de Duração”, e os resultados obtidos a partir dos métodos de subdivisão pela derivada (agrupado em 15 segmentos e 6 segmentos) e ainda pelo método da subdivisão por níveis de corrente de 10% da corrente máxima.

As conclusões pertinentes referente aos gráficos obtidos a partir dos métodos estão agrupadas e são discutidas no item 5.4.

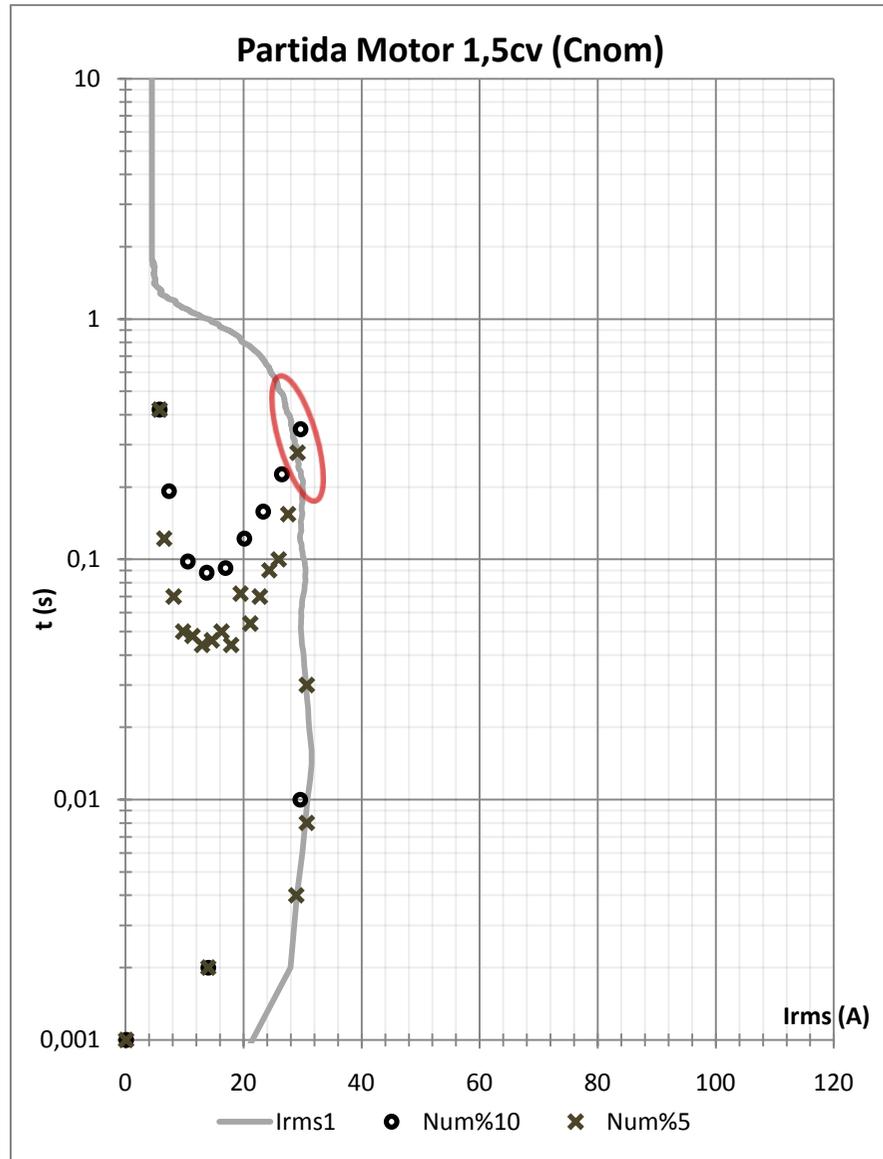


Figura 17 – Método Níveis de Corrente: "Curva  $I_{xt}$ " vs. "Pontos  $t_{xI}$ "

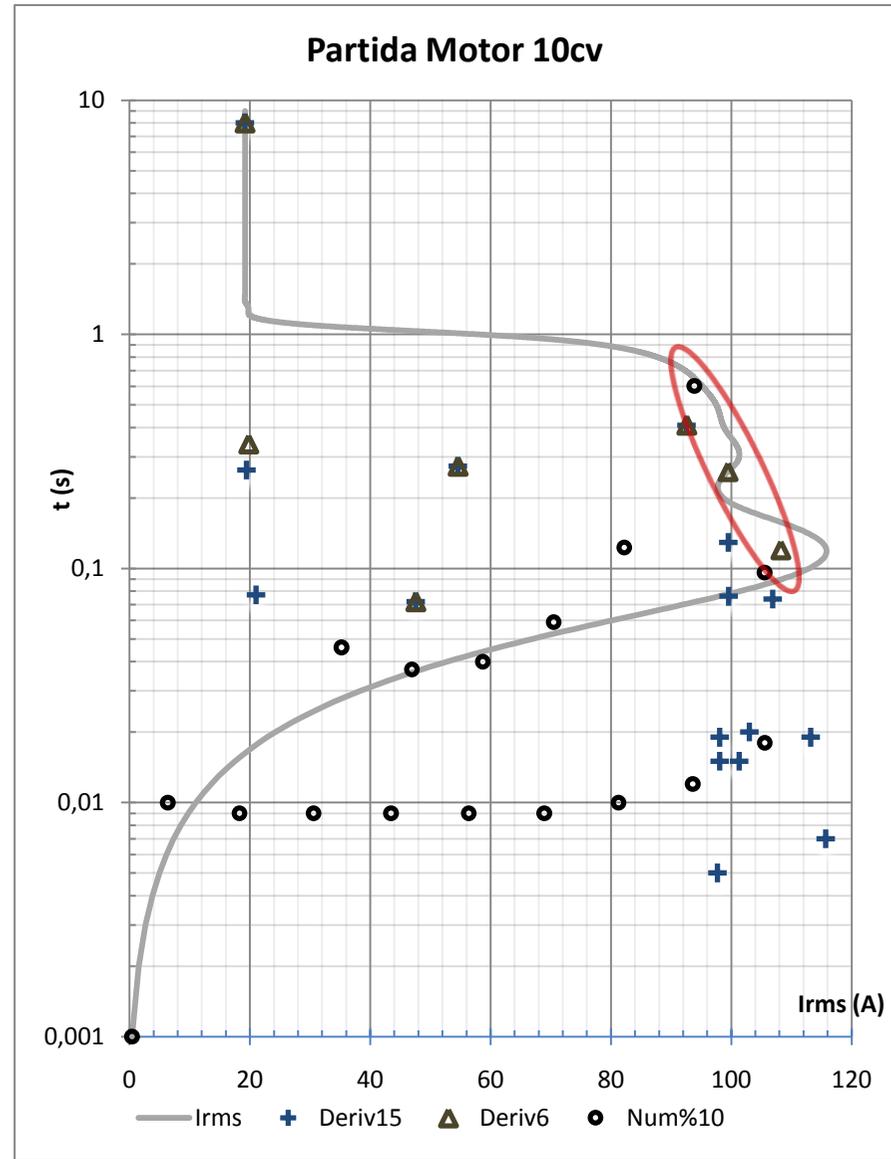


Figura 18 – Método Derivada: "Curva  $I_{xt}$ " vs. "Pontos  $t_{xI}$ "

## 5.2 MÉTODO DO CONJUGADO E CORRENTE VS. VELOCIDADE

O método descrito nesta seção é utilizado pelos fabricantes de máquinas elétricas para elaboração da documentação da máquina de acordo com a IEEE Std 620. Trata-se de uma aproximação que assume que a inércia da fonte de alimentação é significativamente maior (tipicamente dez vezes) que a inércia da carga acionada. Desta forma é considerada também tensão nominal aplicada aos enrolamentos do motor.

O tempo de partida do motor é definido como o tempo em que o motor acelera desde velocidade nula até a velocidade nominal, a carga nominal. Este é um método comum para cálculo do tempo de partida de um MITRGE.

Este tempo é importante, pois determina a duração de tempo que as correntes do estator excedem sua especificação nominal e que devem ser suportadas pelo motor, sem danos. Este tempo é baseado na segunda lei de Newton aplicada à rotação ( $C = J * \alpha$ ).

