

†
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ELETRICIDADE (FEE)

O MÉTODO DO PERFIL TÉRMICO PARA
DETERMINAR O DESEMPENHO DOS MOTORES DE TRACÇÃO
DE UMA LOCOMOTIVA ELÉTRICA

17

in bond

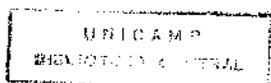
†
FERNANDO ARTHUR CAVAZZONI

†
Orientador DIRK RHEINBOLDT

†
Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia da Universidade Esta-
dual de Campinas como parte dos
requisitos para
DOUTORAMENTO

AGOSTO DE 1975

BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA
UFUCAMP



AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meu agradecimento a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho. Em particular agradeço a:

Dr. Dirk Rehinboldt, meu ex-professor e orientador neste trabalho, pela sua assistência e principalmente pelo estímulo dado em desenvolver para uma tese a pesquisa técnica e o trabalho profissional realizado.

Eng. Erwin Federico Griese - Supervisor da Área de Testes do Departamento de Equipamento Pesado da General Electric do Brasil S/A em Campinas, como colega e amigo que sem sua criatividade e espírito de realização não teria concluído os testes cujos resultados são parte essencial da tese.

Srtas. Ana Maria Ribeiro dos Santos e Maria Silvia Armelin pela paciência, tolerância e boa vontade no trabalho de datilografia e composição.

À meus pais

SUMÁRIO

A medição de temperatura em uma máquina elétrica é por si só complexa e muitas vezes controvertida, principalmente nos enrolamentos rotóricos de uma máquina de corrente contínua.

O Motor de Tração não somente é uma máquina elétrica de corrente contínua, porém tem a agravante de sofrer um ciclo de carga não padronizado, completamente aleatório e particularmente imprevisível.

A acessibilidade aos enrolamentos rotóricos de um Motor de Tração, quando instalado em uma locomotiva elétrica e praticamente impossível com a agravante que os ditos enrolamentos estão em movimento e a transferência de qualquer medida direta teria que ser transportada para fora do truque da locomotiva com elementos ou aparelhos que seguramente distorceriam a indicação inicial. Salienta-se que quaisquer dispositivos para esse fim teriam também que ser projetados para suportar impactos da ordem de 10 a 15 vezes a aceleração da gravidade.

O presente trabalho apresenta o Método do Perfil Térmico para determinação de temperatura em motores de tração, principalmente da armadura, partindo de dados obtidos de testes no motor e fora da locomotiva elétrica como uma alternativa simples, prática e segura para o usuário.

O MÉTODO DO PERFIL TÉRMICO PARA
DETERMINAR O DESEMPENHO DOS MOTORES DE TRACÇÃO
DE UMA LOCOMOTIVA ELÉTRICA

ÍNDICE

PARTE I - EXPOSIÇÃO GERAL SOBRE O ASSUNTO

- CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .
- CAPÍTULO II - O MOTOR DE TRACÇÃO
 - 2.1 - Peculiaridades do Motor de Tração em relação ao motor eléctrico industrial .
 - 2.2 - Dados e características do motor estudado.
- CAPÍTULO III - AQUECIMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS.
 - 3.1 - Aquecimento do corpo homogéneo .
 - 3.1.1 - Regime permanente.
 - 3.1.2 - Regime transitório.
 - 3.1.3 - Interpretação física da constante térmica de tempo .
 - 3.2 - Aquecimento da máquina eléctrica .
 - 3.2.1 - Máquinas para as quais podem ser construídos protótipos.
 - 3.2.2 - Máquinas para as quais não podem ser construídos protótipos.
 - 3.2.3 - Conclusões preliminares com base na experiência .
 - 3.3 - Aquecimento do Motor de Tração no seu uso comum em Locomotivas Eléctricas .
 - 3.3.1 - Limites de temperatura .

PARTE II - O MÉTODO DO PERFIL TÉRMICO

- CAPÍTULO IV - TESTES ESPECIAIS
 - 4.1 - Testes de Calibração.
 - 4.2 - Obtenção da curva $\Delta\theta \equiv \int (t)$
 - 4.2.1 - Ligações.
 - 4.2.2 - Medição de Temperaturas.
 - 4.2.3 - Ventilação
 - 4.2.4 - Medidas de resistência ohmica .

- 4.2.5 - Circuito de teste.
- 4.2.6 - Execução dos testes.
- 4.2.7 - Análise do aquecimento e resfriamento da máquina .
- 4.3 - Obtenção da curva $I \equiv \int (1/t)$
- 4.4 - Preparação de dados .
 - 4.4.1 - T (C.T.T. = Constante)
 - 4.4.1.1 - Aquecimento .
 - 4.4.1.2 - Resfriamento .
 - 4.4.1.3 - Conclusão-Aquecimento/Resfriamento.
 - 4.4.1.4 - Justificação .
 - 4.4.2 - T (C.T.T. = Variável $T \equiv \int (t)$.
 - 4.4.2.1 - Curva Porcentual de Temperatura Valor Z.
 - 4.4.2.2 - Θf para valores de $I > I_c$.
- 4.5 - O uso do computador .
 - 4.5.1 - Determinação de um pequeno trecho do perfil térmico através de cálculo manual.
 - 4.5.2 - Traçado do perfil térmico do trecho.
 - 4.5.3 - A análise do perfil térmico , para determinação de carga de motores .
 - 4.5.4 - A colocação do perfil térmico no computador e o programa para o perfil térmico.
 - 4.5.5 - Programa , para o perfil térmico .

CAPÍTULO V - APLICAÇÃO DO MÉTODO .

- 5.1 - O tratamento dos dados $I \equiv \int (t)$ da estrada .
- 5.2 - O uso dos dados de teste.
- 5.3 - Exemplo de aplicação do método do perfil térmico.

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES .

CAPÍTULO VII- BIBLIOGRAFIA .

PORTE III- ANEXOS

- A.1 - Características da Locomotiva Elétrica .
- A.2 - Características dos Motores de Tração .
- A.3 - Curvas, Tabelas e Resultados de Testes .
- A.4 - Diversos .

I PARTE - EXPOSIÇÃO GERAL SOBRE O ASSUNTO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Desde o aparecimento da primeira máquina elétrica os técnicos que são peritos nesse tipo de equipamento, bem como os próprios projetistas de máquinas, de uma maneira geral, viveram e vivem, até o presente momento, as dificuldades de um controle técnico mais razoável sobre a incrementação da temperatura em uma máquina elétrica ou em suas partes.

Levando-se em conta que o projeto de uma máquina elétrica rotativa, partindo dos seus dados essenciais, é hoje um assunto bastante conhecido e desenvolvido, toda essa gama de conhecimentos e dados, muitas vezes mesmo que bem aplicados à luz dos métodos tradicionais e até o limite de seus respectivos desenvolvimentos, não consegue predeterminar com um mínimo de segurança necessária, qual o nível de temperatura em que a máquina irá trabalhar.

Como consequência do que ficou discriminado, uma máquina, projetada e construída quando vai à sala de testes para verificação de seus níveis de temperatura a plena carga, na grande maioria das vezes ajusta-se a uma das duas seguintes situações:-

(a) A máquina eleva sua temperatura abaixo dos limites suportáveis pelo material isolante usado, conforme sua classe;

(b) O nível, ou níveis de temperatura atingidos pelas várias partes que compõem a máquina ultrapassam os limites suportáveis pelo material isolante isolado, conforme sua classe.

No primeiro caso (a), apesar de que a máquina poderá trabalhar no limite de sua especificação, houve desperdício de material e no segundo (b), a máquina somente poderá ser usada com uma potência menor daquela desejada inicialmente, muito provavelmente, com o compromisso de outras grandezas importantes, tais como rendimento, comutação e mal aproveitamento dos núcleos de aço magnético especial.

Estamos excluindo, obviamente, da análise da situação inicial, os casos em que tenham havido deficiências, tanto de projeto como de construção do sistema de ventilação e ou casos em que não haja um

acoplamento satisfatório, da perda de carga interna provocada, pela passagem do ar de ventilação dentro da máquina e o ventilador usado.

Como exceção ao que ficou afirmado, salienta-se que em casos particulares, de máquinas específicas, com sistemas de ventilação já testados e bastante aperfeiçoados, consegue-se, através de métodos de ajuste, meramente correlativos, predeterminar a temperatura final de aquecimento. Nenhum desses métodos, todavia, até presentemente, é genérico para qualquer máquina elétrica e, mesmo não sendo sempre, existem hipóteses pre-fixadas pelo autor, dentro das quais o método desenvolvido pode ou não pode dar resultados tecnicamente aceitáveis.

Inegável é o fato de existirem inúmeras tentativas analíticas, puras, para a pre-determinação da temperatura final das partes de uma máquina elétrica, porém, nenhuma delas é suficientemente prática para ser usada. Todas essas tentativas, apesar de que lógicas analiticamente, precisas quanto aos seus conceitos, são inúteis diante da variação e das tolerâncias aceitas e já estabelecidas pela indústria de construção de equipamento elétrico.

O motor de tração, máquina elétrica usada na tração de locomotivas elétricas, não é exceção a todas as situações já mencionadas, muito pelo contrário, sofre ainda limitações maiores em seu projeto; incorrendo, dessa maneira, em uma relação peso-potência, menor do que a grande maioria das demais máquinas congêneres e, como consequência, está esse tipo de máquina destinado a superaquecer com extrema facilidade.

As limitações referidas ao motor de tração são, principalmente, de espaço; (ex. distância entre trilhos estabelecida; altura de túneis, que, por sua vez, limitam a altura de locomotivas e, dessa forma, também o volume que possa vir a ser ocupado pelo motor de tração).

Como compensação parcial às limitações existentes para o projeto do motor de tração, as classes de temperatura, conforme normas ASA e AIEE, para esse tipo de equipamento, permitem sobrelevações de temperatura, em função do material usado para isolamento em níveis bastante superiores aos aceitáveis em máquinas industriais. Entende-se por máquina industrial, toda máquina elétrica fixa, que trabalha em regimes de carga perfeitamente conhecidos.

O motor de tração em adição às dificuldades já apresentadas, no que se refere à pre-determinação de sua temperatura, apresenta as seguintes outras:-

(a) É, geralmente, uma máquina de corrente contínua, - tipo série; (2)

(b) O ciclo de variação de carga é crítico e não pode - terminável; (3)

(c) Não são projetados e construídos em função dos indicadores de variação de carga, mas sim, em função de outro equipamento, a locomotiva;

(d) enfrentam um fator de influência de carga completamente imprevisível - Aderência.

O método que se propõe apresentar (1) é uma alternativa ao completo descontrole da função $\Delta \Theta = \Psi(t)$ do motor, o qual pode informar o usuário das condições térmicas em que um motor irá trabalhar em uma locomotiva elétrica, para um trem tipo e em qualquer trecho da estrada.

Com esta alternativa, o usuário poderá melhor dimensionar as suas composições, aumentando a vida dos motores, diminuindo a degeneração do material isolante usado.

A característica fundamental do método a que se dá o nome de "Perfil Térmico" é que o mesmo parte com dados obtidos na sala de testes, após a construção da máquina e independe do projeto do mesmo. O método é aplicável ao motor de tração, porque o mesmo é construído em grande escala e tem que ser intercambiável. Para motores reconstruídos, o método também é válido, a fim de verificar novas possibilidades de carga, quando são trocados os materiais isolantes e usados outros de uma classe de nível de temperatura superior.

Os testes desenvolvidos para obtenção dos dados necessários ao método, suas peculiaridades técnicas, a calibração necessária das unidades e os conceitos usados como transferidos ao computador constituem a essência deste trabalho.

CAPÍTULO II - O MOTOR DE TRACÇÃO

O motor de tração usado para as experiências foi o GE-734-A2, produzido pela General Electric Company com modificações e novos desenvolvimentos feitos pelo Departamento de Equipamento Pesado da General Electric do Brasil S.A. Todos os trabalhos de pesquisa técnica foram elaborados nas dependências da citada Companhia, com comprovações levadas a efeito em sua sala de testes, devidamente aparelhada para tal trabalho.

2.1- PECULIARIDADES DO MOTOR DE TRACÇÃO EM RELAÇÃO AO MOTOR ELÉTRICO INDUSTRIAL.

Em sua construção básica, o motor de tração GE-734-A2, o qual, de agora em diante, será referido simplesmente como M. T., não difere muito das máquinas de corrente contínua industriais, é um M. T. do tipo série, com campo de comutação de compensação parcial, porta-escovas fixos e sentido de rotação reversível. Apenas para efeito de distinção, compararíamos o M. T. com um motor industrial, como segue-

<u>M. T.</u>	<u>Motor Industrial</u>
Enrolamento: série	Em derivação, ou composto
Rotação: variável	Fixa ou de ciclo conhecido
Sentido de Rotação: reversível	Único
Estrutura: superdimensionada	Normal
Condições de	
Comutação: críticas	Perfeitamente determináveis
Aquecimento: alto	Normal
Tempo de Vida: praticamente determinado	Indeterminado, sendo praticamente infinito
Deterioração Mecânica: alta	Deterioração Mecânica: Normal
Deterioração Térmica: alta	Deterioração Térmica: Normal
Relação Peso-Potência: baixa	Relação Peso-Potência: Normal

Salienta-se como característica mais importante deste M. T., como de todos os demais, a comutação que sempre é crítica, devido à necessidade de reversibilidade do motor, bem como as reduções de campo de excitação, consequência da característica de esforço trator velocidade da própria locomotiva.

2.2- DADOS E CARACTERÍSTICAS DO MOTOR
ESTUDADO

PESO: 3.000 Kg

DIÂMETRO DA ARMADURA: 61 cm

COMPRIMENTO DA ARMADURA: 18,1 cm

DIÂMETRO DO COMUTADOR: 52,7 cm

COMPRIMENTO DO COMUTADOR: 8,6 cm

NÚMERO DE POLOS: 4 polos Com. + 4 polos Exc.

NÚMERO DE BOBINAS NA ARMADURA: 65

NÚMERO DE ESPIRAS DA BOBINA DE ARMADURA: 1

NÚMERO DE ESPIRAS DA BOBINA DE EXCITAÇÃO: 64

NÚMERO DE ESPIRAS DA BOBINA DE COMUTAÇÃO: 55

PESO TOTAL DE COBRE DE ENROLAMENTO: 137 Kg.

TIPO DE ENROLAMENTO DA ARMADURA: Ondulado

ISOLAMENTO: Classe de Operação 3.000 V - Classe de Temperatura
Orig. H

PESO TOTAL DO NÚCLEO DE MATERIAL MAGNÉTICO DA ARMADURA:
390 Kg.

NÚMERO DE BARRAS DO COMUTADOR: 325

NÚMERO DE PORTA-ESCOVAS: 4

Os regimes de operação têm os seguintes limites:

	TENSÃO	CORRENTE
Contínuo	1350 Volts	269 amp.
Contínuo	1500 Volts	264 amp.
Unihorário	1350 Volts	325 amp.
Unihorário	1500 Volts	320 amp.

As demais curvas características do M. T. considerado são as apresentadas no Anexo (2). Os regimes acima são aqueles indicados para o usuário e dentro dos quais fica garantido o desempenho do M. T. Neste caso, como em qualquer outro de máquina elétrica, existem sempre fatores de segurança adicionais e reservas de limites de operação, as quais contribuem para uma segurança maior em caso de operação com abuso.

3.1- AQUECIMENTO DO CORPO HOMOGÊNEO

Como já ficou dito no Capítulo I - Introdução, existem nos livros sobre o assunto deduções teóricas das fórmulas fundamentais de aquecimento para um corpo homogêneo. Essas fórmulas, de uma maneira geral, quando aplicadas para uma máquina elétrica, somente em alguns casos específicos, produzem resultados satisfatórios. É a situação, por exemplo, das máquinas totalmente fechadas e com ventilação externa. Neste caso, internamente, à máquina, o ar existente mantém-se a uma temperatura constante, a qual é praticamente a mesma das outras demais partes. Dessa maneira, o motor totalmente fechado, devido à sua própria construção, reage termicamente muito próximo de um corpo homogêneo e, dessa forma, com possibilidade de uso das fórmulas de aquecimento convencionais.

Apenas como ilustração, são expostas algumas dessas deduções, das quais, posteriormente, serão tirados subsídios os quais, devidamente ajustados, serão usados na elaboração do método proposto.

No caso de um condutor de cobre simples, pode-se destacar dois tipos de regimes:-

Regime Permanente

Regime Transitório.

3.1.1- REGIME PERMANENTE

Seja conhecido o condutor de cobre, de seção circular, como indicado abaixo, com comprimento l , diâmetro d e com resistividade ρ . Sobre o condutor e no comprimento indicado, existe a diferença de potencial V .

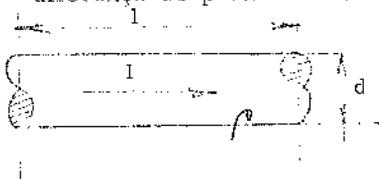


Fig (1)

A potência a ser dissipada seria, então, dada por:

$$P = V \cdot I = RI^2$$

A potência dissipada por irradiação é dada pela expressão:

$$P = \Theta H \cdot S,$$

em que S é a superfície de irradiação, Θ a temperatura de dissipação.

Assim, tem-se a seguinte igualdade:

$$H \cdot S \cdot \Theta = RI^2$$

porém,

$$S = \int dl$$

e

$$R = \rho \frac{4l}{\pi d^2}$$

então,

$$H \int dl \Theta = \left(\frac{\rho \cdot 4l}{\pi d^2} \right) I^2$$

portanto,

$$\boxed{\Theta = K \cdot I^2} \quad (1)$$

3.1.2- REGIME TRANSITÓRIO

A potência é igual à razão de variação da quantidade de calor em relação ao tempo. Assim:

$$p = \frac{dQ}{dt}$$

ou, $dQ = p dt$

porém, $dQ = dQ' + dQ''$

dQ' = calor sensível, que irá aumentar a temperatura do corpo, portanto, permanece no corpo.

dQ'' = calor dissipado.

$dQ' = mcd\Theta$

em que, m é a massa do corpo, c o calor específico e $d\Theta$ a variação de temperatura.

$$dQ'' = H.S.\Theta dt$$

conforme já mencionado em (3.1.1). Pode-se, então, apresentar a equação de transferência como segue:

$$dQ = mcd\Theta + H.S.\Theta dt$$

ou,

$$pdt = mcd\Theta + H.S.\Theta dt$$

fazendo-se

$$m.c. = \gamma$$

e

$$H.S. = K$$

fica

$$pdt = \gamma d\Theta + K\Theta dt$$

ou

$$(p - K\Theta) dt = \gamma d\Theta$$

então,

$$\int_{t=0}^{t=\Theta} \frac{d\Theta}{p - K\Theta} = \int_{\text{tempo}=0}^{\text{tempo}=t} \frac{dt}{\gamma}$$

$$\ln \left| \frac{(p - K\Theta)}{p} \right|_0^{\Theta} = \left| -\frac{k.t}{\gamma} \right|_0^t$$

$$\ln \frac{(p - K\Theta)}{p} = -\frac{k.t}{\gamma}$$

$$\frac{p - K\Theta}{p} = e^{-\frac{k.t}{\gamma}}$$

portanto,

$$p - K = p.e^{-\frac{k.t}{\gamma}}$$

e

$$-k\Theta = p \cdot c \frac{K \cdot t}{\delta} - p$$

portanto,

$$k\Theta = p \left(1 - e^{-\frac{k \cdot t}{\delta}} \right)$$

$$\Theta = \frac{p}{k} \left(1 - e^{-\frac{k \cdot t}{\delta}} \right)$$

se passarmos ao limite

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{p}{k} \left(1 - e^{-\frac{k \cdot t}{\delta}} \right) = \frac{p}{k} = \Theta M$$

ΘM = sobrelevação de temperatura máxima atingida pelo corpo em regime, contínuo.

$$\frac{\delta}{K} = T \text{ também chamada, constante térmica}$$

de tempo.

Dessa maneira, surge a expressão já conhecida, para aquecimento de um corpo homogêneo, em regime transitório.

$$\Theta = \Theta M \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (II)$$

Se, na integração inicial, se fizesse $\Theta = 0$, então

$$\Theta = \Theta M \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (III)$$

que é a igualdade que dá o resfriamento.

Para melhor ficar caracterizado, o aspecto que se pretende desenvolver, é necessário que, também, fique exposto o que pode ser chamado de Interpretação Física da Constante Térmica de Tempo.

3.1.3- INTERPRETAÇÃO FÍSICA DA CONSTANTE TÉRMICA DE TEMPO

A igualdade $\Theta = \Theta M \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$ pode ser representada em

um par de eixos cartesianos, como segue:

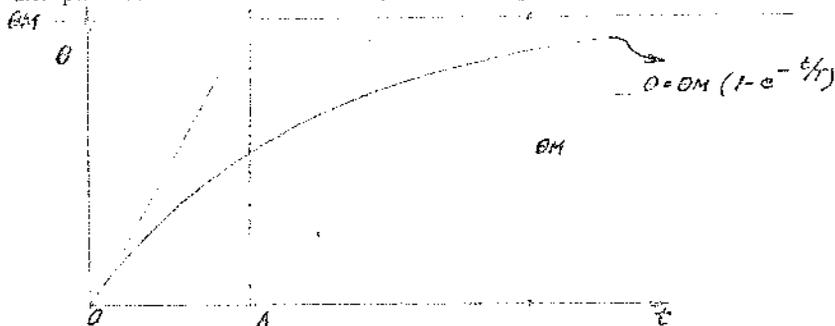


Fig. (2)

A função do tipo

$$Y = K [e]^{f(x)}$$

tem sua derivada dada por

$$Y' = K f'(x) e^{f(x)}$$

assim

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta M}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

porém

$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\theta M - \theta}{\theta M}$$

e, portanto,

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta M - \theta}{T}$$

e

$$\left[\frac{d\theta}{dt} \right]_0 = \left[\frac{\theta M - \theta}{T} \right]_{\theta=0} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\theta M}{T} = \frac{\theta M}{\overline{OA}}$$

e, portanto,

$$T = \overline{OA}$$

Pode-se, então, concluir que se não houvesse dissipação por irradiação, a constante térmica de tempo seria o tempo necessário, para aquecer, com o calor sensível, o condutor considerado.

A exposição praticada sobre aquecimento de um corpo homogêneo (4) foi colocada neste trabalho como parte complementar e introdutória ao assunto básico, principalmente, por não ter sido encontrada dessa forma em nenhum livro texto, ou manual sobre o assunto.

3.2- AQUECIMENTO DA MÁQUINA ELÉTRICA

Como já foi dito a grande maioria das máquinas elétricas não desenvolve seu aquecimento, à semelhança do corpo homogêneo. As razões são várias, porém, dentre elas podemos citar as seguintes:

(a) Na construção das máquinas elétricas, são usados materiais diferentes e com calor específico de valor bastante diversificado;

(b) Os sistemas de ventilação podem influir consideravelmente na variação da função $\Delta\Theta = \psi(I)$, principalmente, quando a rotação do ventilador é, também, uma função da carga da máquina;

(c) Na construção da máquina elétrica, de uma maneira geral, as tolerâncias de fabricação, tanto dos laminados de aço, como do material isolante, influiriam, decisivamente, no cálculo preciso da transferência de calor de uma parte da máquina para outra;

(d) As variações de montagem da máquina, ou tolerâncias de montagem, também, com sua distribuição sobre os componentes e conjuntos que compõem a máquina, sendo completamente imprevisíveis, impedem que qualquer predeterminação dos níveis de temperatura de qualquer parte ou componente seja segura;

(e) O constante e volumoso desenvolvimento dos materiais isolantes e métodos de impregnação, de uma maneira rápida, impede o perfeito conhecimento dos dados básicos sobre um material específico. Não existe razão fundamental para usar dados, ou mesmo verificá-los quando rapidamente, também, certos materiais, se tornam obsoletos;

(f) No caso de máquinas industriais, o aquecimento de uma máquina em particular é feito somente uma vez, na sala de testes, e tendo resultado positivo, as investigações sobre o assunto raramente prosseguem.

Diante dessas circunstâncias, não há essencialmente um projeto de natureza térmica para uma "máquina elétrica rotativa" (excluem-se os transformadores). O projeto, de uma maneira geral, é conduzido conceitualmente e analiticamente de acordo com as leis de eletrotécnica, dentro do âmbito do magnetismo e eletromagnetismo.

Quanto à previsão de aquecimento, o projetista usa dados julgados seguros, através de experiência adquirida, para dimensionar algumas partes essenciais da máquina. Como exemplo, podemos citar os seguintes:-

Bobinas estáticas de comutação e excitação - Watts totais de perdas localizadas, divididos por superfície perimetral da bobina, ou perdas totais divididos pelo peso de cobre das bobinas, cada limite relacionado com uma dada rotação, um certo tipo de ventilador, determinando o processo de impregnação e número de dutos de ar.

Núcleos de armadura enrolados - Perdas totais do cobre na parte reta das bobinas e inseridas nas ranhuras, mais as perdas nos dentes da armadura, divididas pela superfície cilíndrica da armadura, ou com também chamada superfície do entreferro.

Comutadores - Perdas por atrito e fricção das escovas e mais perdas de contacto elétrico, divididas pela superfície de comutação, levando-se em conta a velocidade periférica do mesmo.

Todos esses limites variam em função da velocidade do ar que circula entre bobinas ou dutos de ar da máquina, as quais são determinadas, verificando-se o ponto de equilíbrio da curva de pressão estática; vazão de ar do ventilador, com cada uma das curvas de perda de carga interna da máquina, ou uma só curva equivalente quando isto é possível.

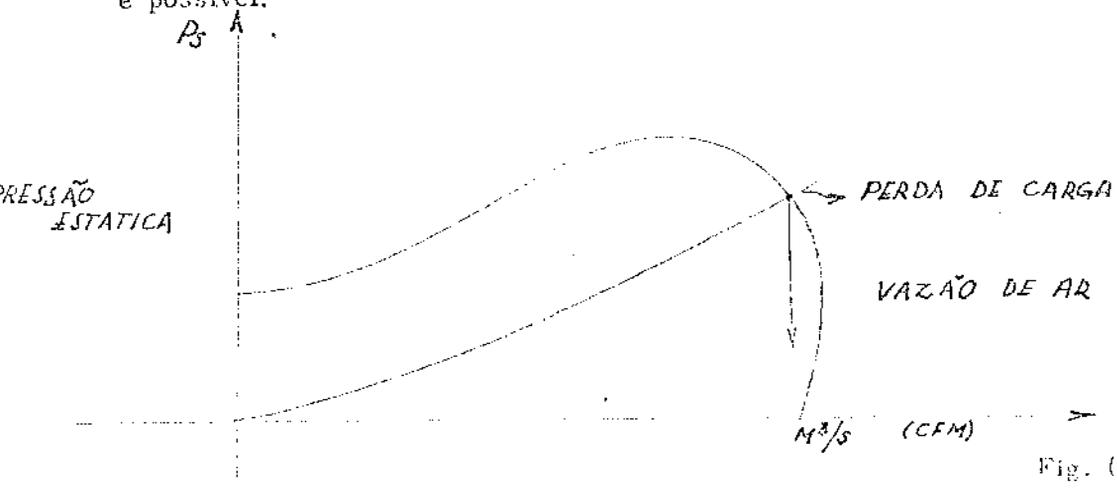


Fig. (3)

P_s = pressão estática

m^3/s = vazão de ar

CFM = "cubic feet per minute" (unidade comumente usada em máquinas elétricas)

Conhecendo-se as várias vazões de ar, nos vários dutos da máquina e as secções transversais, ou normais aos fluxos de ar dos mesmos, determinam-se as várias velocidades do ar dentro da máquina. O regime é sempre considerado lamelar.

Diante da situação acima exposta, dois são os procedimentos básicos da indústria, na construção de máquinas elétricas, no que tange ao aquecimento das mesmas:

(a)- Máquinas para as quais podem ser construídos protótipos;

(b)- Máquinas para as quais não podem ser construídos protótipos.

3.2.1- MÁQUINAS PARA AS QUAIS PODEM SER CONSTRUÍDOS PROTÓTIPOS

As máquinas para as quais podem ser construídos protótipos, geralmente, o projeto da máquina é feito baseado em limites de aquecimento mais otimistas. Constroem-se um protótipo e perfaz-se uma série de testes especiais e de calibração, a fim de aproveitar o material ao máximo. Constroem-se, posteriormente, as máquinas em seu modelo definitivo ou de produção. Este método é quase sempre usado para produção de um mesmo modelo em larga escala. É o caso dos motores de indução, fracionários, motores de corrente contínua industriais, geradores de pequena e média potência, tanto de corrente alternada, como contínua, grupos eletrogenos de solda, grupos conversores de pequena potência e, neste caso, também, os motores de tração (MT), geradores de tração (GT), e grupos motor-gerador auxiliares (GMC), empregados em locomotivas elétricas. A distinção fundamental neste grupo de máquinas, quanto ao seu projeto e sua forma final é que a sala de testes contribue definitivamente e decisivamente para sua criação.

3.2.2- MÁQUINAS PARA AS QUAIS NÃO PODEM SER CONSTRUÍDOS PROTÓTIPOS

As máquinas para as quais não podem ser construídos protótipos, o projeto no que tange ao aquecimento é feito de uma forma mais pessimista, isto é, os limites de relação potência de perdas / superfície são bastante baixos, contando-se, assim, com uma reserva de segurança maior. Em alguns casos específicos de construção sob encomenda são fabricados modelos de madeira, "mock-ups" para determinação mais precisa de velocidades do ar. Para uma verificação "in loco" da potência e do provável aquecimento dessas máquinas, usam-se os chamados testes de em curto circuito (que não refletem, perfeitamente, a realidade, pois a carga nestes casos é essencialmente resistiva), ou, então, os chamados testes "pump back", quando existem duas máquinas gêmeas, em que uma pode atuar como carga da outra. Neste caso, enquadraram-se os grandes hidrogeradores, máquinas de corrente contínua de grande potência para siderurgia, grandes alternadores acoplados a motores diesel, motores e conversores síncronos de grande porte. Neste tipo de máquinas, a sala de testes tem muito pouca atuação e, na realidade, corre-se o risco do superaquecimento, até que a máquina adquira sua carga total, o que pode, em alguns casos, levar de 5 a 10 anos em se tratando de hidrogeradores.

3.2.3- CONCLUSÕES PRELIMINARES COM BASE NA EXPERIÊNCIA

Como conclusão desta parte, a experiência tem indicado nos casos de máquinas em que podem ser construídos protótipos, que as curvas $\Delta\theta = \psi'(t)$, com exceção dos motores totalmente fechados e ventilados externamente, não seguem a equação básica de aquecimento e/ou resfriamento do corpo homogêneo. As curvas determinadas em sala de testes são variáveis, de uma máquina de um tipo, para outro e a única conclusão possível é que:

$$\Gamma = \psi(t)$$

ou, em outras palavras, as máquinas elétricas, respeitadas as poucas exceções, não têm uma constante térmica de tempo única, ou não pode ser admitida uma única constante térmica de tempo para uma dada máquina.

Isto é perfeitamente compreensível, porque cada corpo dentro da máquina, com calor específico diferente, submetido a condições

de dissipação de calor diferente, reage termicamente e independentemente, como um corpo homogêneo ou próximo dele, ainda mais, com diferenças de fase em tempo, para o aquecimento, bastante consideráveis.

É importante, também, notar que os fluxos térmicos se alteram em função do tempo de aquecimento, entre as várias partes que compõem a máquina.

Dependendo da forma geométrica e dimensões o fluxo térmico gerado, por uma bobina de excitação, dissipa-se através de sua superfície em contacto com o ar de ventilação, desde que a máquina seja ligada até a sua parada total, principalmente no caso do motor de tração em que a temperatura do ar no duto entre bobinas de excitação é praticamente constante, variando pouco e somente em função da temperatura ambiente (ventilação forçada), porém, também, dissipa-se da bobina de excitação, para a massa polar e carcaça, partes essas que trabalham como radiadores para a bobina. O fluxo térmico, porém, diminuirá e praticamente se extinguirá em direção à massa polar, quando a mesma atingir uma temperatura em que a transferência de calor seja quase inexistente.

O que se deseja afirmar com esse exemplo é que a temperatura na bobina de excitação sobe muito mais rapidamente daquela da massa polar, ocasionando dessa maneira um gradiente de calor variável entre as duas partes, variando o fluxo térmico nessa direção, o qual aumenta com o tempo, no sentido da carcaça e do duto de ar, aumentando a eficiência da ventilação e transferência de calor pelo ar e diminuindo em relação à massa polar.

Situações como essas, ocorrendo dentro da máquina, alteram a curva de aquecimento, em relação à curva teórica do corpo homogêneo.

Como conclusão, podemos citar que a função $\Delta\Theta = \psi(t)$ total para a máquina elétrica é uma função que envolve todas as demais $\Delta\Theta_i = \psi_i(t)$ de cada uma das partes de mesmo material que compõem a máquina, afetadas entre si por trocas de calor mútuas, cujo fluxo térmico não é constante e, também, afetadas pelas tolerâncias admissíveis de fabricação, as quais não podem ser controladas, para efeitos de condição térmica das máquinas.

Assim, como ilustração, indicamos como a Fig. (4) na página seguinte:



Fig. (4)

No ponto $A = (\Delta\Theta_p; t_1)$, a curva de aquecimento da máquina tem a constante térmica T_3 , pois intercepta a curva teórica de constante térmica de tempo T_3 , a qual, por sua vez, será de uma parte ou partes da máquina que, independentemente, se aquecem, como um corpo homogêneo e que sofreram a influência de outras partes que, conjuntamente ou não, desenvolveram seu aquecimento segundo T_1 e T_2 , de uma maneira integrada e função do sentido dos fluxos térmicos, como consequência do estabelecimento dos gradientes de temperatura.

A maneira como se dá a transferência de calor de um corpo a outro, ou de um conjunto de partes a outro conjunto de partes é perfeitamente determinada pela termodinâmica em seus textos básicos, porém, é totalmente impraticável para uso na totalidade da máquina elétrica, somente possível em algumas partes da mesma, e em casos específicos em que possam ser medidas temperaturas com certa precisão, como é o caso das cabeças de bobinas, caso este mais comum de cálculo de projeto citado nos livros e manuais de construção de máquinas elétricas. Este cálculo e sua constatação já se tornam impraticáveis em casos que partes trabalham como radiadores de outras, durante um certo tempo, $(t_k - t_{k-1})$ da função $\Delta\Theta = \psi(t)$ da máquina.

A exposição teórica do comportamento acima é existente em livros de eletrotécnica ou projeto de máquinas, para alguns componentes da máquina (4) e, de uma maneira geral, em qualquer texto básico de termodinâmica, porém, sua constatação como método e não somente do resultado é extremamente difícil e impraticável em alguns casos.

O presente panorama é que estimula, pelo menos para as

máquinas em que possam ser construídos protótipos, o desenvolvimento de um método de determinação de temperatura para a máquina como um todo, partindo de dados precisos de testes, através de medidas das resistências elétricas dos enrolamentos, que são parte integrante e melhor refletem a condição térmica do conjunto.

O método é, portanto, independente dos conceitos e parâmetros de projetos, podendo ser aplicado a uma máquina de dados desconhecidos e cujos resultados podem ser usados com segurança, quando assim forem desejados.

Como conclusão pela experiência adquirida no assunto, poder-se-ia terminar com a seguinte afirmação:

Para as máquinas elétricas em geral, a sua função $\Delta\Theta = \Psi(t)$ tanto mais se aproxima da função $\Theta = \Psi(t)$ do corpo homogêneo, quanto seja possível "homogeneizar" a máquina, entendendo-se por isso qualquer providência tomada no sentido de estabilizar os gradientes de temperatura, controlar os fluxos térmicos, desenvolver materiais com menores diferenças de calor específico e mais equivalência de condutibilidade térmica, eliminar, tanto quanto seja possível, o ar parado existente entre as várias partes da máquina.

Em outras palavras, se fosse possível encher completamente os interstícios de uma dada máquina elétrica, com um material de boa condutibilidade térmica, com o nível de isolamento desejado, ventilando-a externamente, certamente baixariamos sua temperatura máxima e sua função $\Delta\Theta = \Psi(t)$ se aproximaria da função equivalente do corpo homogêneo.

3.3- AQUECIMENTO DO MOTOR DE TRACÇÃO NO SEU USO COMUM EM LOCOMOTIVAS ELÉTRICAS

O motor de tração (MT) classifica-se na categoria de máquinas elétricas, que podem ter seu protótipo produzido e testado antes da produção industrial. Mais do que a máquina industrial, sua função $\Delta\Theta = \Psi(t)$ deve ser conhecida.

Como máquina transportada, instalada em locomotivas e submetida a um regime intermitente de carga, o qual não pode ser facilmente determinável, para toda e qualquer composição e que, por outro lado,

as suas temperaturas admissíveis máximas, acima daquelas normais para o motor industrial, reduzem sua vida útil em relação a outras máquinas elétricas, necessita de uma observação mais precisa e mais constante dos seus esforços térmicos.

Geralmente as partes termicamente mais solicitadas do (MT) são os enrolamentos de armadura, podendo, todavia, o resultado deste trabalho, ser usado para qualquer outro enrolamento. Convém salientar que a experiência mostra ser sempre a armadura que degenera primeiro como resultado de fadiga térmica.

O acesso à armadura de um (MT) depois de instalado em uma locomotiva é extremamente difícil e, mesmo que isso fosse possível, ter-se-ia um problema adicional em colocar um detetor de temperatura nos enrolamentos, visto que a armadura dos (MT) de corrente contínua constitui parte do rotor da máquina. A informação do detetor teria dificuldades em ser transferida do rotor para a parte estática da máquina, sem introdução de erro considerável. O equipamento para esse fim, todavia, deveria ser produzido para aguentar impactos de força, muito altos, e seria difícil consegui-lo de uma forma resistente e prática. Todas as tentativas, no sentido de se propor um sistema como o descrito, revelaram resultados inaceitavelmente imprecisos, ou, caso contrário, os dispositivos empregados eram exageradamente anti-econômicos, frágeis e pouco práticos.