Partindo da equação diferencial [18]:

$$C_m = (J_m + J_l) * \frac{d\omega}{dt} + C_{atrito} + K_{fan} * \omega^2 + K_f * \omega + F * \omega$$

$$C_l = C_{atrito} + K_{fan} * \omega^2 + K_f * \omega + F * \omega$$

$$C_m = J_e * \frac{d\omega}{dt} + C_l$$

$$t_a = J_e * \int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} \frac{1}{\Delta C} * d\omega$$

Onde:

$\alpha$ : Aceleração angular (rad/s<sup>2</sup>)

$C$ : Conjugado (N·m)

$C_l$ : Conjugado médio da carga (N·m)

$C_m$ : Conjugado médio motor (N·m)

$J$ : Momento de Inércia (kg·m<sup>2</sup>)

$J_e$ : Inércia total conectada ao eixo (kg·m<sup>2</sup>)

$J_l$ : Momento de inércia da carga (kg·m<sup>2</sup>)

$J_m$ : Momento de inércia do eixo do motor (kg·m<sup>2</sup>)

$t_a$ : Tempo de aceleração (segundos)

$\omega$ : Velocidade angular (rad/s)

$C_{atrito}; K_{fan}; K_f; F$ : grandezas referentes ao conjugado resistente e constantes características da carga

E resolvendo-a pelo método das diferenças finitas, tem-se que o tempo de aceleração pode ser calculado usando a seguinte expressão:

$$t_a = \frac{J_e * \Delta\omega}{C_a} = \frac{J_e * (\omega_{i+n} - \omega_i)}{\frac{\sum_i^n (C_{mi} - C_{li})}{n - i}}$$

Onde:

$\Delta\omega$ : Variação de velocidade ao longo do tempo  $t_a$  (RPM ou rad/s)

$C_a$  : Conjugado médio de aceleração (N\*m)

$i$ : Índice do início do intervalo

$n$ : Índice do fim do intervalo

Para fins de cálculo o intervalo de tempo é arbitrariamente escolhido e quanto menor o intervalo, mais precisa a aproximação se torna. É comum escolher intervalos de 10% da rotação síncrona nominal ( $\Delta\omega = 0,1pu$ ). O próximo passo é estabelecer a o conjugado de aceleração médio ( $C_a$ ) em cada intervalo.

Para calcular, é necessário requisitar estas informações do fabricante da máquina, tipicamente fornecidas como curvas “Cx $\omega$ ” para o MITRGE e para a carga em questão. Pode-se, alternativamente, ensaiar o motor, levantando o conjugado e a corrente em função da velocidade, tornando o processo de instrumentação bastante complexo com a utilização de tacômetro e células de carga.

Estas curvas são, tipicamente, desenhadas usando o carregamento e velocidades nominais do equipamento. Todas as curvas devem ser convertidas para escalas, unidades e bases de referência iguais, a fim de calcular o conjugado resultante para aceleração. Quaisquer diferenças existentes entre a rotação do motor e da carga devido a reduções e polias requerem modificações em seu conjugado e inércia para correta aplicação.

$$C_2 = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right) * C_1$$

$$J_2 = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right) * J_1$$

Onde:

- 1: Índice de referência ao lado do motor
- 2: Índice de referência ao lado da carga

Os valores necessários para prosseguir o equacionamento podem ser determinados a partir da curva de “Cx $\omega$ ”. Os momentos de inércia da carga e do motor são somados, resultando no momento de inércia total a ser acelerado. Eventualmente, pode-se estimar o momento de inércia da carga ( $J_l$ ) através de:

$$J_l = \frac{m_l * r_l^2}{2}; \text{ para discos maciços girando em torno de seu eixo}$$

$$J_l = \frac{m_l * (r_{l1}^2 + r_{l2}^2)}{2}; \text{ para cilindros vazados girando em torno do seu eixo}$$

Onde:

$m_l$ : Massa da carga

$r_l$ : Raio girante da carga

$r_{l1}$ : Raio girante interno da carga

$r_{l2}$ : Raio girante externo da carga

Tais valores são freqüentemente disponibilizados pelos fabricantes, uma vez que os compradores precisam destas informações para formular seus projetos e cotações. Para

máquinas de grande porte, a curva do conjugado da carga é fornecida pelo comprador, uma vez que o equipamento é em geral de aplicação específica. Para máquinas menores como motores indústrias de uso geral, costuma-se considerar a carga com característica quadrática, ajustada com seu início na origem até atingir o conjugado nominal em velocidade nominal.

Nas figuras 19 e 20 são apresentadas curvas disponibilizadas por fornecedores de motores elétricos e dizem respeito aos motores ensaiados de 1,5cv e 10cv, respectivamente:

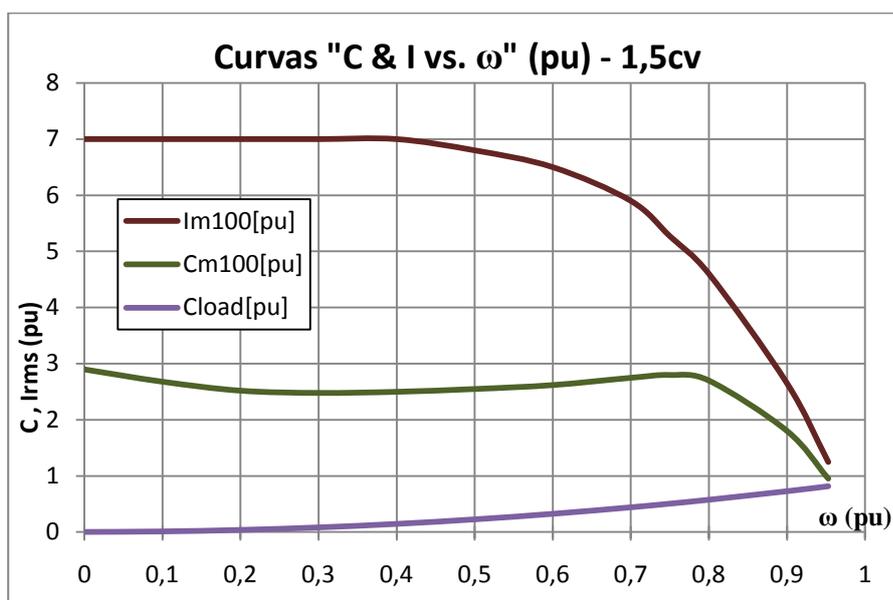


Figura 19 – Motor 1,5cv: Curva de conjugado e corrente vs. Velocidade

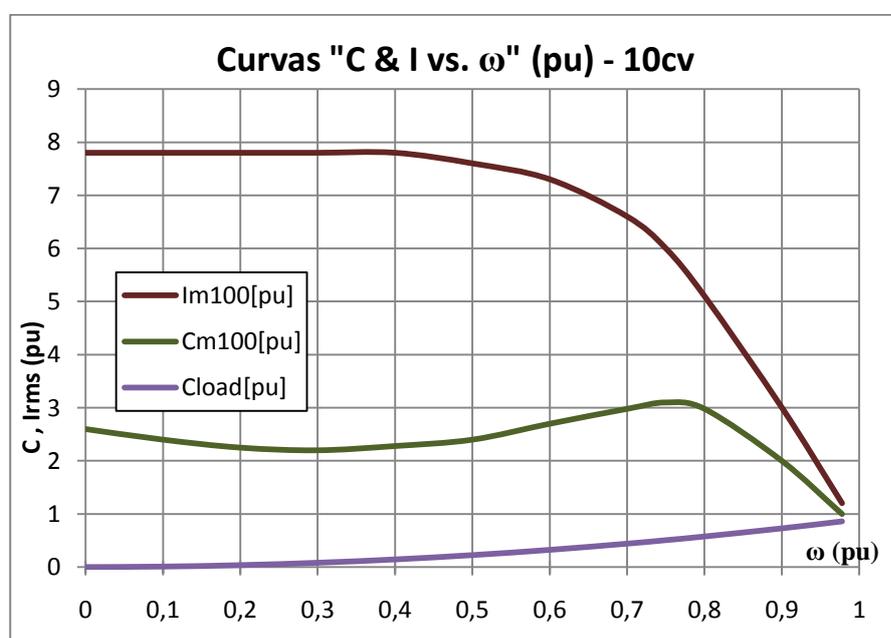


Figura 20 – Motor 10cv: Curva de conjugado e corrente vs. Velocidade

O conjugado entregue ao motor varia com o quadrado da tensão aplicada. Portanto, para condições de tensão inferior a nominal, deve-se observar para que o conjugado entregue a carga não se reduza abaixo do demandado pelo conjugado resistente. Já a sobrecorrente durante a partida do motor varia proporcionalmente com a tensão aplicada. Outros cálculos podem ser feitos para determinar quedas de tensão durante a partida e sua influência nos tempos de aceleração e níveis de corrente.

Nas figuras 21 e 22 o método descrito foi aplicado para se obter as curvas tipo “Tempo de Duração” utilizando os dados das figuras 19 e 20, respectivamente. A inércia do disco de frenagem e do rolo de bobinagem conectados aos eixos de cada motor foi calculada de maneira aproximada e coerente levando-se em conta sua geometria e os materiais que os constituem.