3.3.1- LIMITES DE TEMPERATURA

Os limites de temperatura estabelecidos para máquinas elétricas rotativas, caso dos MT, segundo AIEE nº 11 ou ASA (C.35.1) são como segue:

ISOLAMENTO	DESEMPENHO	PARTE	MÉTODO	SOBRE-LEVAÇÃO TEMP.
Classe A	Contínuo	Armadura e campos, comutador e/ou coletor	Resistência	85°C
			Termopar	85°C
	Unihorário		Resistência	100°C
			Termopar	90°C
Classe B	Contínuo ou Unihorário	Armadura Campos Comutador e/ou Coletor	Resistência	120°C
			Resistência	130°C
			Termopar	120°C

ISOLAMENTO	DESEMPENHO	PARTE	MÉTODO	SOBRE-LEVAÇÃO TEMP.
Classe F	Contínuo ou Unihorário	Armadura Campos	Resistência	160°C
		Comutador e/ou Coletor	Resistência	155°C
Classe H	Contínuo ou Unihorário	Armadura Campos	Termopar	120°C
		Comutador e/ou Coletor	Resistência	160°C
			Resistência	180°C
			Termopar	120°C

O MT que foi estudado para este trabalho foi isolado em classe H, conforme a norma acima estabelecida, tanto as unidades usadas como protótipos, bem como todas as demais produzidas.

Todas as unidades foram instaladas em locomotivas elétricas de 2.200 CV contínuos, 72 toneladas de peso todo aderente, tipo BB com frenagem regenerativa e tensão de pantógrafo 3.000 V em corrente contínua.

O aquecimento dos (MT) em operação, isto é, instalados em uma locomotiva em número de 4, 6 ou eventualmente 8 é função da intensidade de corrente que circula pelos seus enrolamentos $\Delta\theta = \psi(I)$ e do intervalo de tempo que a corrente circula quando em regime intermitente.

Como as locomotivas elétricas não têm um regime determinado de trabalho e, conseqüentemente, os (MT) também, a aceitação dessas máquinas tem sido feita em face de dois regimes básicos, determinados, também, por normas.

O primeiro é chamado regime contínuo, isto é, o motor deverá suportar uma certa intensidade de corrente a uma tensão pré-fixada até a estabilização completa de temperatura nos seus enrolamentos e a sobrelevação de temperatura atingida deverá ser, no máximo, igual àquela permitida quanto à classe de isolamento estabelecida por normas.

O segundo é o chamado regime unihorário e define-se

como sendo a corrente máxima admitida pelo motor a uma tensão pre-fixada, a qual eleva a temperatura dos enrolamentos de forma a não ter uma sobrelevação maior do que a permitida pela classe de isolamento estabelecida em norma.

Para o primeiro regime:

$\Delta\theta$ constante quando $t = \infty$ e \ll limite da classe

Para o segundo regime:

$\Delta\theta \ll$ limite de classe para $t = 1$ hora.

Os regimes citados para accitação da máquina são insuficientes para se ter razoável segurança que os MT irão trabalhar nas vizinhanças dos limites de classe de isolamento, ou seja, não se conseguirá

$$\Delta\theta = \Psi(t) \text{ e } \Delta\theta = \Psi(I)$$

e no regime intermitente

$$\Delta\theta = \Psi(t, I)$$

por que I é uma variável aleatória. Usando somente os dados de accitação previstos por norma, gostaríamos de salientar que:

se I_c - for a corrente estabelecida para regime contínuo e $\Delta\theta_{max}$ a sobrelevação máxima permissível para $t = \infty$, conforme a classe de isolamento. (no caso do MT, em questão $\Delta\theta_{max} = 160^\circ\text{C}$ na armadura).

e I_h - for a corrente estabelecida para regime unihorário e $\Delta\theta_{max}$ a sobrelevação máxima permissível para $t = 1$ hora, conforme a classe de isolamento. (no caso do MT em questão, $\Delta\theta_{max} = 160^\circ\text{C}$ na armadura).

poderão acontecer casos, em operação, tais como:

$$\begin{aligned} I &< I_c \\ I_c &< I < I_h \\ I &> I_h \\ I &>> I_h \end{aligned}$$

e, ainda, $\Delta\theta \ll \Delta\theta_{max}$ ser mantido.

Cumpre, ainda, estabelecer que, nos casos fortuitos, em que ocorrerem $\Delta\theta > \Delta\theta \text{ max.}$, a máquina não ficará seriamente comprometida, dependendo de t ser menor que qualquer valor pre-estabelecido. O que não poderá ocorrer será:

$\Delta\theta > \Delta\theta \text{ max.}$ para $t > 1$ hora, por exemplo, dependendo, ainda, de $\Delta\theta$ à $t = 0$

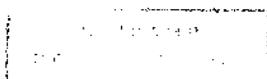
Fica mencionado o presente fato, para que quando se desejar usar um trem gabarito e, com ele, colher os dados necessários para o estabelecimento do "Perfil Térmico, caso for constatado posteriormente que alcançou um valor maior que $\Delta\theta \text{ max.}$ por alguns minutos, entenda-se que os MT não ficam, por isso, comprometidos.

Com as dificuldades e as situações apresentadas, surge um problema básico para a ferrovia e a indústria ferroviária, o qual pode ser enunciado resumidamente como segue:

"Como carregar uma composição, movida por uma locomotiva elétrica, em um determinado perfil de terreno e com horário pré-estabelecido, de maneira que os MT não estabilizem ou não passem de uma maneira comprometedora da sobrelevação de temperatura admitida pela classe de isolamento e, por outro lado, carregar tal composição com pleno aproveitamento, mantendo os MT dentro das condições de carga e temperatura aceitáveis, com máxima utilização e, portanto, otimização da composição."

Oferece-se como solução para tal problema o Método do Perfil Térmico.

II PARTE - O MÉTODO DO PERFIL TÉRMICO



CAPÍTULO IV - TESTES ESPECIAIS

4.1- TESTES DE CALIBRAÇÃO

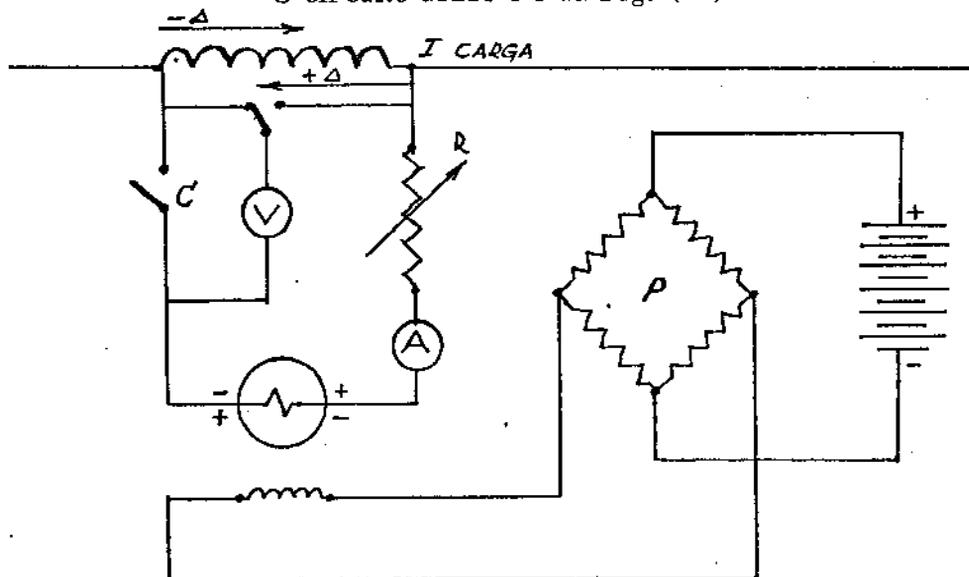
Não seria possível praticar qualquer teste de aquecimento em um, ou vários motores protótipos de uma série, se não se desenvolvesse também um teste apropriado e seguro para a calibração da comutação das máquinas testadas. Os resultados deste teste em particular são, obviamente, depois aplicados em toda linha de produção e os seus resultados rigorosamente observados e inspecionados.

(a) Ensaio e ajustagem da comutação; levantamento da faixa escura

O ensaio em questão, dependendo do rigor que se deseja, pode ser praticado por observação visual ou através de osciloscópio. A finalidade fundamental é submeter a máquina a condições de compensação diferentes e observar quando se obtém as primeiras faíscas debaixo das escovas coletoras.

A variação de compensação é obtida através de um enxerto artificial de corrente nos enrolamentos dos polos de comutação, podendo esta corrente "artificial" estar em fase com a corrente de carga da máquina (M. T. é do tipo de enrolamento série) ou a 180°. A corrente é enxertada nos dois sentidos com relação à corrente de carga e em várias condições de carga.

O circuito usado é o da Fig. (5)



Um gerador auxiliar G.A. ligado aos pontos terminais dos enrolamentos das bobinas de polos de comutação, através de uma chave C e um reostato R, e cujo campo é excitado através de uma ponte de reostatos P que possibilita tornar a tensão em seus terminais ora positiva ora negativa, com relação à queda de tensão causada pelo mencionado campo, trabalha como uma fonte de adição ou subtração de corrente no mesmo da maneira como segue:

Por meio do campo do gerador auxiliar a tensão, através da chave C é levada a zero. Fecha-se a chave e liga-se o voltmetro V aos dois terminais do campo de comutação, independentemente, a fim de verificar a queda de tensão. Aumentando-se a excitação do gerador auxiliar, nota-se, primeiramente, a circulação de corrente pelo ampermetro A e simultaneamente, um aumento, ou queda da tensão indicada em V. O aumento da tensão verificada em V corresponderá a um incremento positivo $+\Delta i$ à corrente de carga I do M.T., por outro lado a queda de tensão indicada por V significará um incremento negativo $-\Delta i$ à corrente I.

Mantendo-se a corrente de carga constante, primeiramente o incremento positivo $+\Delta i$ é aumentado paulatinamente até que se note visualmente, ou por meio de osciloscópio, o aparecimento de faíscamento entre escovas e comutador, esta operação é repetida para 25, 50, 75, 100, 125 e 150 por cento da corrente nominal de regime contínuo. Procede-se da mesma maneira com a corrente (i) incremental invertida, isto é, $-\Delta i$ e para as mesmas condições de carga. Dos dados registrados obtém-se o gráfico da Fig. (6)

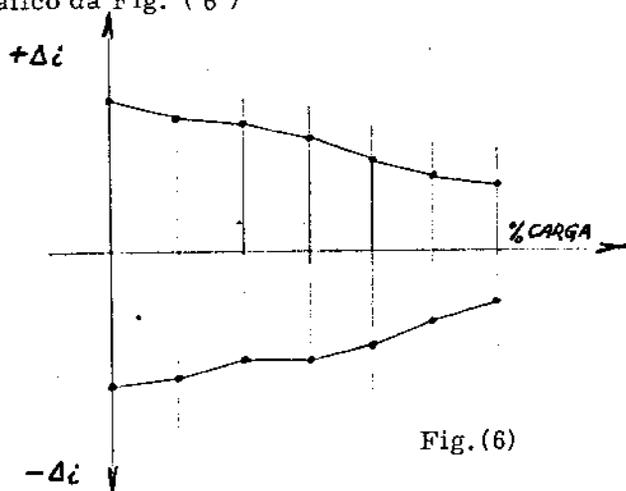


Fig.(6)

Outra representação possível é colocar nas ordenadas a porcentagem Δi em relação à corrente de carga I, ou seja:

$$\% = \frac{\Delta i}{I} \times 100$$

e a representação gráfica resultante seria como a da Fig. (7)

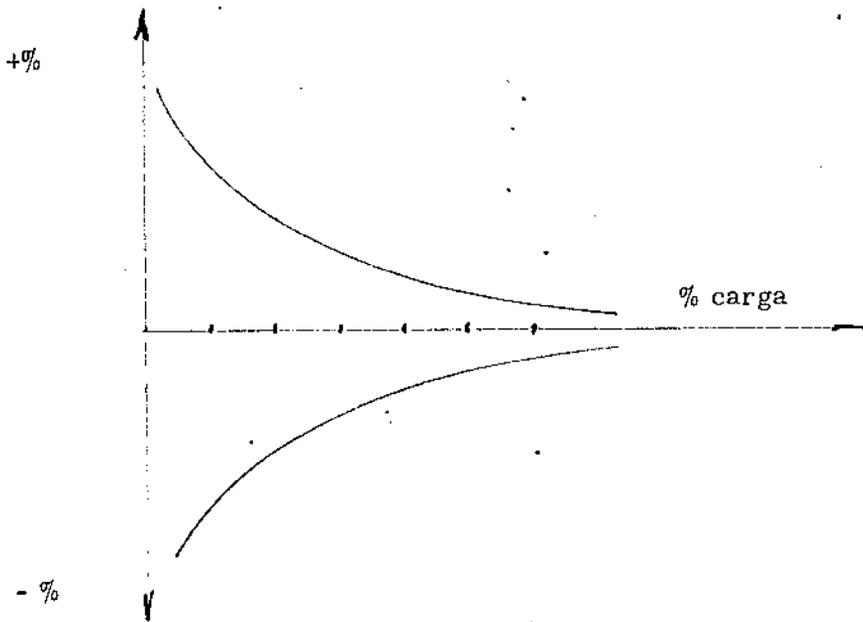
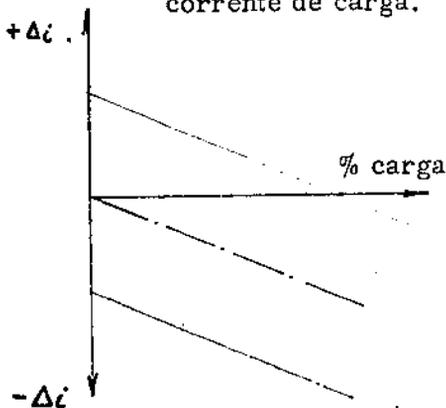


Fig. (7)

As curvas assim obtidas estabelecem os limites de faixa em que a máquina sendo testada funciona livre de faiscamento. Para aplicação em máquinas do tipo série todavia é extremamente complicado devido ao complexo circuito necessário para controlar a corrente de carga. O circuito é o mesmo usado para ensaios de aquecimento, o qual será demonstrado mais adiante neste trabalho.

A análise dos resultados deste teste em particular, a explicação e as correções chamadas calibrações são como segue:

- (a) Com $-\Delta i$, o aparecimento e a intensidade do faiscamento tende a ser cada vez maior, conforme aumenta a corrente de carga. Fig. (8). As linhas representativas dos limites de faixa, formam



linhas descendentes, o que indica um excesso de força magneto motriz nos enrolamentos dos pólos de comutação, isto é, excesso de amperes-espira ou gilberts.

Fig. (8)

Neste caso conclui-se que a comutação está supercompensada.

A redução da corrente de campo de comutação é viável por meio de uma resistência ligada em paralelo com os enrolamentos de comutação, porém não se opta por essa solução, principalmente em motores de tração, porque acarretaria a instalação a mais de um outro acessório para o qual não há espaço, e que sem dúvida será uma fonte de problemas posteriores. Uma segunda solução seria diminuir o número de espiras das bobinas dos pólos de comutação, solução esta pouco recomendável, pois acarretaria praticamente a confecção de bobinas novas, além do fato que este tipo de bobinas têm sua força magneto motriz conseguida a custa de corrente e não de espiras. A eliminação de uma espira das bobinas pode corrigir o problema da supercompensação e criar o da subcompensação.

A correção para este tipo de calibração é a de aumentar-se a relutância do circuito magnético que compreende as massas polares dos enrolamentos dos pólos de comutação, o que se consegue diminuindo a altura do núcleo do pólo de comutação e introduzindo-se, no lugar do material removido, um calço de outro material não magnético, por exemplo - latão.

Procede-se, desta maneira, em duas ou no máximo três tentativas até que o diagrama de faixas fique perfeitamente centralizado.

- (b) Quando testando-se com $+\Delta i$ verifica-se que o incremento positivo predomina com o aumento da corrente de carga. Os limites da faixa de operação possível tornam-se

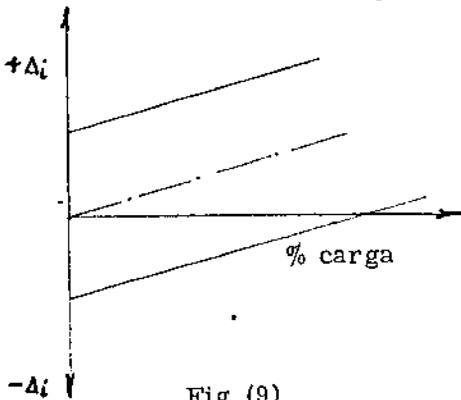


Fig. (9)

ascendentes, o que indica falta de força magneto motriz nos enrolamentos dos pólos de comutação. Fig. (9). A comutação está subcompensada. A solução mais viável para a calibração, nestes casos, é a de diminuir o entreferro das massas polares dos pólos de comutação, reduzindo assim a relutância dos circuitos magnéticos, mantendo-se a força magneto motriz existente e aumentando o fluxo de compensação. Este tipo de cali

bração é mais raro de acontecer, porque os projetistas de uma maneira geral superdimensionam a força magneto motriz nos pólos de comutação, a fim de cair sempre no caso (a) de supercompensação com excesso de fluxo, o que permite sempre uma calibração perfeita.

- (c) Observa-se no diagrama de faixa que as linhas limites são inicialmente paralelas ao eixo das abcissas, porém acima de uma determinada corrente de carga, tendem a se tornar ascendentes. Fig. (10)

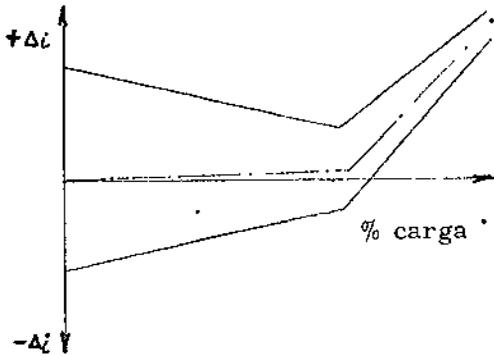


Fig. (10)

Este comportamento indica que está havendo saturação no circuito magnético de comutação. Não existe solução mais ou menos imediata para este tipo de fenômeno. Não se trata de uma simples calibração, mas de mau projeto, se o ponto de inflexão, ou seja o início da saturação,

se dar com $I < 150\% I_c$ em uma máquina industrial e, pelo menos acima da máxima corrente, a que um motor de tração irá suportar na locomotiva a que estiver destinado a qual pode vir a ser da ordem de 4 a 5 vezes o valor de I_c . Este caso está sendo citado, porque é razoavelmente comum em um novo estudo de aplicação de M. T. (s) para uma nova locomotiva, que a máquina tenha potência suficiente e condições térmicas também favoráveis, porém não tenha condições de trabalhar, por falta de material suficiente nos circuitos magnéticos.

- (d) No diagrama de faixas verifica-se que a linha central coincide com o eixo das abcissas, porém as linhas limites se interceptam no mesmo eixo, a uma determinada corrente

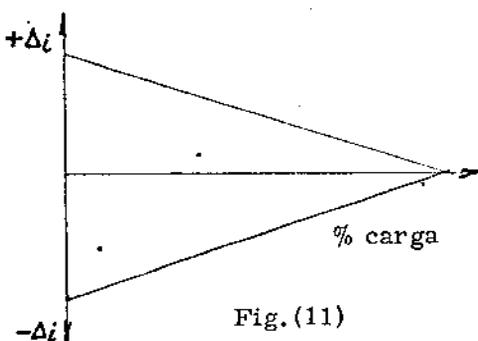


Fig. (11)

de carga, não se conseguindo durante a observação fazer com que a máquina trabalhe livre de faiscamento acima dessa corrente.

Este caso indica escassez de densidade de corrente nas escovas. O problema pode ser de simples falta de contato nas escovas. A calibração pode ser feita com o escalonamento das escovas de maneira que estas consigam cobrir um maior número de lâminas do comutador.

- (e) O caso mais simples de calibração acontece quando o diagrama de faixas indica as linhas limites paralelas ao eixo das abcissas, porém a linha central fica acima ou abaixo do eixo.

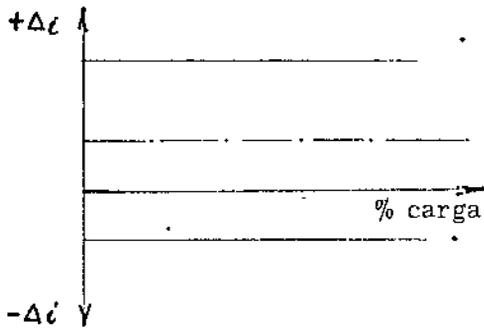


Fig. (12)

A calibração neste caso é feita por deslocamento do porta escovas no sentido a apropriado, e deve ser tal que a máquina funcione livre de faiscamento, pois este tipo de deslocamento afeta tanto a saturação total em vazio da máquina, como sua própria regulação.

Os casos acima mencionados, para calibração de uma máquina elétrica, são os que ocorrem quando se pretende deixar o M. T. preparado para os testes de carga subsequentes. Ao mesmo tempo os dados necessários são determinados para informação nas áreas de produção das unidades iguais às que se perfazem os testes de protótipo.

A comutação não calibrada, prejudica os testes de natureza térmica, pois provoca desgaste do comutador e das escovas devido à sobre-aquecimento dos mesmos. A máquina também fica sempre sujeita a fechamento de arco (flash over) entre porta-escovas, ou entre porta-escovas e terra, o que poderá vir a destruir o comutador, durante os testes. A saturação e regulação também ficam afetadas, caso não se calibre a máquina convenientemente.

Outrossim, nos M. T. usados como protótipo, foram repetidos todos os testes, em todas as condições de funcionamento do motor, ou seja:

- em rotação horária;
- em rotação anti-horária;
- a campo pleno;
- com 50% de campo;
- como gerador excitado independentemente.

O levantamento das características térmicas do M. T., bem como os ensaios de aquecimentos, sucessivos, que são necessários, constituem as características mais importantes para a plena aplicação do método proposto e são também as características julgadas mais importantes para o motor. Estas características limitam o peso da composição em relação ao perfil topográfico da estrada e a velocidade em que se deseja operar.

As características térmicas distinguem-se em duas categorias:

(a) Características em regime contínuo:

Determina-se a máxima corrente de carga aplicável ao motor por um tempo indefinido. O M. T. não deve exceder em partes indicadas por normas, a sobrelevação de temperatura especificada para a classe de isolamento. No caso do M. T. em questão, como já ficou registrado, a classe é H, a qual permite uma sobrelevação de temperatura sobre a ambiente de 160°C na armadura, e 180°C nos enrolamentos de campo principal e de comutação.

(b) Regimes de tempo reduzido:

Determinação das correntes de carga aplicáveis ao M. T. em tempos específicos sem que a sobrelevação de temperatura ultrapasse os limites da classe de isolamento, como mencionado em (a). Neste teste a corrente de carga aplicada é tanto maior quanto menor é o tempo durante o qual o motor é solicitado.

O levantamento destas características levado a cabo para o M. T. em questão foi feito, através de uma série de ensaios de aquecimento e resfriamento, com diversas cargas e nas condições mínimas de ventilação do motor em exame. A fim de facilitar a descrição destes ensaios, dividi-los em alguns passos distintos, os quais foram seguidos.

4.2.1 - Ligações:

2 motores iguais gêmeos foram acoplados mecanicamente, por acoplamento flexível (2 luvas ranhuradas ligadas entre si através de molas, também interligadas eletricamente conforme esquema da Fig. (13). O tipo de ligação estudado e desenvolvido, permite a colocação de

carga no M. T. desde um mínimo até o máximo desejável para o teste, com qualquer tensão que se necessitou trabalhar.

4.2.2 - Medição de temperaturas:

Para controlar a temperatura foram usados termopares e potenciometro, distribuídos da seguinte maneira:

3 pontos distribuídos sobre um polo do campo principal;

3 pontos distribuídos sobre um polo do campo de comutação;

1 ponto em cada um dos mancais;

1 ponto na superfície externa da carcaça;

1 ponto na entrada de ar;

2 pontos no ar ambiente a não menos de 4 m de distância da saída e entrada de ar para o motor.

Foram também observadas as quedas de tensão nos enrolamentos de excitação e de comutação, para que através da corrente circulante (resistência ôhmica dos enrolamentos de campo), as temperaturas fossem devidamente calculadas no decorrer do ensaio. No teste em regime contínuo, a estabilização térmica da máquina foi baseada, para o corte de energia e subsequente tomada de medidas de resistência de armadura, nessas observações.

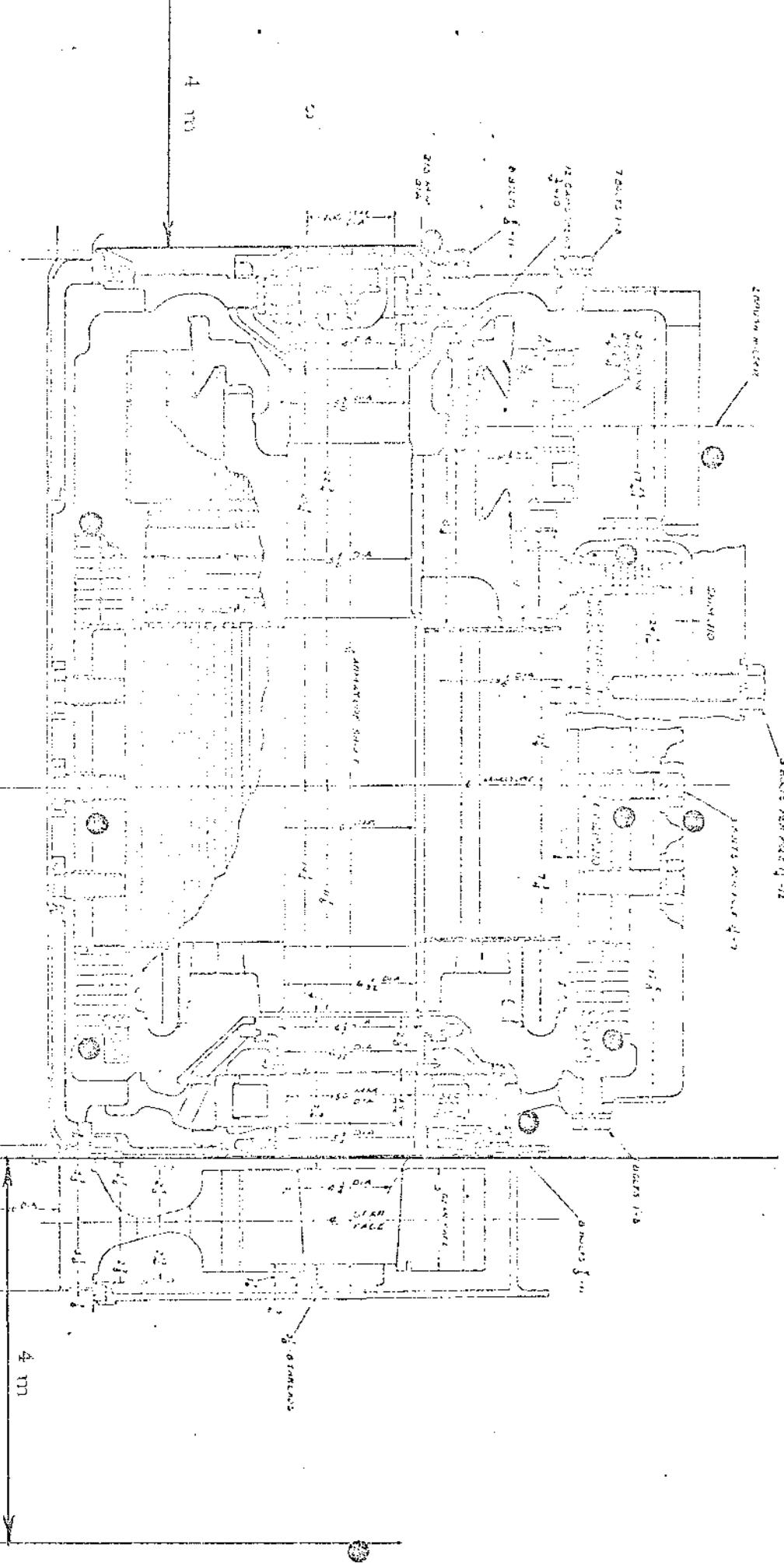
4.2.3 - Ventilação :

Foi calibrado o volume de ar de ventilação (o M.T. em questão, e de uma maneira geral para locomotivas elétricas não é auto-ventilado), o ajuste foi feito por intermédio da medição de queda de pressão através de um orifício calibrado localizado nos tubos de entrada de ventilação do motor, e cujas dimensões são especificadas nas normas ASME ou "Flow-Measuraments"(5)O ar de ventilação foi suprido, por ventilador adequado, acoplado a um motor através de tubulação apropriada. Foram tomadas as pressões estáticas na entrada da câmara do comutador do M. T. testado, correspondente às diversas vazões de ar as quais são de conformidade com as vazões que o ventilador da locomotiva irá suprir ao motor quando instalado e em operação. Foram seguidos os cálculos e correções (pressão barométrica e umidade relativa do ar) as quais constam também das normas supra citadas.

4.2.4 - Medidas de resistência ôhmica:

Foram marcadas 2 lâminas do comutador cujo in-

LOCALIZAÇÃO DE TERMOPARES



tervalo é igual ao intervalo, contado em número de lâminas, entre o assento das escovas de dois porta escovas adjacentes. A resistência foi medida entre lâminas com ponte dupla tipo KELVIN. As resistências dos campos de excitação e comutação foram verificadas pelo método de voltmetro - ampermetro, usando a mesma fonte de suprimento de perdas e o mesmo circuito do ensaio de aquecimento.

4.2.5 - Circuito de Teste - "Pump Back"

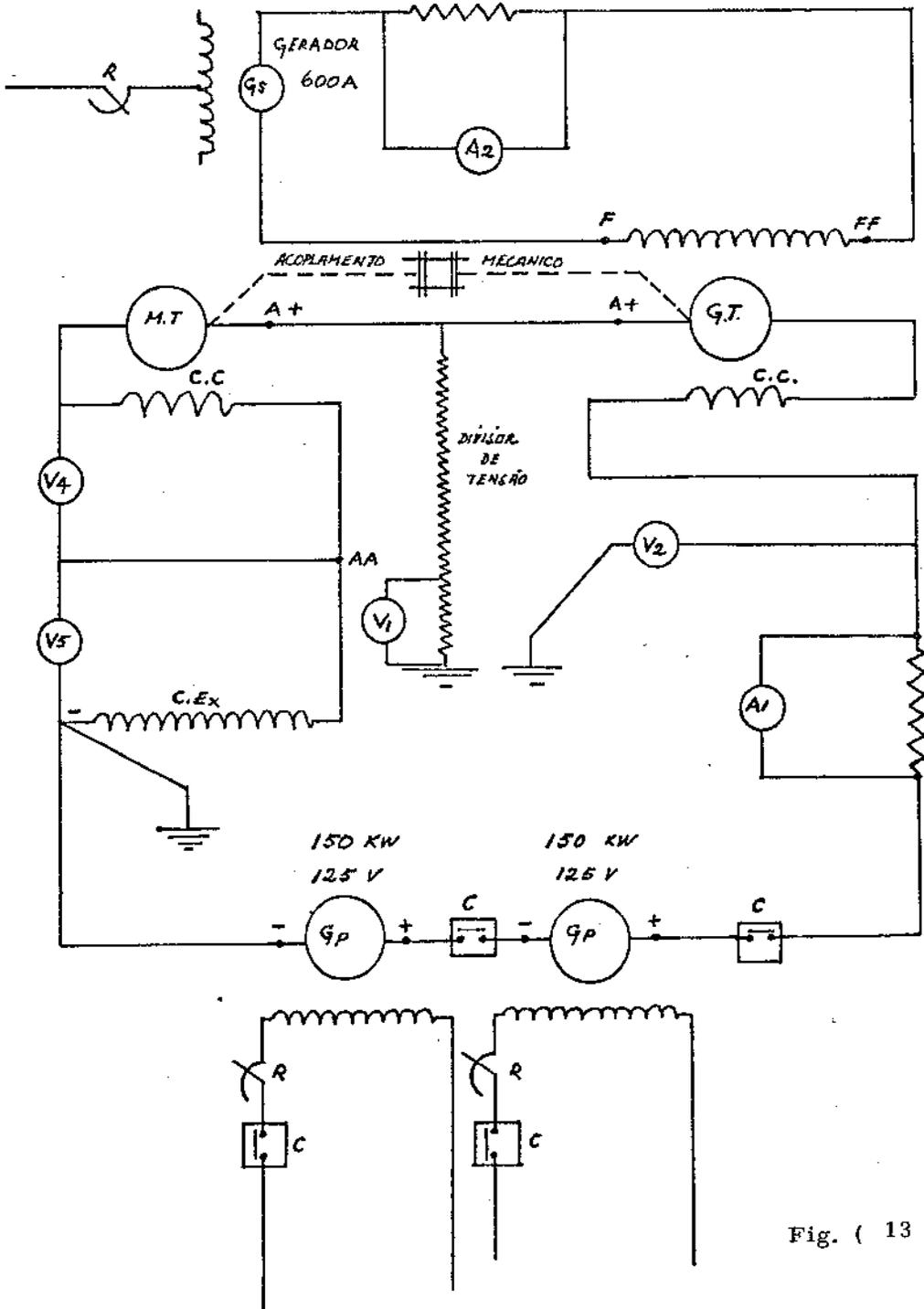


Fig. (13)

4.2.6 - Execução dos Testes :

Os motores foram acionados (uma máquina, como motor e outra como gerador) nas condições de tensão , corrente e ventilação desejada , e durante o período de tempo requerido . No caso de regime de tempo reduzido, durante o número de minutos ou horas especificadas e no caso de regime contínuo , durante um período de tempo tal que todas as temperaturas medidas ficaram estabilizadas, o que foi considerado quando em 3 leituras consecutivas em intervalos sucessivos de 30 minutos as temperaturas registradas não indicaram variação de leitura superior a 0,5°C .

Foram verificadas também as quedas de tensão nos enrolamentos de campo as quais permaneceram invariadas nas últimas 3 leituras .

Considerado estabilizado o sistema , foram desligados os campos dos geradores supridores de perdas (Gp), sem porém que fosse aberto o circuito principal e sem desligar o gerador (Gs).

Agindo-se , desta maneira , consegue-se um efeito de freio, o qual para o conjunto M.T. e G.T. em um tempo aproximado de 15 a 20 segundos . O circuito principal aberto em seguida proporciona a oportunidade para a medição das resistências da armadura (usou-se na ocasião as mesmas lâminas já marcadas no comutador, através das quais foi também medida a resistência a frio). Foram feitas leituras seguidamente durante os primeiros 20 minutos após a parada e depois de 10 em 10 minutos, até o resfriamento total da máquina .

Abreviações usadas na Fig. (13)

- R - Reostatos
- Gs - Gerador de alimentação dos enrolamentos de excitação do motor de tração acionado como gerador .

Abreviações usadas na Fig. (13). (cont.)

- A₂ - Amperímetro indicador de corrente de excitação do motor de tração operando como gerador.
- MT - Motor de Tração.
- GT - Motor de Tração trabalhando como Gerador.
- AA-A - Terminais de armadura.
- C.C - Enrolamentos dos interpolos compensadores.
- C.Ex. - Enrolamento de excitação de motor de tração.
- FF-F - Terminais de enrolamento de excitação do motor de tração trabalhando como gerador .
- A₁ - Amperímetro indicador de corrente de carga do sistema.
- Gp - Geradores supridores de perdas .
- V₄ - Voltímetro indicador de queda de tensão no enrolamento dos interpolos .
- V₅ - Voltímetro indicador de queda de tensão no enrolamento de excitação do motor de tração.
- V₁-V₂ - Voltímetro indicador de tensão de armadura.
- C - Contactores .

4.2.7 - Análise do aquecimento e resfriamento da máquina :

Por meio das quedas de tensão e correntes nos enrolamentos dos campos série e comutação a frio , e no instante do desligamento, é calculado o acréscimo de temperatura sobre a ambiente , sofrido por esses enrolamentos durante o ensaio .

As resistências medidas na armadura, após o desligamento são colocadas em um gráfico (papel mono-logarítmico) em função do tempo decorrido após o desligamento Fig.(14) . A curva assim determinada é extrapolada e a resistência no momento zero, ou instante de desligamento foi obtida, isto é a resistência dos enrolamentos de armadura, correspondente à temperatura da máquina em regime, a qual foi calculada a seguir . Desta maneira ficou determinada a sobrelevação de temperatura sobre o ambiente.