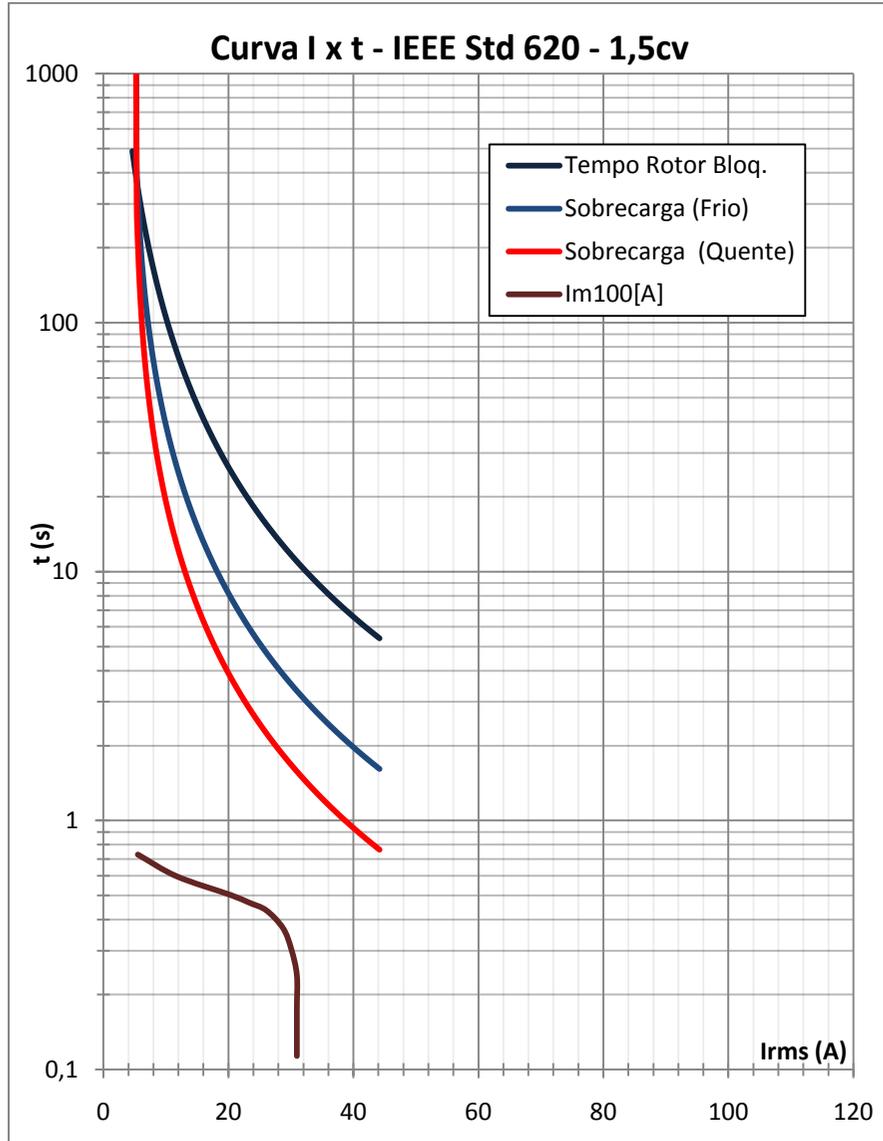


Figura 21 – Motor 1,5cv: Suportabilidade térmica e Corrente “Tempo de Duração”

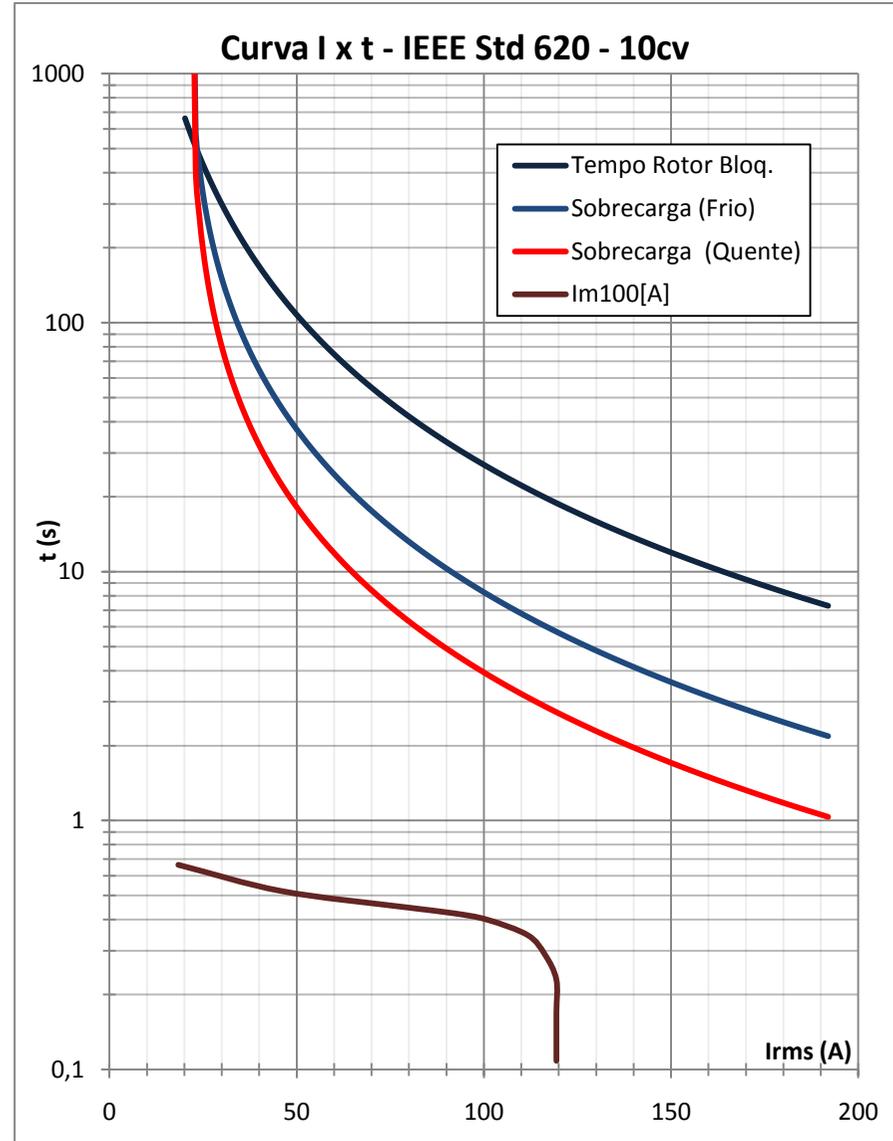


Figura 22 – Motor 10cv: Suportabilidade térmica e Corrente “Tempo de Duração”

### 5.3 RESULTADOS DOS MÉTODOS

Nas figuras 23 e 24 são apresentados em um único gráfico para cada motor, todos os resultados obtidos pelos métodos propostos, de forma a serem comparados:

- Curva da corrente de partida tipo “Tempo Decorrido” (Irms1, Irms);
- Pontos da corrente de partida tipo “Tempo de Duração” obtidos pelo método da Derivada (Deriv15, Deriv6);
- Pontos da corrente de partida “Tempo de Duração” obtidos pelo método dos Níveis de Corrente (Num10%, Num5%);
- Curva da corrente de partida tipo “Tempo de Duração” obtido conforme item 5.1 e em conformidade com a IEEE Std 620.