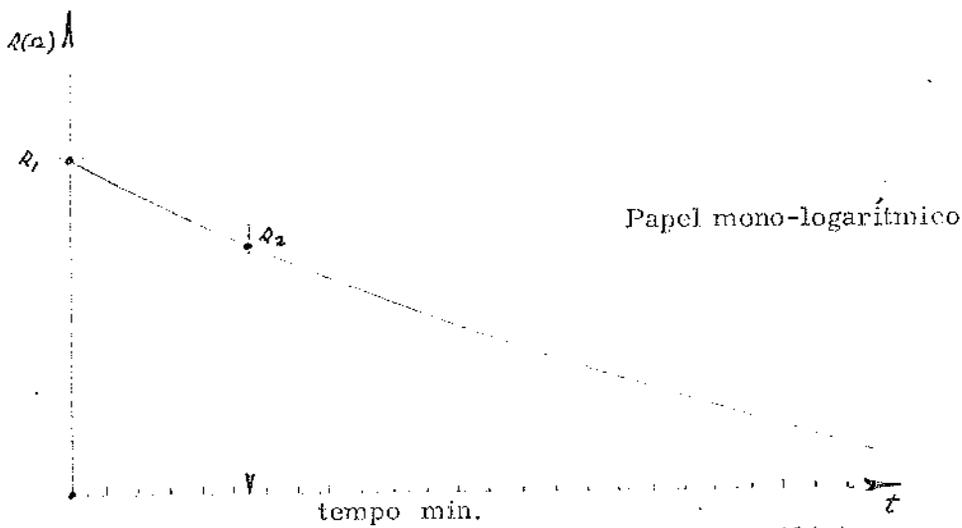


Fig. (14)

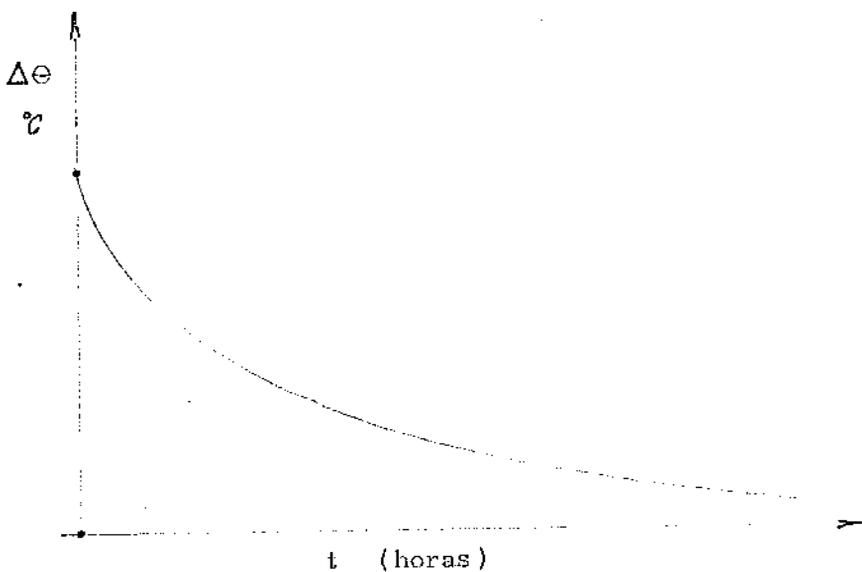
(vide curva real na página seguinte - Fig. (16)

R_1 = Resistência correspondente à temperatura no instante de parada do sistema (corte de energia)

R_2 = Primeira leitura feita

Com as resistências, medidas após o desligamento, obtém-se diretamente a curva $\Delta \Theta \equiv \varphi(t)$ para o resfriamento da máquina. Isto usando-se os valores de resistência tomados de 10 em 10 minutos até a completa estabilização com a temperatura ambiente.

Este gráfico permite a análise do resfriamento da máquina durante uma parada de determinado tempo e após funcionamento em determinado regime de carga. Fig. (15)



$$R_0 = \frac{11,7}{325} = 0,0360 \Omega$$

$$R_T = 0,0500 \Omega \quad \text{à} \quad 26,0^\circ\text{C}$$

$$1,000 \text{ mAs} - 1,000 \text{ mAs} - 510 \text{ mAs}$$

$$T = 10 \text{ min}$$

Medição: $R_0 = 0,0220 \Omega$ d'amb. de $26,2^\circ\text{C}$

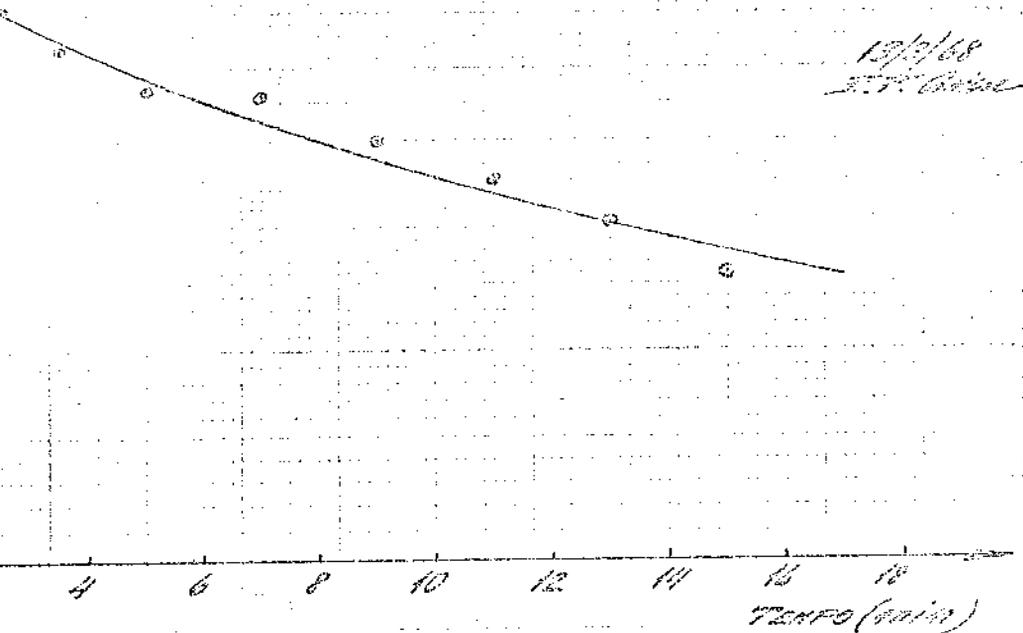
$$R_T = 0,0500 \Omega \quad \text{à} \quad 30,0^\circ\text{C}$$

Amb. início do ensaio = $25,0^\circ\text{C}$

" fim " " " = $26,2^\circ\text{C}$

$$\Delta T = \frac{0,0220}{0,0500} (234,5 + 30,0) - (234,5 + 26,2 - 1,2)$$

$$\Delta T = 153,8^\circ\text{C}$$



TEMPO SÉRIE:

$$R_0 = \frac{31,4}{325} = 0,0966 \Omega \text{ d'amb. de } 26,2^\circ\text{C}$$

$$R_T = 0,0500 \Omega \quad \text{à} \quad 26,0^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = \frac{0,0966}{0,0500} (234,5 + 26,0) - (234,5 + 26,2 - 1,2)$$

$$\Delta T = 159,9^\circ\text{C}$$

TEMPO COMUT:

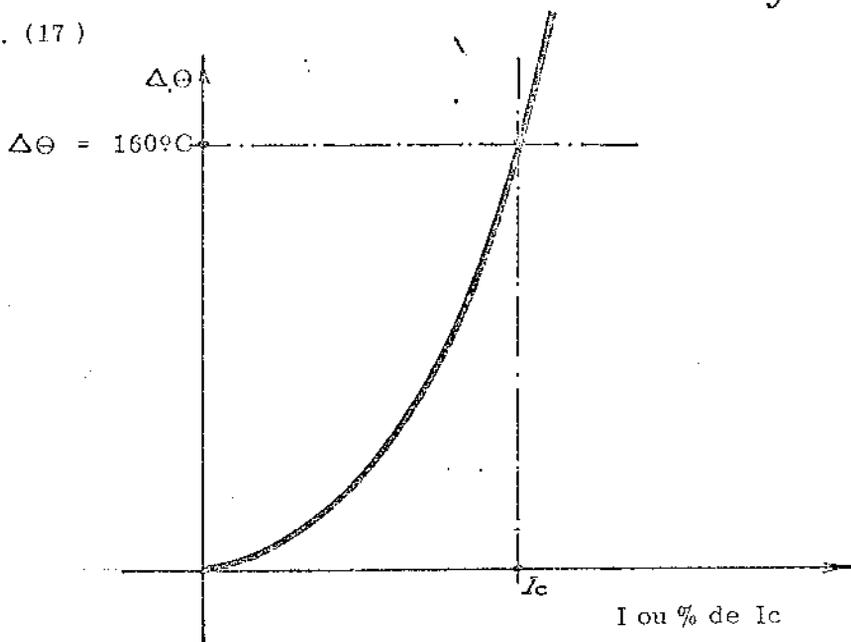
$$R_0 = \frac{13,7}{325} = 0,0421 \Omega \text{ d'amb. de } 26,2^\circ\text{C}$$

$$R_T = 0,0310 \Omega \quad \text{à} \quad 26,0^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = \frac{0,0421}{0,0310} (234,5 + 26,0) - (234,5 + 26,2 - 1,2)$$

$$\Delta T = 34,2^\circ\text{C}$$

Após o transcurso de um ensaio de aquecimento, como o que acabou-se de descrever, e tendo-se constatado que todo o equipamento e registro de dados está compatível entre si, dá-se início a uma série de aquecimento com correntes $I \leq I_c$ ou seja com 100%, 75%, 50% e 25% da corrente de regime contínuo, (no caso, usa-se uma corrente I_c anteriormente especificada, para o motor a ser usado na locomotiva). Obtem-se como resultado dessa sucessão de testes de aquecimento, uma relação entre I e as diversas sobrelevações de temperatura, ou seja $\Delta\theta = \varphi(I)$ para $I \leq I_c$.
Fig. (17)



(vide curva real na página seguinte -Fig (18).)

Para o valor I_c corresponde nessa curva a sobrelevação $\Delta\theta = 160^\circ\text{C}$ relativa à máxima sobrelevação permitida pela classe do M. T. em questão.

O traçado desta primeira curva, que é fundamentalmente uma das principais usadas no método proposto, leva de 4 a 5 dias para ser obtida, visto que cada ensaio de aquecimento é feito partindo-se com a máquina fria. Não se repetiu ensaio de aquecimento seguido, para evitar a possibilidade da máquina não estar completamente resfriada e estável termicamente.

4.3- OBTENÇÃO DA CURVA $I \equiv \varphi(1/t)$

O ensaio realizado, para obtenção da curva representativa da função acima, é provavelmente o mais delicado e difícil.

Para o caso usou-se o mesmo circuito da Fig. (13), e a este ensaio chamou-se de "Ensaio de aquecimento à tempo reduzido". Neste ca-

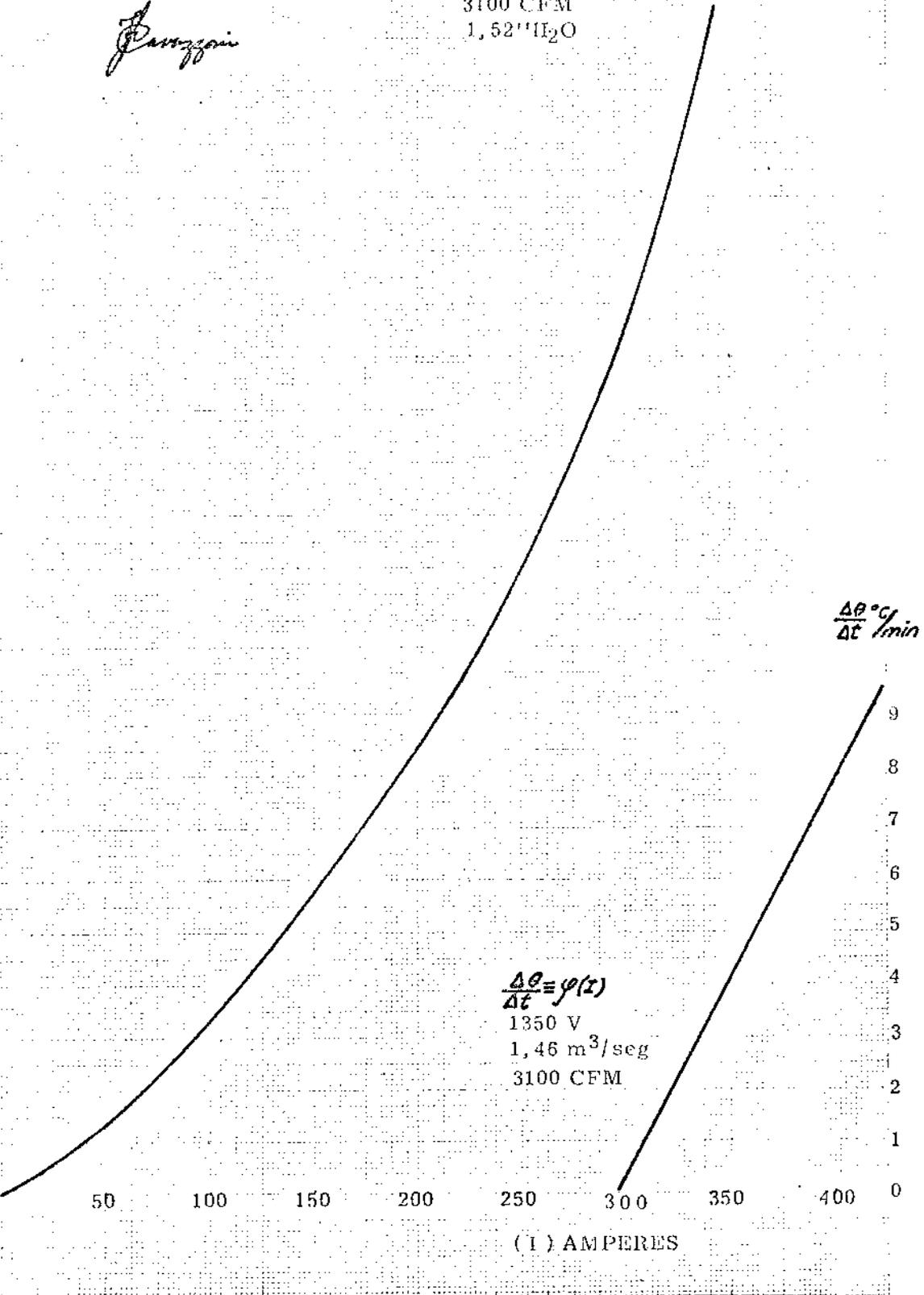
CURVA $\Delta\theta = \varphi(I)$
ARMADURA
Motor GE- 734A2

1350 Volts 1,46 m³/segundo
38,6 mm H₂O (Camara do Comutador)
Ar Padronizado
Fator de Correção 1.08

Campinas 9/2/68

3100 CFM
1,52" H₂O

Barzoni

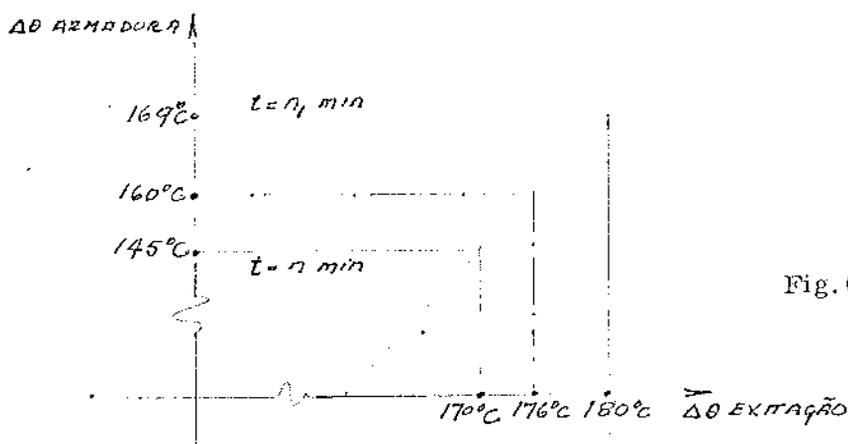


so usou-se correntes de carga $I \geq I_h$ até a máquina atingir a sobrelevação de temperatura permitida pela classe, cronometrando-se o tempo para que isto acontecesse.

A dificuldade técnica necessária na sala de ensaio, para a realização deste teste, é bastante grande, pois trata-se de medir na armadura um $\Delta \theta = 160^\circ\text{C}$ com uma corrente tomada aleatoriamente de 1.2 a 1.5 vezes ou também 2 vezes a corrente I_c , especificada.

A primeira vez, para um primeiro ponto da curva, usa-se uma corrente digamos 1.5 vezes I_c . O máximo que se pode fazer, quando a máquina está sendo testada a primeira vez com $I = 1.5 I_c$ é observar como se eleva a temperatura nos enrolamentos de campo, através do método do voltímetro - ampermetro.

Desligando-se o sistema quando, por exemplo o enrolamento do campo série de excitação estiver a $\Delta \theta = 170^\circ\text{C}$ e medindo a resistência da armadura, usando-se os mesmos procedimentos já mencionados em 4.2.7 obtém-se para armadura $\Delta \theta = 145^\circ\text{C}$, repete-se o ensaio (é necessário deixar a máquina esfriar) para $\Delta \theta = 180^\circ$ para o enrolamento de campo série de excitação, e numa segunda tentativa obtém-se $\Delta \theta = 180^\circ\text{C}$ (excitação) e $\Delta \theta = 169^\circ\text{C}$ armadura. Como se está trabalhando com pequenas variações de $\Delta \theta$, pode-se, sem erro prejudicial, proceder como segue:



A próxima tentativa será, portanto, desligar o sistema quando o $\Delta \theta$ para o enrolamento de excitação estiver em 176°C .

Trabalhando-se, desta maneira, conseguiu-se vários pontos da curva representativa de $I = \int (1/t)$ com não mais do que três tentativas para cada ponto.

Neste ensaio é fundamental cronometrar o tempo em que a máquina leva para que a armadura se eleve a $\Delta \Theta = 160^{\circ}\text{C}$ para cada corrente usada no teste.

Três pontos com tempos diferentes e mais o ponto dado pelo ensaio de aquecimento em regime unihorário já são suficientes para o estabelecimento da curva representativa de $I \equiv \varphi(1/t)$ que tem a forma aproximada como na Fig. (20).

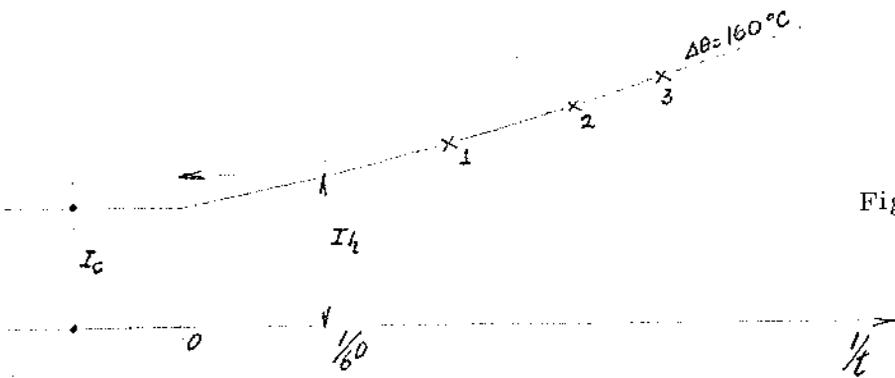


Fig. (20)

(vide curva real na página seguinte - Fig. (21))

Extrapolando-se a curva que passa pelos pontos 1, 2, 3 obtidos em teste e mais aquele representativo de I_h , a intercessão na ordenada dá o valor de I_c (O qual pode sempre posteriormente ser novamente confirmado por teste de aquecimento). Entendemos ser essa também a melhor maneira de determinar a potência de um motor de tração qualquer, a uma dada tensão aplicada.

Resultados dos testes praticados no M. T. em pauta, constam em anexo.

Os resultados dos testes de aquecimento, as curvas de resfriamento, a função $\Delta \Theta \equiv \varphi(1)$ e $I \equiv \varphi(1/t)$ constituem os dados básicos do motor que juntamente com os dados da estrada $I \equiv \varphi(t)$ dão possibilidade ao traçado do "Perfil Térmico" para uma composição típica em um trecho de estrada.

4.4- PREPARAÇÃO DE DADOS

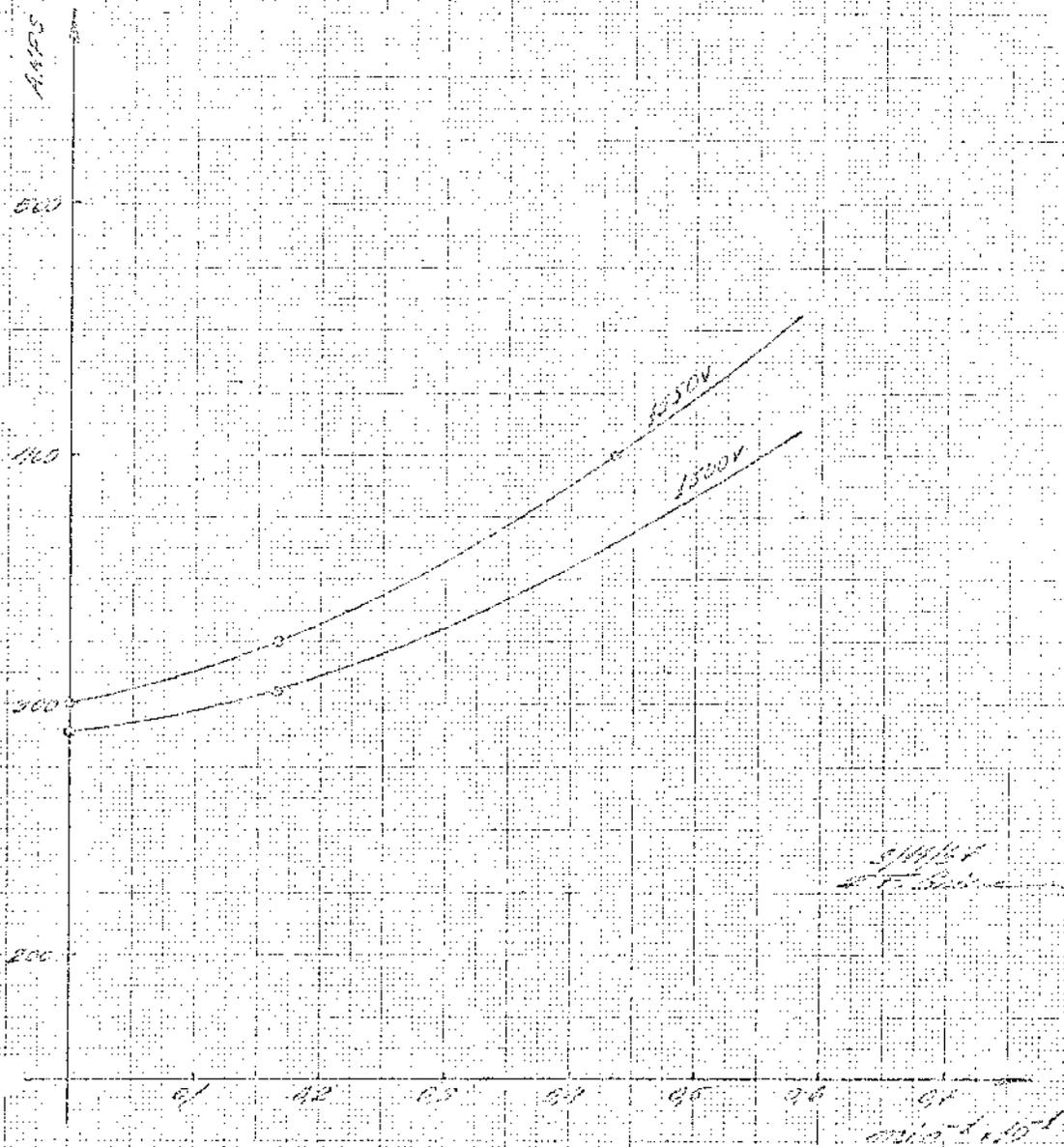
4.4.1 - T (C. T. T = Constante)

Como já foi dito anteriormente, as máquinas elétricas, principalmente as máquinas fechadas, com ventilação externa, as

77-100-010

N-1984

SOPRACIT DE ADMISSIÓ
PERMISSIÓ DEL TORNADO DE TIEMPO
TORNADO-SE CON MÁQUINA FICSA
VENTILADA CON FICSA DE CALOR
MOTOR ELÉCTRICO DE 1000 CV
NO. 15110



quais se comportam praticamente como um corpo homogêneo, pode-se para efeito de previsões térmicas usar as expressões já deduzidas em 3.1 ou seja ($T =$ constante térmica de tempo constante)

$$\Theta = \Theta_{\max} (1 - e^{-t/T}) \quad - \text{ para aquecimento}$$

$$\Theta = \Theta_{\max} (e^{-t/T}) \quad - \text{ para resfriamento}$$

As expressões acima estão escritas como se encontram usualmente nos livros texto.(5) Para o nosso uso no que pretendemos expor, alteraremos a simbologia como segue, entendendo por enquanto que T (constante térmica de tempo) é constante (corpo homogêneo).

$\Theta_i =$ sobrelevação de temperatura inicial

$\Theta_f =$ sobrelevação de temperatura final

$\Delta \Theta_{\max} =$ máxima sobrelevação de temperatura, obtida em um aquecimento, quando o M. T. for submetido a uma corrente I constante, continuamente

$\Delta \Theta =$ sobrelevação de temperatura em um instante t com relação à uma sobrelevação de temperatura inicial de referência

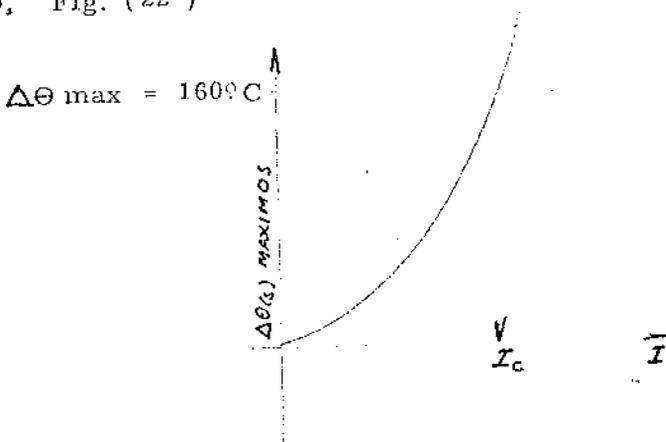
$$\Delta \Theta_M = | \Theta_{\max} - \Theta_i |$$

desta maneira as expressões acima passariam a ser escritas como segue:

$$\Delta \Theta = \Delta \Theta_M (1 - e^{-t/T})$$

$$\Delta \Theta = \Delta \Theta_M (e^{-t/T})$$

A curva da função $\Delta \Theta \equiv \psi(I)$ passaria a ser entendida como $\Delta \Theta_{\max} = \psi(I)$, Fig. (22)



com as funções $\Delta \Theta_{\max} \cong \int (I)$ e $I \cong \int (1/t)$, pode-se determinar a sobrelevação de temperatura como segue:

Para a condição:

$0 < I < I_c$ tem-se $\Delta \Theta_{\max} = \int (I)$ obtida pelo teste.

Se $I > I_c$ pela função $I \cong \int (1/T)$ determina-se o tempo " t_k " que o enrolamento levará para atingir um $\Delta \Theta$ pré fixado (ex. temperatura de classe) mantendo-se a corrente constante. Ou seja, obtém-se t_k para um $\Delta \Theta_k$ prefixado da $I \cong \int (1/t)$, de maneira que:

$$\Delta \Theta_M = \frac{\Delta \Theta_k}{1 - e^{-t_k/T}}$$

e em seguida:

$$\Delta \Theta = \Delta \Theta_M (1 - e^{-t/T})$$

em que "t" na última expressão é o tempo de percurso com uma determinada corrente I.

No traçado do perfil térmico, o cálculo é repetido para cada intervalo de tempo Δt em que o valor médio quadrático da corrente, muda de valor.

Supondo-se que num intervalo qualquer Δt_k do percurso da composição, no instante de mudança de corrente, no tempo t_{k-1} a sobrelevação atingida seja Θ_i . Cabe então calcular a sobrelevação de temperatura final Θ_f .

Antes de iniciar-se o desenvolvimento, fica entendido que:

$$\begin{aligned} &|\Delta \Theta_{\max} - \Theta_i| > 0 \quad \text{aquecimento} \\ \text{e} \\ &|\Delta \Theta_{\max} - \Theta_i| < 0 \quad \text{resfriamento} \end{aligned}$$

4.4.1.1 - $|\Delta \Theta_{\max} - \Theta_i| > 0$ - AQUECIMENTO

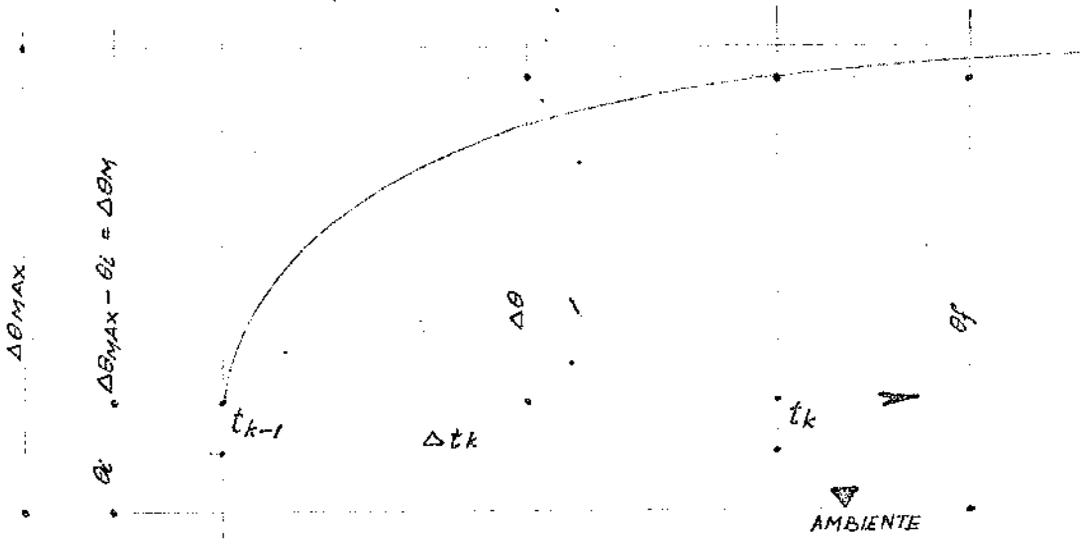


Fig. (23)

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$$

Partindo de

$$\Delta \theta = \Delta \theta_M (1 - e^{-t/T}) \text{ vem}$$

$$\Delta \theta = \theta_f - \theta_i$$

$$\Delta \theta_M = | \Delta \theta_{max} - \theta_i | = (\Delta \theta_{max} - \theta_i)$$

então

$$\theta_f - \theta_i = (\Delta \theta_{max} - \theta_i) (1 - e^{-t/T})$$

ou

$$\theta_f = \theta_i + (\Delta \theta_{max} - \theta_i) (1 - e^{-t/T}) \quad (1)$$

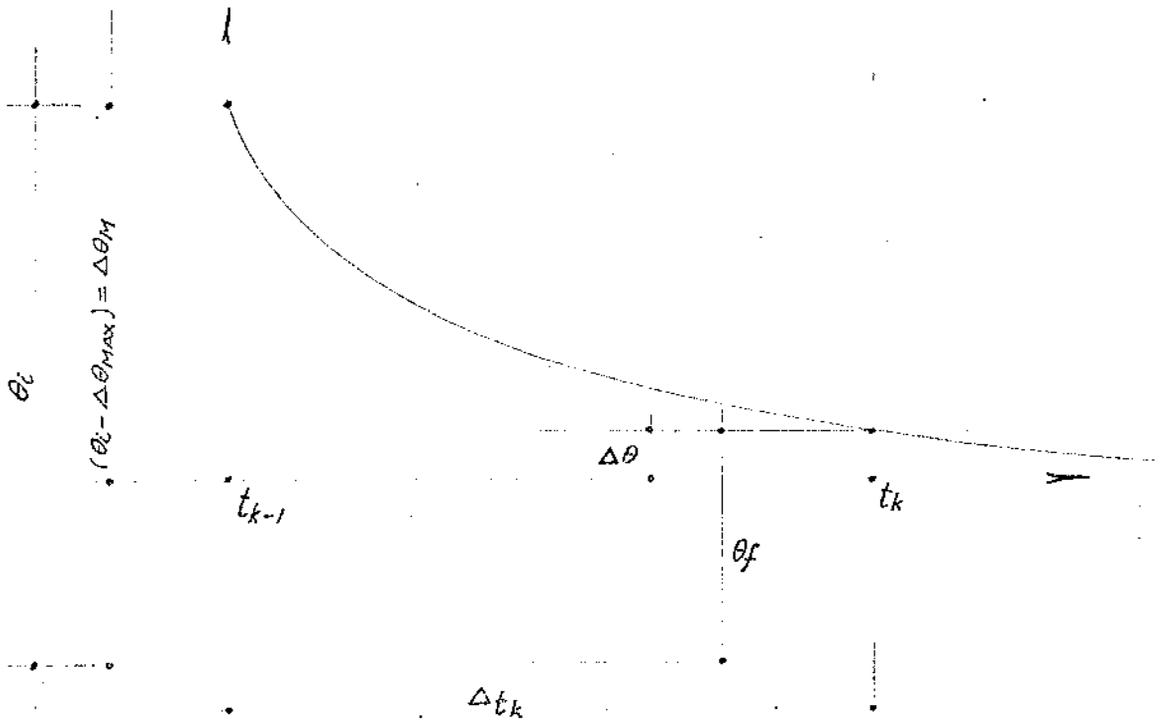


Fig. (24)

$$\Delta t_k = t_{k-1} - t_k$$

Partindo de

$$\Delta \Theta = \Delta \Theta_M \cdot e^{-t/T} \quad \text{vem}$$

$$\Delta \Theta_M = |\Delta \Theta_{\max} - \Theta_i| = -(\Delta \Theta_{\max} - \Theta_i) = (\Theta_i - \Delta \Theta_{\max})$$

portanto

$$\Theta_f - \Delta \Theta_{\max} = (\Theta_i - \Delta \Theta_{\max}) e^{-t/T}$$

$$\Theta_f = \Delta \Theta_{\max} + (\Theta_i - \Delta \Theta_{\max}) e^{-t/T}$$

por outro lado

$$(\Theta_i - \Delta \Theta_{\max}) = \Theta_i - \Theta_f + (\Theta_i - \Delta \Theta_{\max}) e^{-t/T}$$

portanto

$$\theta_f = \theta_i - (\theta_i - \Delta\theta_{\max}) + (\theta_i - \Delta\theta_{\max}) e^{-t/T}$$

$$\theta_f = \theta_i - (\theta_i - \Delta\theta_{\max}) (1 - e^{-t/T}) \quad (11)$$

4.4.1.3 - CONCLUSÃO - AQUECIMENTO/RESFRIAMENTO

Examinando as expressões I e II ambas podem ser resumidas em uma só ou seja:

$$\theta_f = \theta_i + (\Delta\theta_{\max} - \theta_i) (1 - e^{-t/T})$$

levando-se em conta que se o sinal de $(\Delta\theta_{\max} - \theta_i)$ for positivo trata-se de um aquecimento e, se negativo, resfriamento.

Fica constatado que o que define um aquecimento ou resfriamento é o sinal da diferença $(\Delta\theta_{\max} - \theta_i)$ e não a relação entre correntes de dois intervalos consecutivos. Em outras palavras a corrente pode diminuir de um intervalo para outro e os motores podem assim mesmo sofrer um aquecimento. O exemplo pode ser dado pela Fig. (25).

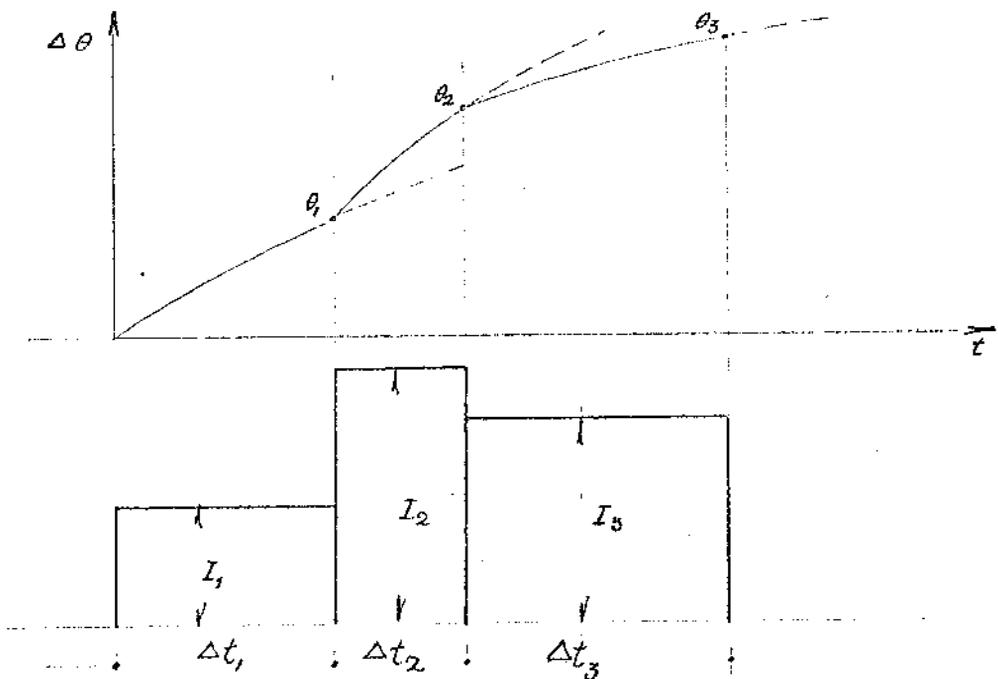


Fig. (25)

Como se nota na figura $I_2 > I_3$ porém

$\Delta t_2 < \Delta t_3$ e assim a temperatura em Δt_2 passou de Θ_1 para Θ_2 com $I_2 > I_3$, porém no intervalo seguinte Δt_3 , Θ_2 passou para Θ_3 com $\Theta_3 > \Theta_2$ e $I_3 < I_2$. Para isto acontecer, basta que $\Delta \Theta_{max} > \Theta_2$

4.4.1.4 - JUSTIFICAÇÃO

Justifica-se a colocação nesta tese de um desenvolvimento para perfil térmico com T (constante térmica de tempo) constante, pelo simples fato de que em futuro não muito distante as máquinas elétricas em geral, e os motores de tração em particular, pelas tendências identificadas presentemente irão ser construídas com uma maior homogeneização, isto é, com materiais que tenham condutividade térmica mais próximas, ou também poderão trabalhar totalmente fechados, situação essa que aproxima as curvas de aquecimento da máquina àquela do corpo homogêneo.

4.4.2 - T (C T T) VARIÁVEL T $\equiv \varphi(t)$

A grande maioria dos motores de tração e o M.T. testado, para conclusão deste trabalho, classificam-se nesta categoria, ou seja, máquinas que não têm um T constante, porém variável em função do tempo de aquecimento. (Vide 3.2 e particularmente Fig. (4)).

Neste caso os resultados de teste de aquecimento indicam que $\Delta \Theta \equiv \varphi(t)$ da máquina intercepta várias outras $\Delta \Theta \equiv \varphi(t)$ com T constante, isto é $\Delta \Theta \equiv \varphi(t)$ da máquina passa conforme t por sucessivos valores T_1, T_2, T_3 , etc.