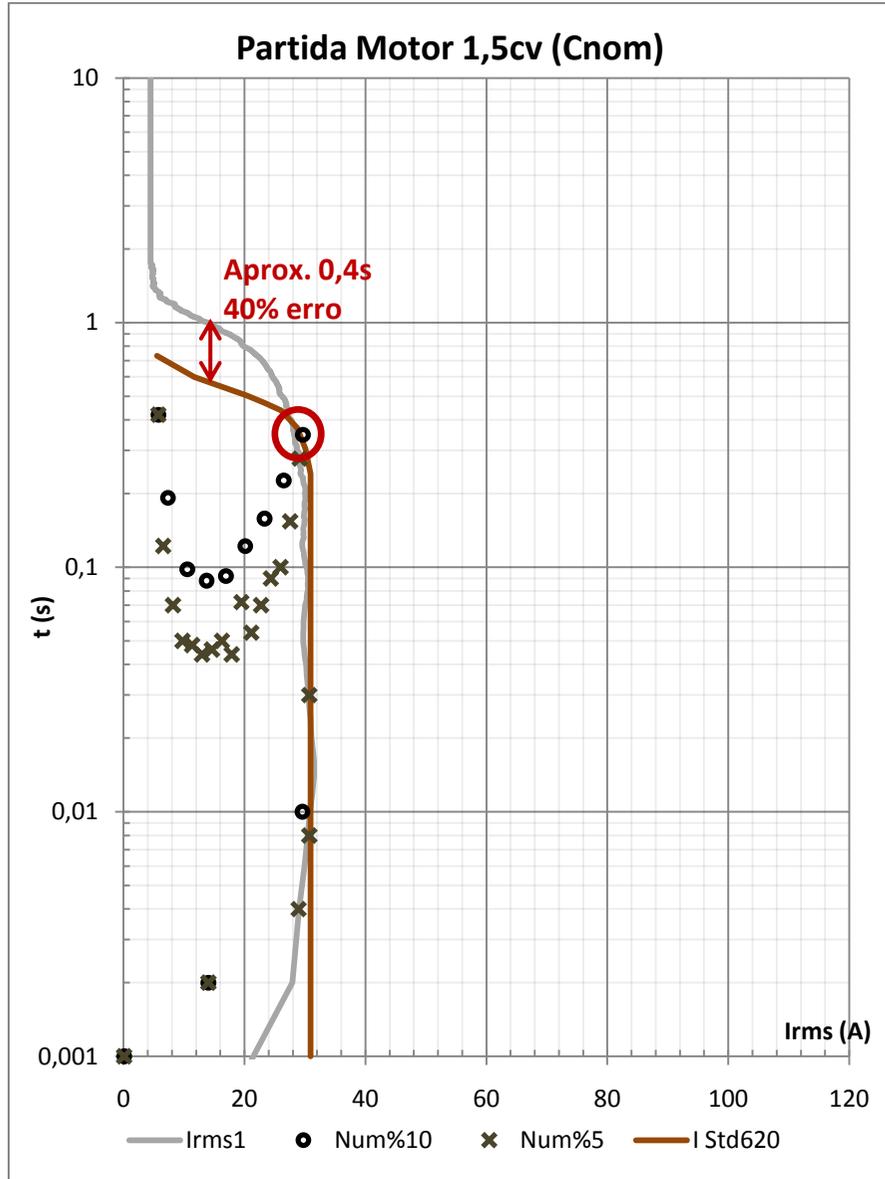


Figura 23 – Comparação dos métodos com curva corrente ensaiada (1,5cv)

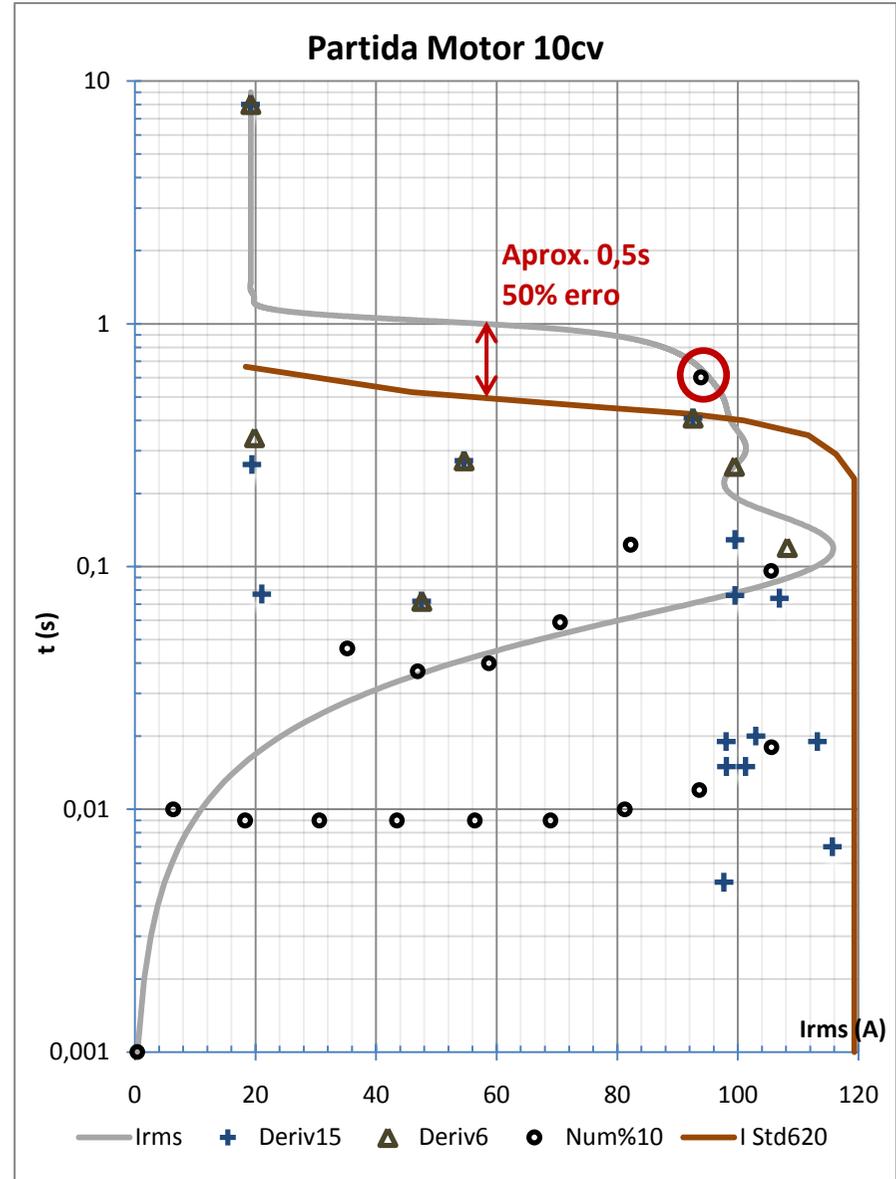


Figura 24 – Comparação dos métodos com curva corrente ensaiada (10cv)

## 5.4 ANÁLISE DE RESULTADOS DOS MÉTODOS

Ao comparar os métodos simplificados propostos de Subdivisão por Níveis de Corrente e pela Derivada, **baseados apenas em medidas de corrente**, com o método completo utilizando corrente, conjugado e velocidade e também com a curva de “Tempo Decorrido”, fazem-se as seguintes observações:

- Nos conjuntos de pontos obtidos, os pontos de maior importância são os pontos de maior corrente e maior tempo de duração (destacados nas figuras 17 e 18)
- Estes pontos encontram-se muito próximos as curvas das correntes medidas, em ambas as máquinas, mas com tempos inferiores.
- Há uma distinção entre as duas máquinas em função de que na máquina de 1,5cv, os pontos críticos localizaram-se acima da curva original e na máquina de 10cv, os pontos críticos localizaram-se abaixo da curva original.
- Os pontos situados no interior central da curva de “Tempo Decorrido” ou abaixo dos pontos de maior importância não têm relevância e podem ser desconsiderados do ponto de vista de proteção.
- Concentrando-se nos pontos de maior corrente e nos de maior tempo de duração, observa-se que o tempo de duração da corrente mais crítica durante a partida é bastante inferior aos tempos totais da curva original em ambos os casos.

Todos os métodos se mostraram coerentes com os resultados obtidos pelo modelo mecânico e elétrico utilizado pelos fabricantes na elaboração da curva em conformidade com a IEEE Std 620 [9] que é o referencial matemático e aceito pela indústria.

- O método de divisão pela **Derivada** que apresentou resultado mais próximo da curva de referência.

- A utilização de níveis de 5% da corrente também foi satisfatória.
- O método de níveis de 10% da corrente teve seu ponto mais importante além da curva utilizada como referência.

## 6 ANÁLISE DA PROTEÇÃO PARA OS CASOS ESTUDADOS

Uma vez que se obteve, a partir dos métodos, dados de “Tempo de Duração” das correntes de partida de ambos os motores, a curva “I<sub>rms</sub>”, da corrente de partida de “Tempo de Duração” não será mais apresentada nas figuras posteriores.

### 6.1 PROTEÇÃO COM FUSÍVEL

Existem fusíveis com vasta gama de características de atuação, entretanto a predominância em todos os casos é a de uma curva verticalizada, com mudança brusca do tempo de atuação para incrementos modestos no nível de corrente. Em função disto, para que a máquina consiga receber a corrente de partida, o fusível deve ser sobredimensionado em relação à corrente nominal da máquina, resultando em uma grande área não protegida. Sendo assim, são adequados para proteção contra curtos-circuitos e não para sobrecargas.

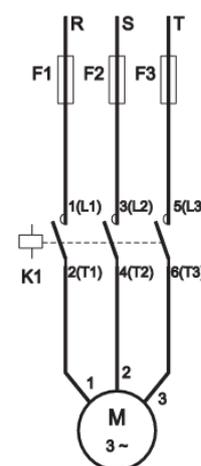


Figura 25 – Diagrama Fusível

Desta forma, fusíveis não devem ser isoladamente utilizados para proteção de máquinas elétricas. Isto fica claro ao compararmos sua curva de atuação com as curvas de partida dos motores. Entretanto, não é incomum encontrar este tipo de proteção, ilustrado na figura 25, como proteção única em instalações industriais.