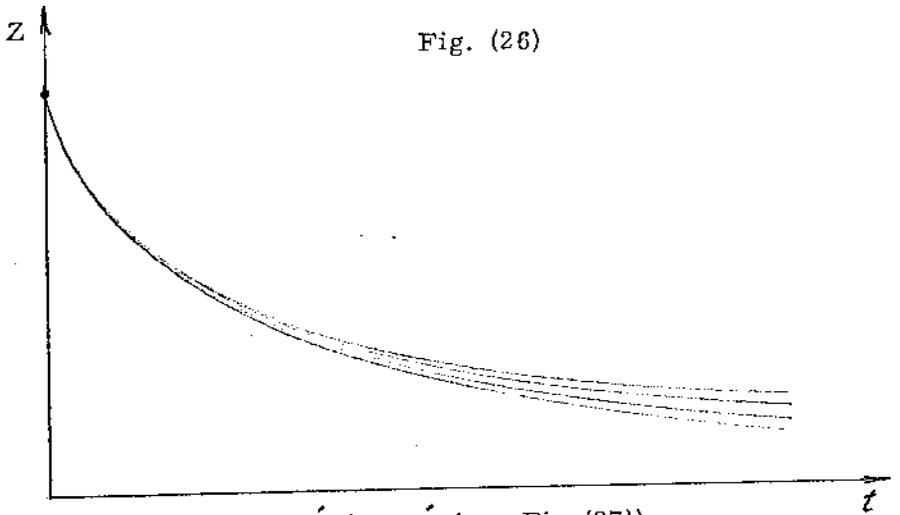
O método proposto para este caso, o qual passa a ser demonstrado pelo procedimento com a armadura da máquina somente (os demais enrolamentos o procedimento será idêntico) principalmente pelo fato de ser a parte da máquina de acesso mais difícil e a que particularmente interessa ao usuário, propõe como característica fundamental do M.T. a função $\Delta \Theta_{max} \equiv \varphi(I)$, $I \equiv \varphi(\frac{1}{t})$ e o valor Z que passa-se a descrever.

4.4.2.1 - CURVA PORCENTUAL DE TEMPERATURA - VALOR Z

Determinou-se através de vários testes de aqueci-

mento, em uma mesma máquina e vários outros, também protótipos, e devidamente calibrados, um feixe de curvas de resfriamento, com pequenas variações entre uma e outra ou então coincidentes. A falta de coincidência total entre um teste de resfriamento e outros de outras máquinas, deve-se exatamente à variação das características de materiais, impregnações não perfeitamente iguais e também às tolerâncias de fabricação já aceitas. Em termos técnicos este é um fato inegável ao mesmo tempo incontornável que terá sempre que ser admitido como uma perturbação às conclusões puras de análises teóricas.

Consegue-se, então, um feixe de curvas como indicado na Fig. (26) abaixo:

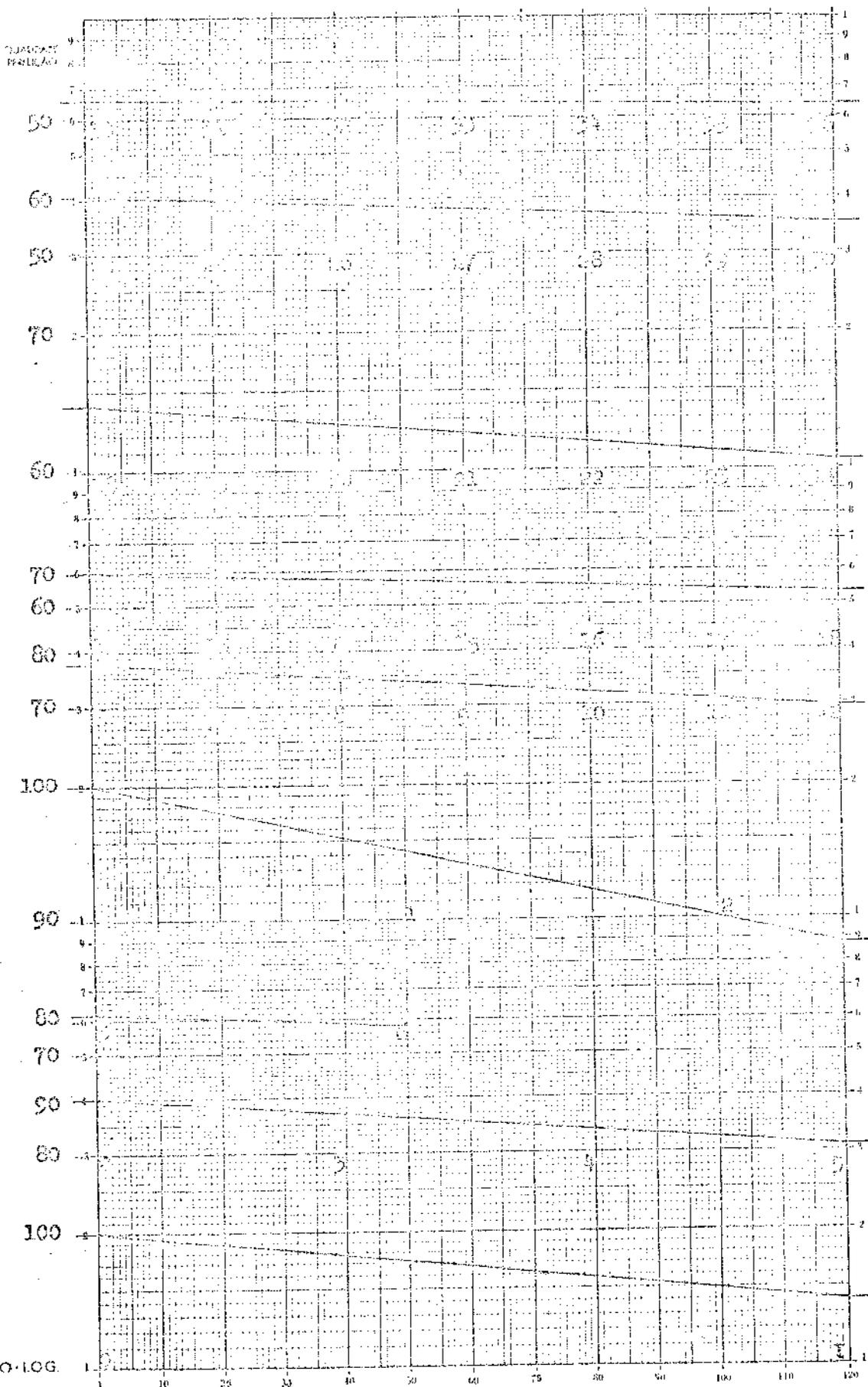


(vide curva real na próxima página, Fig. (27)).

em que
$$Z = \frac{\Delta \theta}{\Delta \theta_{\max}}$$

Para o feixe de curvas $Z \equiv \varphi(t)$, obtida de máquinas de um mesmo modelo, no caso iguais ao M.T. em pauta, através de método apropriado, consegue-se uma só única curva $Z \equiv \varphi(t)$ representativa dele. As variações entre as curvas de resfriamento do feixe são mínimas, sendo praticamente coincidentes na porção de temperaturas mais altas e no máximo ao redor de 1°C de diferença para um mesmo (t) nas temperaturas mais baixas.

A curva assim obtida, representativa da função $Z \equiv \varphi(t)$ chamada "Curva Percentual de Temperatura", visto que o valor Z pode ser dado percentualmente, foi colocada em papel monologarítmico, onde nesta forma transforma-se em vários segmentos de reta. A curva obtida para o M.T. testado, está representada na Fig. (27).



Tempo (min)

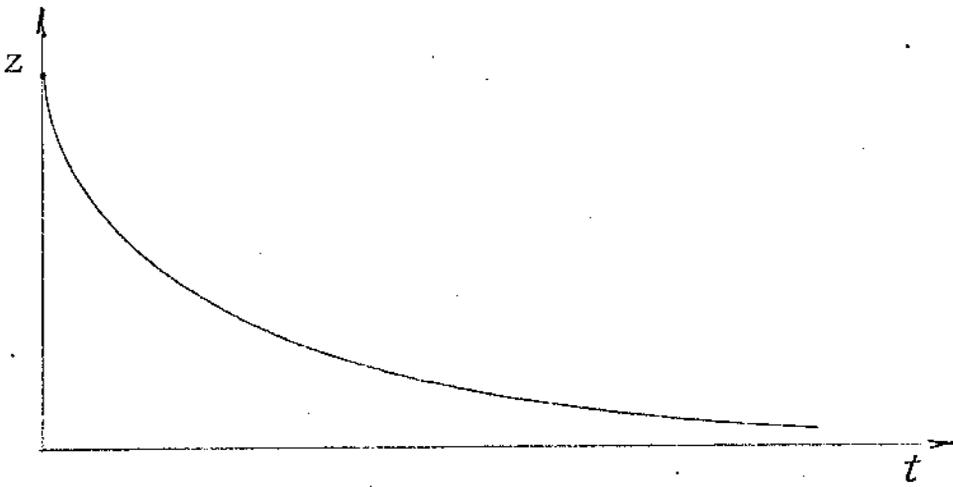


Fig. (28)

As curvas de aquecimento e resfriamento sendo simétricas, como mostram as curvas teóricas e todos os demais ensaios em que partes de máquinas ou máquinas testadas fornecem a retirada de dados tanto para resfriamento como para aquecimento, permitem afirmar que:

$$\Delta \theta_1 = (\theta_{\max} - \theta_i)_1 (1 - e^{-t_1/T_1})$$

$$\Delta \theta_2 = (\theta_{\max} - \theta_i)_2 (1 - e^{-t_2/T_2})$$

em dois ensaios distintos, porém se $t_1 = t_2$ e sendo no mesmo tempo, também $T_1 = T_2$, então:

$$\frac{\Delta \theta_1}{\Delta \theta_2} = \frac{(\Delta \theta_{\max} - \theta_i)_1}{(\Delta \theta_{\max} - \theta_i)_2} = \frac{\Delta \theta_{M1}}{\Delta \theta_{M2}}$$

assim pode-se relacionar

$$\Delta \theta_2 = \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \theta_{M1}} \cdot \Delta \theta_{M2}$$

ou

$$\boxed{\Delta \theta_2 = z \Delta \theta_{M2}}$$

em que "Z" é um dado obtido do teste, para o M.T. específico.

4.4.2.2 - RESFRIAMENTO E EXPRESSÃO GERAL

$$\Delta\theta = \theta_f - \Delta\theta_{\max}$$

$$\Delta\theta_M = (\theta_i - \Delta\theta_{\max})$$

portanto

$$\theta_f - \Delta\theta_{\max} = (\theta_i - \Delta\theta_{\max}) \cdot Z$$

ou

$$\theta_f = \Delta\theta_{\max} + (\theta_i - \theta_{\max}) \cdot Z$$

que relacionando-se com

$$\theta_f = \theta_{\max} + (\theta_i - \theta_{\max}) \cdot e^{-t/T}$$

tem-se

$Z = e^{-t/T}$ para cada instante "t" e para o valor de T do instante considerado.

Com as considerações expostas a expressão geral será então dada por:

$$\theta_f = \theta_i + (\Delta\theta_{\max} - \theta_i) (1 - Z)$$

4.4.2.3 - θ_f PARA VALORES DE $I \gg I_c$

Os motores de tração podem ser submetidos a correntes $I \gg I_c$ em intervalos curtos. O limite de tempo para o uso dessas correntes altas, com o motor partindo do nível de temperatura ambiente, portanto $\theta_i = 0$, é dado através da função $I \cong \int (1/t)$ determinada pelo teste. Em uso na estrada todavia a probabilidade de se ter $\theta_i = 0$ é mínima, na maioria absoluta dos casos $\theta_i \neq 0$. Os valores indicados em $I \cong \int (1/t)$ servem apenas para se apreciar que para as correntes $I \gg I_c$ o valor Δt indicado é o máximo permissível. Como quase sempre $\theta_i \neq 0$ então:

$$0 < \Delta t_k < \Delta t_{(160^\circ\text{C})}$$

em que Δt_k é um tempo qualquer menor que o Δt dado pela função $I \cong \int (1/t)$ para $\Delta \theta = 160^\circ\text{C}$ constante.

Resulta desta apreciação o problema seguinte:

Como determinar θ_f quando os enrolamentos são submetidos à correntes $I \gg I_c$?

O uso da expressão $\Delta \theta_{M_2} = \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \theta_{M_1}} \Delta \theta_{M_2}$ (valor Z) na forma $\Delta \theta_{M_2} = \frac{\Delta \theta_{M_1}}{\Delta \theta_1} \Delta \theta_2$ não é recomendado, pelo simples

fato que a igualdade é verificada dentro da condição $I \leq I_c$ e o estabelecimento de valores $\Delta \theta_M$ para correntes muito altas não é possível por meio de testes, isto porque fatalmente se incorreria na queima e falha total do motor.

Em outras palavras, não há garantias que em correntes muito altas os fluxos térmicos se conduziriam acima de 160°C da mesma maneira que se processam para $\Delta \theta < 160^\circ\text{C}$ e o valor "Z" fosse significativo. Pode-se prever todavia a explicação que a correntes tais que $I \gg I_c$ a curva porcentual de temperatura variaria de uma maneira desconhecida. Como dado agravante a esse fato, pode-se levar em conta que os coeficientes de dissipação térmica dos diversos materiais variam bastante conforme a gama de temperaturas. As temperaturas bastante altas as quais corresponderiam a correntes muito altas geralmente os materiais isolantes usados liberam vapores que transformam esses coeficientes tanto no meio interno da máquina, como do próprio material isolante.

O procedimento adotado neste caso, cuja frequência é bastante pequena ou quase nula, como poderá ser constatado adiante é passar da função

$I \cong \int \left(\frac{1}{t} \right)$ com $\Delta \theta$ constante para simplesmente,

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \int (I)$$

A aproximação que se faz neste caso, e constatada por teste, é admitir que para altas correntes o trecho da curva de aquecimento compreendido entre a sobrelevação 0 e sobrelevação limite de classe, que determina a

faixa permissível de aquecimento onde o motor deverá trabalhar é uma variação linear.

Outra maneira de visualizar a situação é admitir para este caso no intervalo $0 < \Delta \theta < 160^\circ\text{C}$ para $I \gg I_c$ que não há dissipação do calor sensível por irradiação ou seja a curva representativa da função $\Delta \theta \equiv \varphi(t)$ confunde-se com a própria tangente a ela pela origem.

Para as correntes mais próximas de I_c , porém ainda com $I > I_c$, usou-se a curva representativa de $\Delta \theta_{\text{max}} \equiv \varphi(I)$ isto porque testou-se a máquina com correntes maiores do que a I_c especificada. Con-
vem registrar o fato que para certas máquinas, conforme seu tipo construti-
vo, e somente quando em testes de protótipo, pode-se, em benefício das de
mais outras máquinas do lote, proceder testes com 15, 20 e até 25% de sobre
carga até a estabilização total, conseguindo assim outros pontos para a curva
 $\Delta \theta \equiv \varphi(I)$, os quais seriam pontos usados no método com plena seguran-
ça.

No caso, para o método proposto, teremos, dependendo das cor-
rentes consideradas, dois tipos de cálculo:

- 1) através de $\Delta \theta \equiv \varphi(I)$
- 2) através de $\frac{\Delta \theta}{\Delta t} \equiv \varphi(I)$

Chamamos de I_l (I limite) a corrente que no cálculo estabele-
ce o limite entre os dois procedimentos. No caso em questão foi usada a
maior corrente com que a máquina foi testada para a estabilização térmica.

A adoção, de $\frac{\Delta \theta}{\Delta t} \equiv \varphi(I)$ como já explicado, acontece na
realidade em poucos casos e de todas as formas o resultado é do lado se-
guro pois para um mesmo intervalo de tempo Δt o $\Delta \theta$ resultante será
de alguns graus maior do que a realidade.

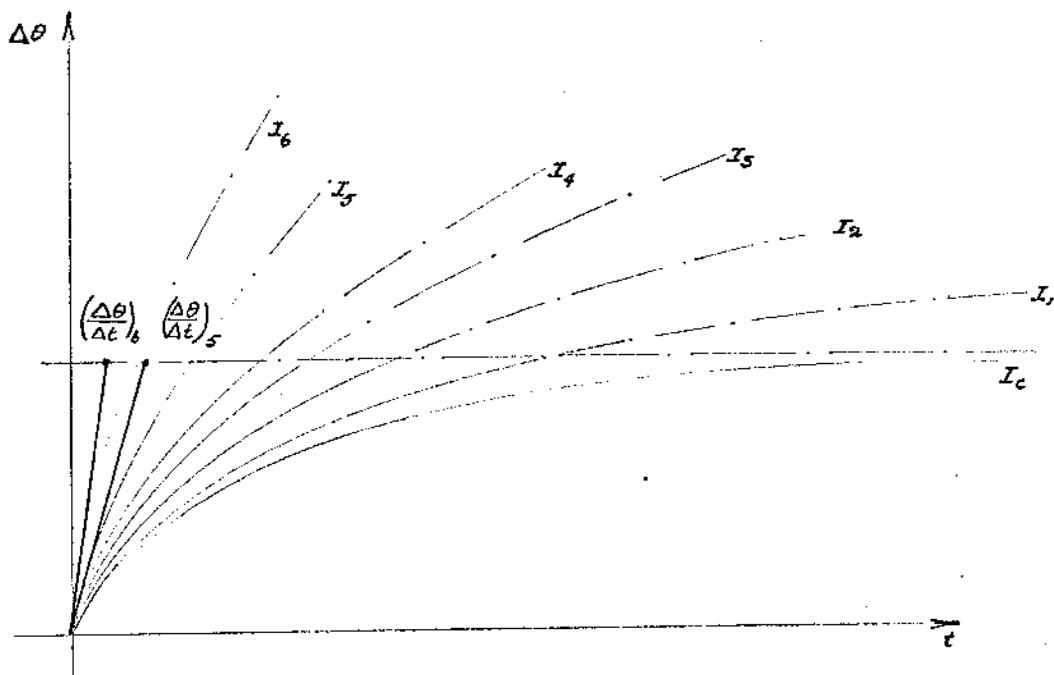


Fig. (29)

A Fig. (29) ilustra o que já foi explicado, para correntes I_4, I_5, I_6 I_c usa-se $\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \varphi(I)$. Para I_1, I_2, I_3 pode-se usar $\Delta\theta = \varphi(I)$ desde que os testes de estabilização sejam forçados com correntes acima de I_c . Como alternativa deste último caso a função $\Delta\theta = \varphi(I)$ pode também ser extrapolada até correntes de 15 a 25% maiores que I_c , sem erro considerável.

4.5- O USO DO COMPUTADOR

4.5.1 - Determinação de um pequeno trecho do perfil térmico através de cálculo manual

A finalidade desta exposição é primeiramente mostrar o roteiro de cálculo, para em seguida, passar-se ao enquadramento do método ao computador.