Na figura 26 tem-se uma condição em que o fusível Diazed ou NH foi projetado conforme a corrente nominal da carga. Nesta situação, o fusível atua e não permite que a máquina complete sua partida expondo-a, ainda, a conseqüências indiretas como situações de falta de fase. Na figura 27, o fusível utilizado é o de menor valor comercial existente que permite a partida da máquina. Entretanto, toda a zona em destaque não é protegida pelo fusível, permitindo sobrecorrentes de sobrecarga de até  $4 * I_n$  por tempo indeterminado.

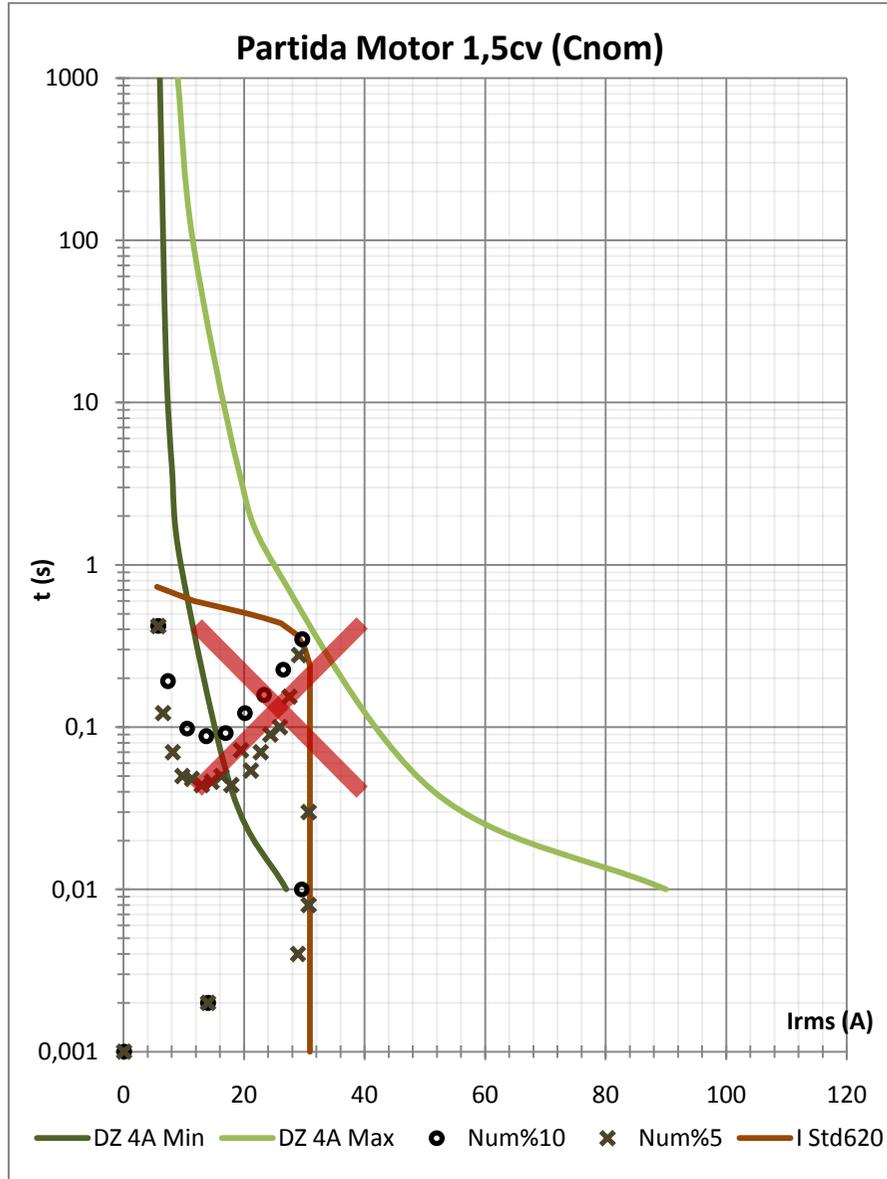


Figura 26 – Motor 1,5cv e fusível Diazed 4A

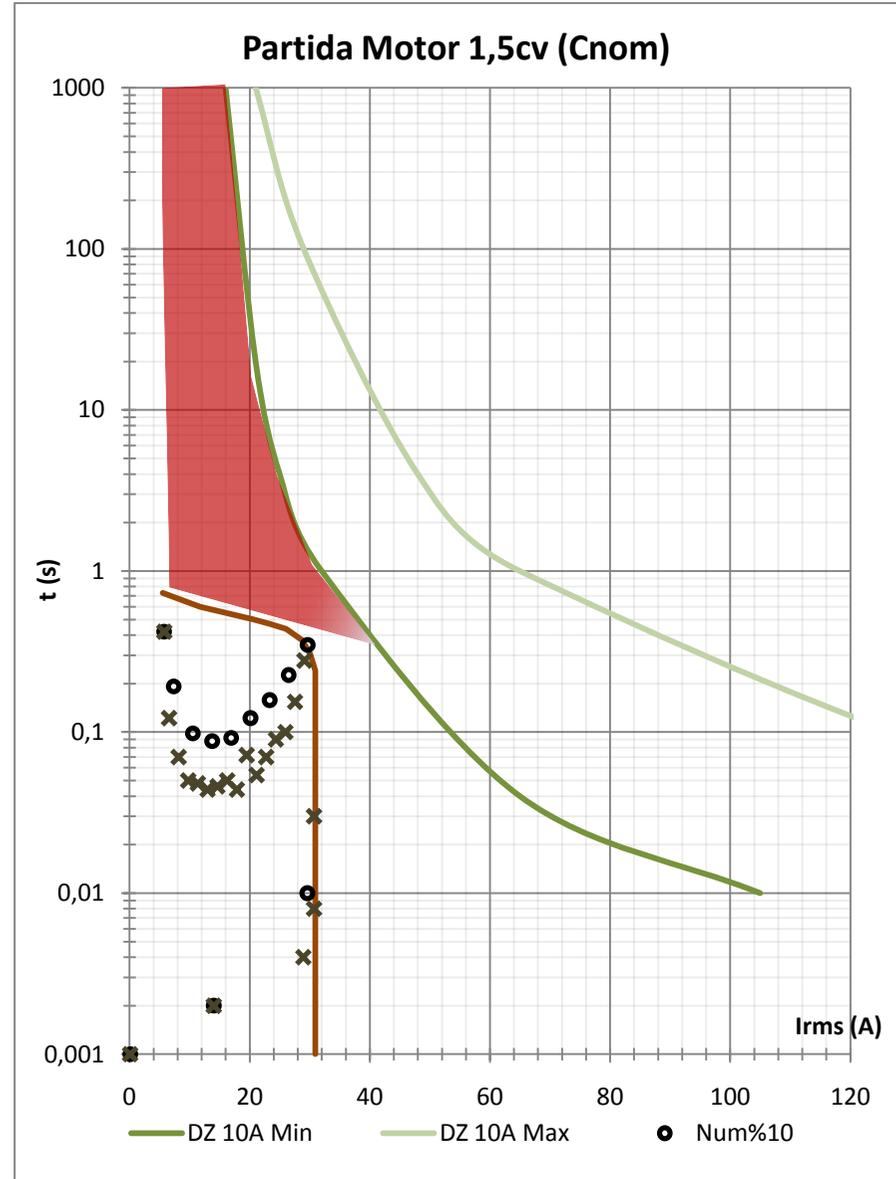


Figura 27 – Motor 1,5cv e fusível Diazed 10A

## 6.2 PROTEÇÃO COM DISJUNTOR IEC

A proteção utilizando disjuntores IEC, conforme ilustrado na figura 28, possui característica de atuação térmica e magnética. Portanto, protegem tanto contra sobrecargas quanto contra curtos-circuitos. Sua limitação está na não possibilidade de ajustes quanto ao disparo e sua baixa capacidade de interrupção, normalmente de 3 a 4,5kA nos modelos convencionais e até 15kA nos modelos melhorados (com custo elevado). Nos casos de correntes de curto

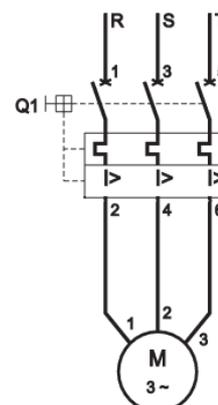


Figura 28 – Diagrama Disj. IEC

circuito elevados as alternativas são o uso de disjuntores motor, disjuntores em caixa moldada (não disponíveis em correntes abaixo de 16A) ou ainda proteção de backup. Na figura 29

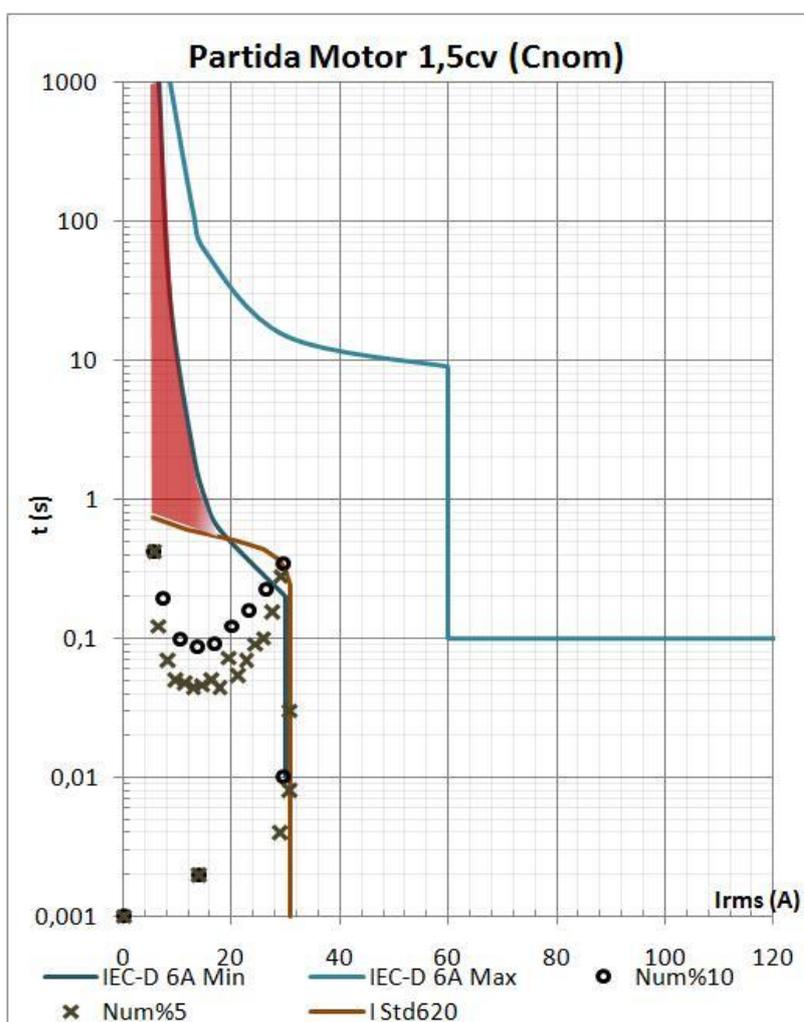


Figura 29 – Motor 1,5cv e disjuntor IEC 6A - Curva D

observa-se um disjuntor IEC e sua curva de proteção em relação aos dados de partida do motor.

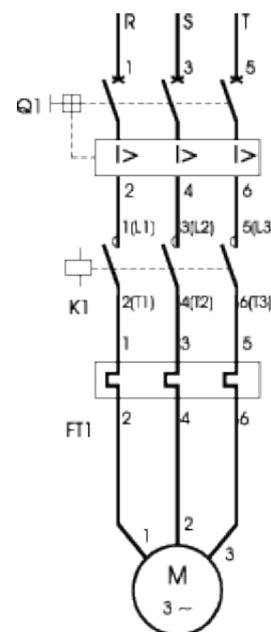
Observa-se pequena sobreposição entre os pontos mais críticos obtidos pelos métodos e a curva mínima do disjuntor. Entretanto, sabe-se que a parte inferior da curva está associada à condição de operação a quente, o que normalmente não é o caso previamente a partida.

### 6.3 PROTEÇÃO COM RELÉ TÉRMICO

Os relés térmicos têm função específica de proteção contra sobrecarga elétrica, associando ainda proteções secundárias como falta de fase. Sua utilização em conjunto com disjuntor magnético (ou alternativamente, fusíveis) pode ser vista na figura 30.

Nas figuras 31 e 32 observou-se que o tempo entre as curvas dos relés térmicos e os pontos do tempo de duração das correntes é suficientemente grande para que motores com tempo de partida inferior a 5s tenham, invariavelmente, uma região exposta a sobrecargas. Nos gráficos esta região corresponde no mínimo pela área grifada em vermelho para o relé Classe5, podendo ser maior para os Classe10A e 10. Já a região rosada define visualmente e aproximadamente a região para a qual o relé pode atuar, dependendo das condições do circuito no instante da sobrecarga, de forma que nesta região também pode haver sobrecargas.

Das curvas características dos relés térmicos, verifica-se que não é possível implementar uma proteção mais ajustada para máquinas de pequeno porte uma vez que não existem relés que cubram a área em vermelho. Conclui-se que os níveis de sobrecargas com durações inferiores a 2 ou 3 segundos não oferecem riscos aos componentes dos motores, e por isto tais dispositivos de proteção não estão disponíveis.



**Figura 30 – Diagrama Relé Térmico**

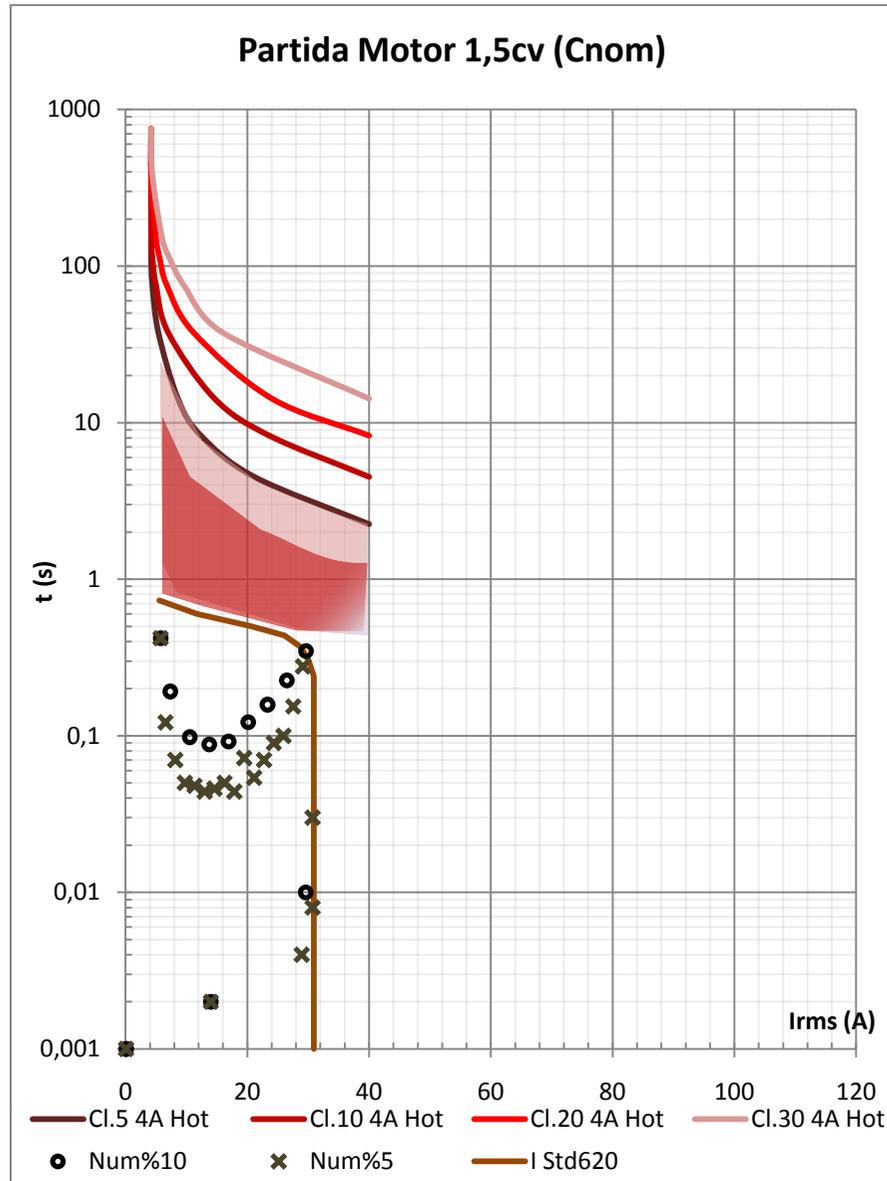


Figura 31 – Motor 1,5cv e relés térmicos 4A

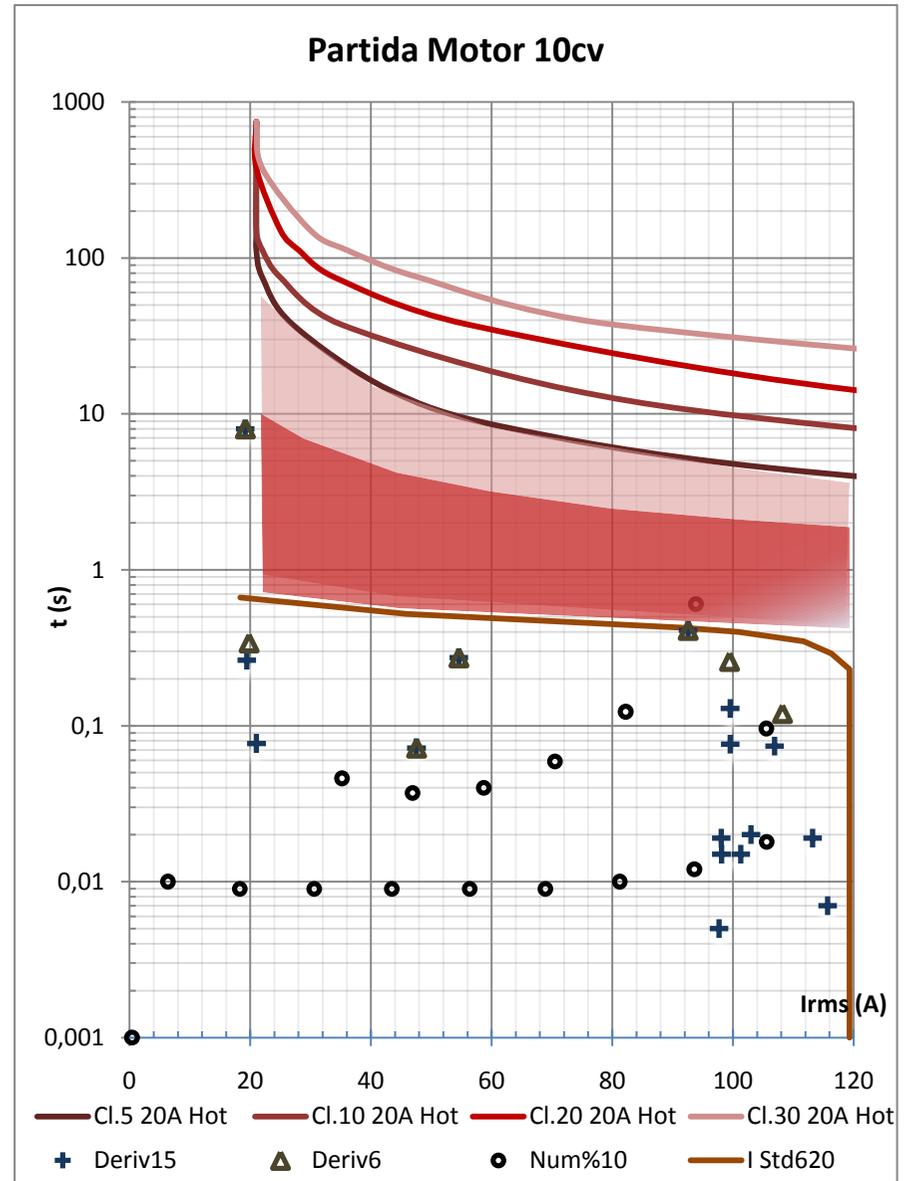


Figura 32 – Motor 10cv e relés térmicos 20A

## 6.4 RESUMO DAS PROTEÇÕES CONTRA SOBRECARGA

Em função das características de atuação dos dispositivos e das situações que podem originar sobreaquecimento e danos ao isolamento, pode-se resumir a efetividade dos equipamentos de proteção quanto à sobrecarga no seguinte quadro:

Causas de Sobreaquecimento	Fusível (DZ, NH) ou Disjuntor Magnético	Fusível e Relé Térmico ou Disjuntor Termomag.	Sondas Térmicas no Motor
Sobrecarga Contínua 20%	Não protege	Total	Total
Sobrecarga intermitente	Não protege	Parcial	Total
Frenagens, reversões e partidas freqüentes	Não protege	Parcial	Total
Mais de 15 partidas por hora	Não protege	Parcial	Total
Rotor bloqueado	Parcial	Parcial	Total
Falta de fase	Não protege	Parcial	Total
Varição excessiva de tensão	Não protege	Total	Total
Varição de freqüência	Não protege	Total	Total
Temperatura ambiente alta	Não protege	Não Protege	Total
Aquecimento externo mecânico	Não protege	Não Protege	Total

**Quadro 2 – Dispositivos de Proteção versus Sobrecargas**

No quadro, o termo “Parcial” aparece para definir que o elemento protege a máquina apenas para condições específicas do tipo de causa de sobreaquecimento, não sendo verdadeira para outras condições da mesma causa. Não objetiva-se aqui explorar os aspectos quantitativos destas proteções parciais, limitando-se aqui a qualitativamente definir que, eventualmente, a proteção atuará, variando de caso para caso.

## 7 ALTERNATIVAS AO USO DA CURVA IxT DE DURAÇÃO

Na ausência da curva da corrente de partida do motor no formato “Tempo de Duração”, da curva de suportabilidade térmica do motor, das curvas de Conjugado/Corrente versus Velocidade e ainda do conhecimento da curva de carga, uma abordagem correta para o projeto da proteção do motor é a utilização da corrente máxima de partida ou a corrente de rotor bloqueado ( $I_p/I_n$ ) e do tempo máximo de rotor bloqueado a quente ( $t$ ), pois retrata a pior situação.

Estas duas informações produzem no gráfico  $t \times I$  de “tempo de duração” um ponto apenas. A utilização deste ponto no projeto de proteção fornece uma margem de segurança para o sucesso da partida do motor sem atuação do elemento de proteção, mas pode trazer consequência para a proteção de sobrecarga.

Esta prática exige, portanto, observação precisa da característica da curva de atuação do elemento de proteção, que pode acarretar sobredimensionamento do ponto de vista do regime permanente permitindo sobrecargas indesejáveis para o estator caso não nos detenhamos a este aspecto.

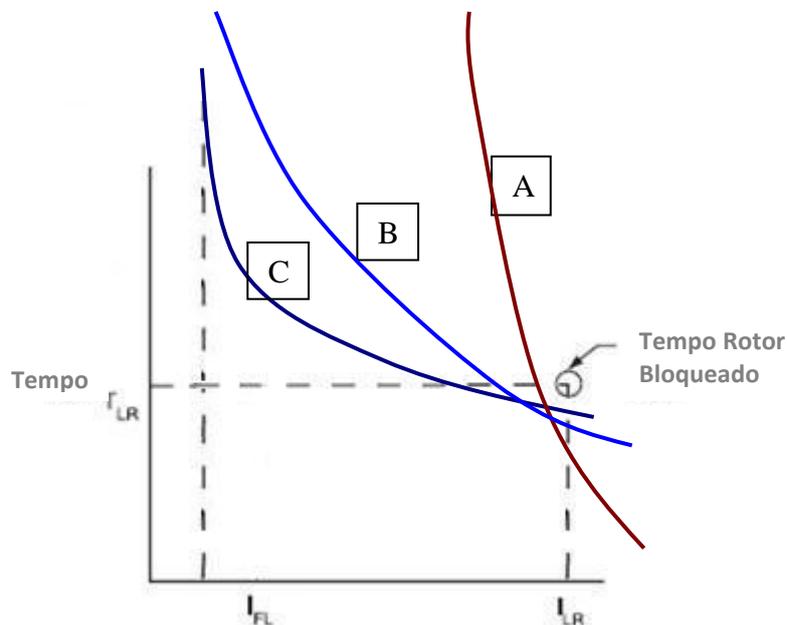
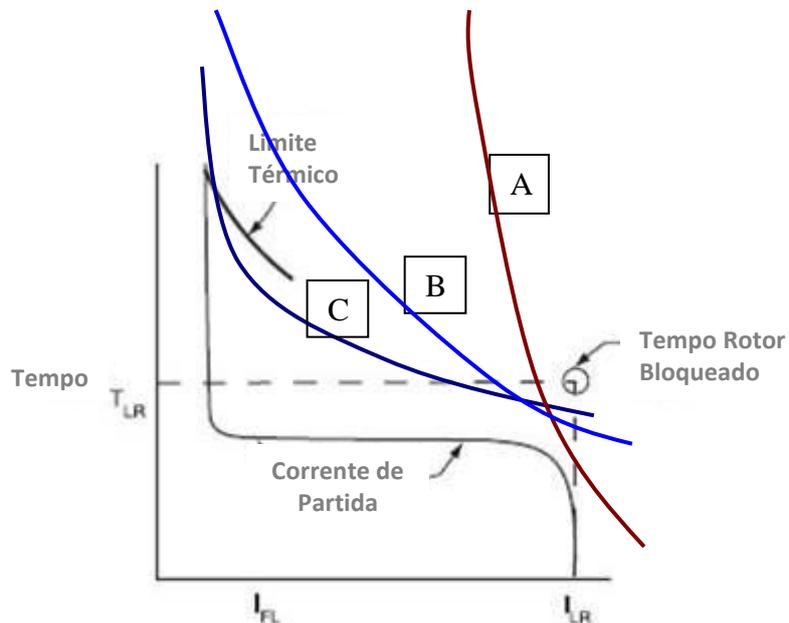


Figura 33 – Ponto de rotor bloqueado do motor e elementos de proteção

Na figura 33, considera-se o desconhecimento da curva do motor. Observa-se na figura a corrente nominal do motor e o ponto de tempo máximo e corrente de rotor bloqueado. Das três curvas de elementos de proteção propostas, fica claro que o elemento A, projetado somente em função do ponto de rotor bloqueado, não protege adequadamente o motor contra sobrecarga nem possui curva característica adequada. Já quanto aos elementos B e C, nada se pode inferir sobre seu desempenho quanto à sobrecarga. Tanto o elemento B pode ser adequado quanto permitir sobrecargas excessivas ao motor, quanto o elemento C pode ser adequado quanto não permitir a partida do motor, dependendo da condição de carga e inércia do motor.



**Figura 34 – Curva corrente de partida do motor e curvas de atuação**

Na figura 34, observa-se a curva da corrente de partida do motor do tipo “Tempo de Duração”, o ponto de tempo máximo e corrente de rotor bloqueado e as mesmas três curvas de elementos de proteção propostos anteriormente. Confirmam-se as hipóteses feitas quanto aos elementos A e B quanto a não proteção adequada do motor contra sobrecarga.

Neste caso o elemento B, apesar de fornecer proteção contra sobrecarga permanente, permite valores de sobrecarga nocivos por tempos superiores ao tolerado pelo estator da máquina. Ainda que a máquina não sofra falha imediata para certos valores de sobrecarga, seu

isolamento sofrerá degradação do enrolamento (reduzindo a vida útil) até que finalmente ocorra dano que incapacite a máquina. E por fim observa-se que o elemento C possui curva característica mais adequada, permitindo a partida e protegendo a máquina contra sobrecargas contínuas.

## 8 CONCLUSÃO

Verificou-se que a utilização das curvas de tempo decorrido, além de conceitualmente **errada**, indica tempos de duração das correntes errados e superiores aos indicados pelo método de cálculo utilizando os aspectos mecânicos e elétricos da máquina. Sendo assim, o uso direto da curva de “Tempo Decorrido” da corrente de partida não deve, em hipótese alguma, ser utilizado.

Verificou-se também que os métodos simplificados propostos, obtidos somente a partir das correntes de partida, produziram resultados satisfatórios e bastante alinhados com os resultados dos cálculos utilizando os aspectos mecânicos e elétricos. Em função disto, conclui-se que os métodos utilizados para tratar as curvas fornecem sim, alternativas quantitativa e qualitativamente **corretas** para comparação com as curvas de atuação dos elementos de proteção.

Tais métodos fornecem, portanto, ferramenta prática de grande importância para avaliação da proteção de máquinas elétricas já instaladas. É importante observar que tais métodos são realizados sem nenhuma intervenção na instalação, sem o conhecimento de aspectos técnicos da máquina como os gráficos fornecidos pelo fabricante ou o levantamento dos parâmetros elétricos, do conjugado e da inércia da carga.

Conclui-se também que para as máquinas testadas, com partidas normais ( $<2s$ ), o uso inadvertido das medidas de corrente de partida não traz conseqüências importantes, uma vez que para proteção contra curto circuito fornece os dados necessários. Já do ponto de vista da proteção contra sobrecarga, ainda que haja possibilidade de melhoria da proteção em função dos resultados obtidos, observa-se que os elementos de proteção disponíveis não cobrem de forma ajustada regiões da curva “ $t \times I$ ” de máquinas pequenas e permitem que na ocorrência

freqüente de eventos específicos de sobrecarga estes venham a danificar o motor. É necessária melhor análise da pertinência destas regiões no envelhecimento prematuro do isolamento.

Entretanto, da comparação da máquina de 1,5cv para a de 10cv, ficou clara uma tendência, ainda que não fosse possível testá-la. Esta tendência indica que para motores de maior porte ou submetidos a regimes de partida pesados ( $>9s$ ) [7] os métodos propostos para obtenção curvas/pontos de “Tempo de Duração” tem grande importância na análise de exposição à sobrecarga de máquinas elétricas para posterior otimização das proteções de sobrecarga. Indica também que uso da curva de “Tempo Decorrido” da corrente de partida expõem a máquina a sobrecargas consideráveis.

Dos casos estudados, o motor de 1,5cv foi estudado com condição de carga conhecida e controlada. Já para o motor de 10cv, a condição de carga era qualquer, e abaixo da capacidade nominal. Conclui-se, portanto, que a utilização destes métodos pode servir também para proteção contra sobrecarga em função da condição de carga específica a qual a máquina está submetida, inclusive em casos de sobredimensionamento do motor. Com isto pode-se detectar problemas mecânicos no processo, através do desarme de uma proteção contra sobrecarga ajustada ao nível de corrente e também ao tempo de partida específicos resultantes da condição de carga.

Para consolidação das conclusões obtidas, sem dúvida é necessário observar o comportamento e partida de um número maior de máquinas, classificando-as em grupos quanto ao regime de partida e o tipo de carga utilizado, para que se apliquem estes ou quaisquer métodos que venham a interpretar as curvas de “Tempo Decorrido”. Para tais máquinas também é necessária a observação das partidas estrela-triângulo, que com certeza trariam nova característica para região de pontos obtida da curva da corrente de partida.

As medições devem ser realizadas com equipamento de medição adequado para o fim, viabilizando confiável, precisa e ágil coleta de dados. Estas diferenças são significativas e passam por todos os aspectos do hardware, firmware e software. Sendo assim os principais aspectos a serem observados para determinar se o equipamento é adequado para esta aplicação são taxa de amostragem, cálculo de correntes RMS online, formato dos dados gravados, precisão dos números medidos (algarismos significativos), software de manipulação dos dados amigável e ainda versatilidade para utilização de TCs diversos, adequando-se aos diversos níveis de corrente.

## 9 REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da Energia Elétrica** – 2ª Edição –2007
- [2] VENERO, Dany de Moraes; HIYODO, Sérgio Akio. **Gestão de reparo de motores elétricos com foco em confiabilidade e otimização de custos** – Artigo Técnico Abraman 2008.
- [3] Electrical Apparatus Service Association. **The Effect of Repairs on Motor Efficiency** – 2003.
- [4] BULGARELLI, Roberval. **Proteção Térmica de Motores Trifásicos Industriais**. Tese (Mestrado em Engenharia) – USP, São Paulo, 2006.
- [5] FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY Jr. C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas. Com introdução à eletrônica de potência**. 6ª Ed. Porto Alegre; Ed. Bookman, 2006.
- [6] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE Std 100**: The Authoritative Dictionary of IEEE Standards, Seventh Edition. 2000.
- [7] International Electrotechnical Commission. **IEC 60947-4-1**: Low-voltage Switchgear and Controlgear-Contactors and Motor Starters. 2000.
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE Std 242**: Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems. 2001.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers. **IEEE Std 620**: Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines. 2008.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 60898**: Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares. 2004.
- [11] International Electrotechnical Commission. **IEC 60255-8**: Eletrical Relays-Thermal Eletrical Relays. 1990
- [12] LANDIM, Régis Pinheiro. **Testes em Disjuntores IEC e NEMA**. In: Painel Setorial de Disjuntores INMETRO. Outubro, 2005.
- [13] WEG Equipamentos Elétricos S.A. **Bancada Didática Modular WEG-03735C/06-PRO1**. Rev.07/97. 2007.

- [14] VALDES, M. CRABTREE, A. PAPALLO, T. **Method for determining selective capability of current-limiting overcurrent devices using peak-let-through current.** GE Ind. & Consumer, Plainville, CT, USA. Junho, 2009.
- [15] International Electrotechnical Commission. **IEC 60947-2: Low-voltage Switchgear and Controlgear - Circuit Breakers.** 2001.
- [16] International Electrotechnical Commission. **IEC 60269-1: Low-voltage Fuses-General Requirements.** 1998.
- [17] PEREIRA, Adriano H. CUNHA, Henrique A. PONTES, Ricardo S. T. **Freio Eletromagnético Aplicado as Máquinas Elétricas de Indução para Ensaio em Carga Variável.** Universidade Federal do Ceará.
- [18] THALER, George J. WILCOX, Milton L. **Electric Machines: Dynamics and Steady States.** Ed. Wiley and Sons Inc; Nova Iorque. Junho, 1966
- [19] Siemens. **Protection Equipment: Overload Relays. Reference Manual.** Março 2010

APENDICE A: DIAGRAMA DE LIGAÇÃO