O cálculo do perfil térmico, pode ser feito, preenchendo-se a seguinte tabela:

Estação	Δt	$I M^*$	$\Delta \Theta_{\max}$ ou $\Delta \Theta / \Delta t$	Z	$\Delta \Theta$	Θ_f	Sinal
	min	Amp		%	°C	°C	$\Delta \Theta_{\max} - \Theta_i$

$I M^* =$ corrente por motor na locomotiva

Exemplo (partindo de $\Theta_i = 100^\circ\text{C}$)

Barra Funda	6.8	227	104	0,766	0,9	100,9	+	(Aquecimento)
	4.1	146	59.5	0,836	34.6	94,1	-	(Resfriamento)
	1.5	0	0	0,919	86.4	86,4	-	"
	9.5	139	56	0,730	22.2	78,2	-	"
	8.0	158	66.5	0,750	8.8	75,3	-	"
	7.3	230	106	0,730	8.5	83,6	+	(Aquecimento)
A. Bueno	1.0	0	0	0,940	78.6	78,6	-	(Resfriamento)

Cálculo (1)

$$\Delta t = 6.8$$

de $Z \equiv \Psi(t)$, para 6.8 minutos $Z = 76.6\% = 0,766$

$$I M = 227$$

de $\Delta \Theta_{\max} \equiv \Psi(I)$, verifica-se que $\Delta \Theta_{\max} = 104^\circ\text{C}$
com

$$\Theta_f = \Theta_i + (\Delta \Theta_{\max} - \Theta_i) (1 - Z)$$

vem

$$\Theta_f = 100 + (104 - 100) (1 - 0,766)$$

$$\Theta_f = 100 + 4 (0,234) = 100 + 0,93$$

Cálculo (2)

$$\Delta t = 4.1$$

$$Z = 83,6\% \quad 0,836$$

$$I M = 146 \quad \Delta \Theta_{\max} = 59.5^\circ\text{C}$$

$$\Theta_i = 100,9$$

$$\Theta_f = 100,9 + (59.5 - 100,9) (1 - 0,836)$$

$$\Theta_f = 100,9 - 41.4 \times 0,164 = 94,1^\circ\text{C} \quad \text{- Resfriamento}$$

$$\Delta \Theta = 94.1 - 59.5 = 34.6^\circ\text{C}$$

Cálculo (3)

$$\Delta t = 1,5$$

$$Z = 91,9\% \quad 0,919$$

$$I_M = 0$$

$$\Theta_{\max} = 0$$

$$\Theta_i = 94,1$$

$$\Theta_f = 94,1 - (0 - 94,1) (1 - 0,919)$$

$$\Theta_f = 94,1 \times 0,081 = 94,1 - 7,7 = 86,4^\circ\text{C}$$

$$\Delta\Theta = 86,4 - 0 = 86,4 \text{ (Resfriamento)}$$

Cálculo (4)

$$\Delta t = 9,5$$

$$Z = 73\% = 0,73$$

$$I_M = 139$$

$$\Theta_{\max} = 56^\circ\text{C}$$

$$\Theta_i = 86,4$$

$$\Theta_f = 86,4 + (56 - 86,4) (1 - 0,73)$$

$$\Theta_f = 86,4 - 30,4 (0,27) = 86,4 - 8,2 = 78,2^\circ\text{C}$$

$$\Delta\Theta = 78,2 - 56,0 = 22,2^\circ\text{C (Resfriamento)}$$

Cálculo (5)

$$\Delta t = 8$$

$$Z = 75\% = 0,75$$

$$I_M = 158$$

$$\Theta_{\max} = 66,5$$

$$\Theta_f = 78,2 + (66,5 - 78,2) (1 - 0,75)$$

$$\Theta_f = 78,2 - 11,7 \times 0,25 = 78,2 - 2,9 = 75,3^\circ\text{C}$$

$$\Delta\Theta = 75,3 - 66,5 = 8,8 \text{ (Resfriamento)}$$

Cálculo (6)

$$\Delta t = 7,3$$

$$Z = 73\% \quad 0,73$$

$$I_M = 230$$

$$\Theta_{\max} = 106$$

$$\Theta_f = 75,3 + (106 - 75,3) (1 - 0,73)$$

$$\Theta_f = 75,3 + 30,7 \times 0,27 = 75,3 + 8,3 = 83,6^\circ\text{C}$$

$$\Delta\Theta = \Theta_f - \Theta_i = 83,6 - 75,3 = 8,3 \text{ (Aquecimento)}$$

Cálculo (7)

$$\Delta t = 1.0$$

$$Z = 94\% = 0,94$$

$$IM = 0$$

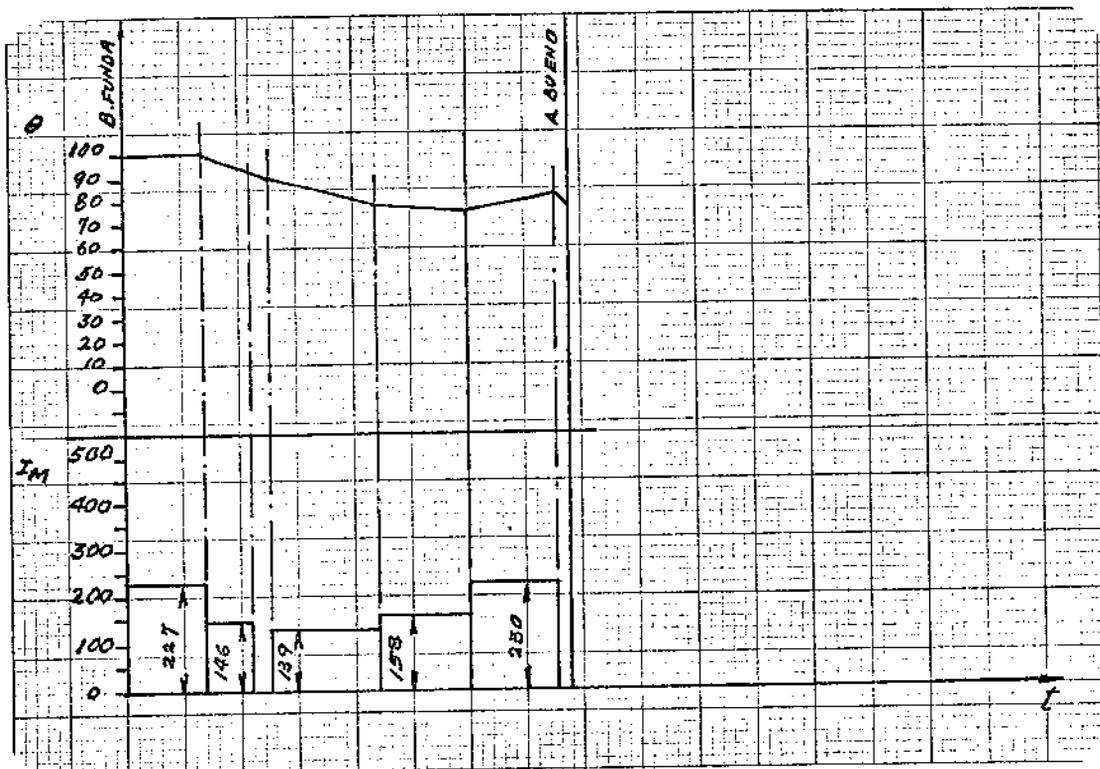
$$\Theta_{\max} = 0$$

$$\Theta_f = 83,6 + (0 - 83,6) (1 - 0,94)$$

$$\Theta_f = 83,6 - 83,6 \times 0,06 = 83,6 - 5 = 78,6^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta \Theta = 78,6 - 0 = 78,6 \text{ (Resfriamento)}$$

4.5.2 - Traçado do Perfil Térmico do Trecho



com relação ao exemplo calculado os valores retirados de $\Delta \theta \equiv \int (I)^2$ são para a curva a 1350 volts, devido ao fato que da estrada em que foram colhidos os dados de corrente, as tensões respectivas não haviam sido registradas e a tensão mais baixa, no trecho em questão, foi a considerada mais realista.

4.5.3 - A análise do Perfil Térmico, para determinação de carga de motores

A sobrelevação de temperatura dos motores, como já vimos, depende das variáveis Δt , I_M , portanto atuando sobre elas pode-se regularizar as condições térmicas dos M.T. em uso na locomotiva.

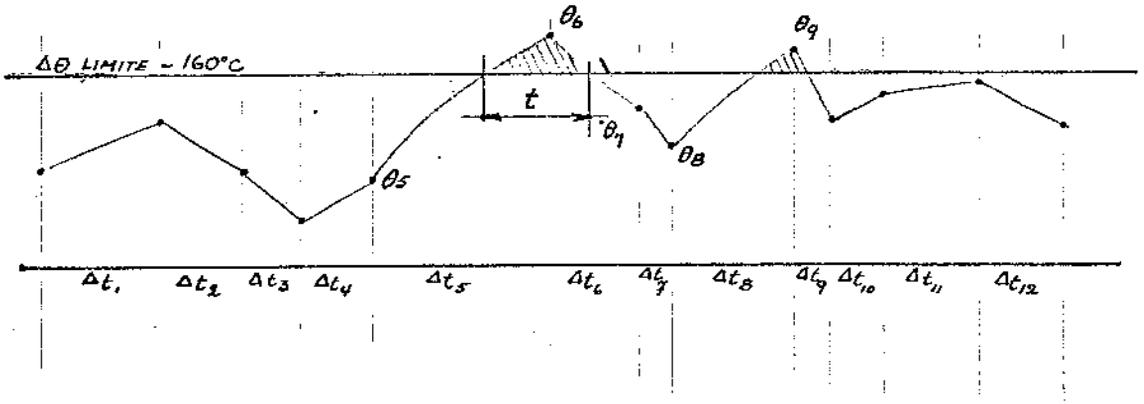
Independentemente da regularização, deve-se entender, sobre o limite estabelecido para a classe de Isolamento, o seguinte:

Suponha-se que para um tipo qualquer de motor a armadura atinge o limite de sobrelevação de classe, mais rapidamente que os demais enrolamentos. A questão que se impõe é como carregar uma determinada locomotiva elétrica, dispondo dos tempos de parada, a fim de que em todo percurso os motores não tenham suas respectivas armaduras aquecidas além do limite.

Quando da primeira vez que se pretenda tomar os dados $I_M, \Delta t$ com os quais deseja-se verificar a condição térmica dos M.T., deve-se ter certo cuidado, para que os motores não sobreaqueçam exageradamente. Todos os dados de carregamento de trens, de posse da ferrovia, devem ser examinados a fim de que a composição formada para a obtenção de dados seja representativa e na primeira vez carregada aquém do usual. Deixa-se claro, todavia, que se os motores aquecerem alguns graus (2°C a 5°C) acima do limite em um tempo razoavelmente curto de 2 a 4 minutos, e em intervalos de tempo Δt bastante distanciados, isto em nada virá afetar a vida do motor. Um M.T. estará em perigo quando sobreaquece além do limite continuamente, ou em outras palavras, quando estabiliza ou chega muito perto da estabilização acima do limite de classe, com muita frequência. Neste caso é uma regra prática afirmar-se que, mantendo-se uma máquina estabilizada termicamente, frequentemente acima da temperatura limite de classe, para cada 10°C além da sobrelevação permitida, a máquina diminui 50% de sua vida. Alguns destes dados, para algumas máquinas especificamente, tem sido confirmados em testes de aceleração.

Como exemplo, admitindo-se uma série de valores I_M e Δt com os quais obtêm-se o trecho abaixo de "Perfil Térmico"

Fig. (31)



Nota-se então:

1º Intervalo Δt_5

$$\theta_6 > 160^\circ\text{C}$$

2º Intervalo Δt_8

$$\theta_9 > 160^\circ\text{C}$$

No intervalo Δt_5 , poder-se-ia, após determinar "t", tomar uma de duas decisões:

a) Se "t" é pequeno entre 3 e 4 minutos e θ_6 ao redor de 163°C ou 164°C , esta pequena diferença pode ser ignorada;

b) Se "t" é alto e $\Delta \theta > 164^\circ\text{C}$ algumas medidas devem ser tomadas no sentido de diminuir a corrente. No intervalo Δt_8 a melhor solução seria aumentar o tempo de parada Δt_7 a fim de que θ_9 de um valor igual ou abaixo do limite.

Outro ponto de análise é verificar se entre duas estações os diversos θ estão bem abaixo do limite, e o que se deve tentar fazer é tentar no trecho compreendido entre elas, carregar mais o cabo.

Resta mencionar a ressalva que a análise não terá muito valor se no trecho de estudo a tensão da catenária variar muito e, principalmente, se

estiver abaixo do mínimo especificado para a locomotiva.

Quando a tensão de catenária abaixa muito (menos de 2.700 volts para uma linha de 3.000 volts) o grupo motor gerador que aciona os ventiladores de refrigeração diminui sua rotação e, consequentemente, a vazão de ar também diminui, e desta maneira se permitirá sobrelevações de temperatura maiores para uma mesma I_M .

Entende-se que se a tensão de "trolley" se mantiver entre 2.700 e 3.000, para locomotivas elétricas de tensão nominal 3.000 volts, os dados do Perfil térmico, são seguros e satisfatórios.

4.5.4 - A colocação do Perfil Térmico no Computador e o programa para o Perfil Térmico

Este método só é viável em sua praticidade, se usado juntamente com o auxílio do computador.

Composições que percorrem trechos de 500, 600, e até 1000 quilômetros, com variações de corrente sucessivas, motorizações e frenagens regenerativas durante períodos contínuos de 10 ou mais horas, não poderiam para as decisões hoje necessárias dentro da ferrovia esperar pelo cálculo manual de todo um percurso como o citado.

Deseja-se então um programa global que tenha como "inputs" I_M e Δt e como "output" Θ e Δt . Assim foi feito e consta nesta tese um programa para tal fim. Pode-se elaborar outros programas com todos os refinamentos desejados, inclusive aquele que analise e indique soluções quando $\Theta > 160^\circ\text{C}$ para a armadura. O programa apresentado é todavia suficiente para o trabalho desejado e para a pronta elaboração do Perfil Térmico.

Para a colocação do método no computador a função $\Delta \Theta = \int (I)$ foi transformada em uma equação e cujos coeficientes são os seguintes:

Em linguagem do computador :

$$A (0) = - 0,4095140 E - 01$$

$$A (1) = 0,8214700 E - 01$$

$$A (2) = 0,3675000 E - 02$$

$$A (3) = - 0,1546000 E - 04$$

$$A (4) = 0,2808000 E - 07$$

Para a função $\frac{\Delta \Theta}{\Delta t} \equiv \psi (I)$

$$A (0) = - 0,2356680 E 02$$

$$A (1) = 0,7866701 E - 01$$

Para a função $Z \equiv \psi (t)$

$$A (0) = 0,4625580 E 00$$

$$A (1) = -0,8144000 E - 01$$

$$A (2) = 0,5244100 E 00$$

A corrente I_l corrente limite foi estabelecida em 340 amperes. Os coeficientes acima, para o método em questão, constituem dados intrínsecos do modelo do M.T. testado. São dados do motor que com todas as demais características são registrados para uso em qualquer outra experiência julgada necessária.

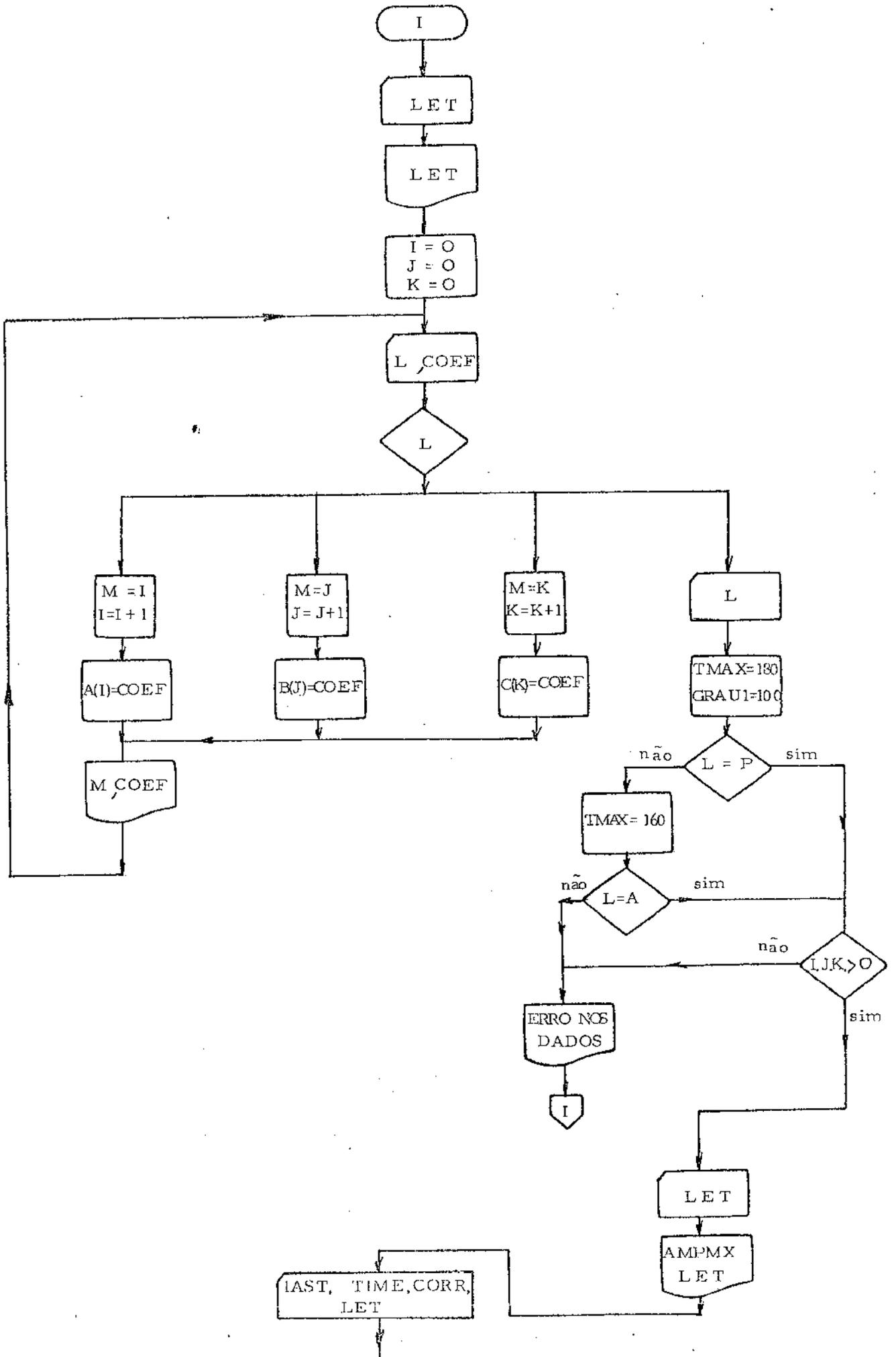
A corrente de 340 amperes foi estabelecida para este caso, extrapolando-se parcialmente, parte da curva representativa da função $\Delta \Theta \equiv \psi (I)$. Como já foi explicado anteriormente, esse segmento da curva poderia ter sido obtido com um teste de aquecimento com $I > I_c$, porém isto não foi feito devido ao fato da necessidade de poupar as unidades protótipo de qualquer risco adicional aos já envolvidos para os testes executados.

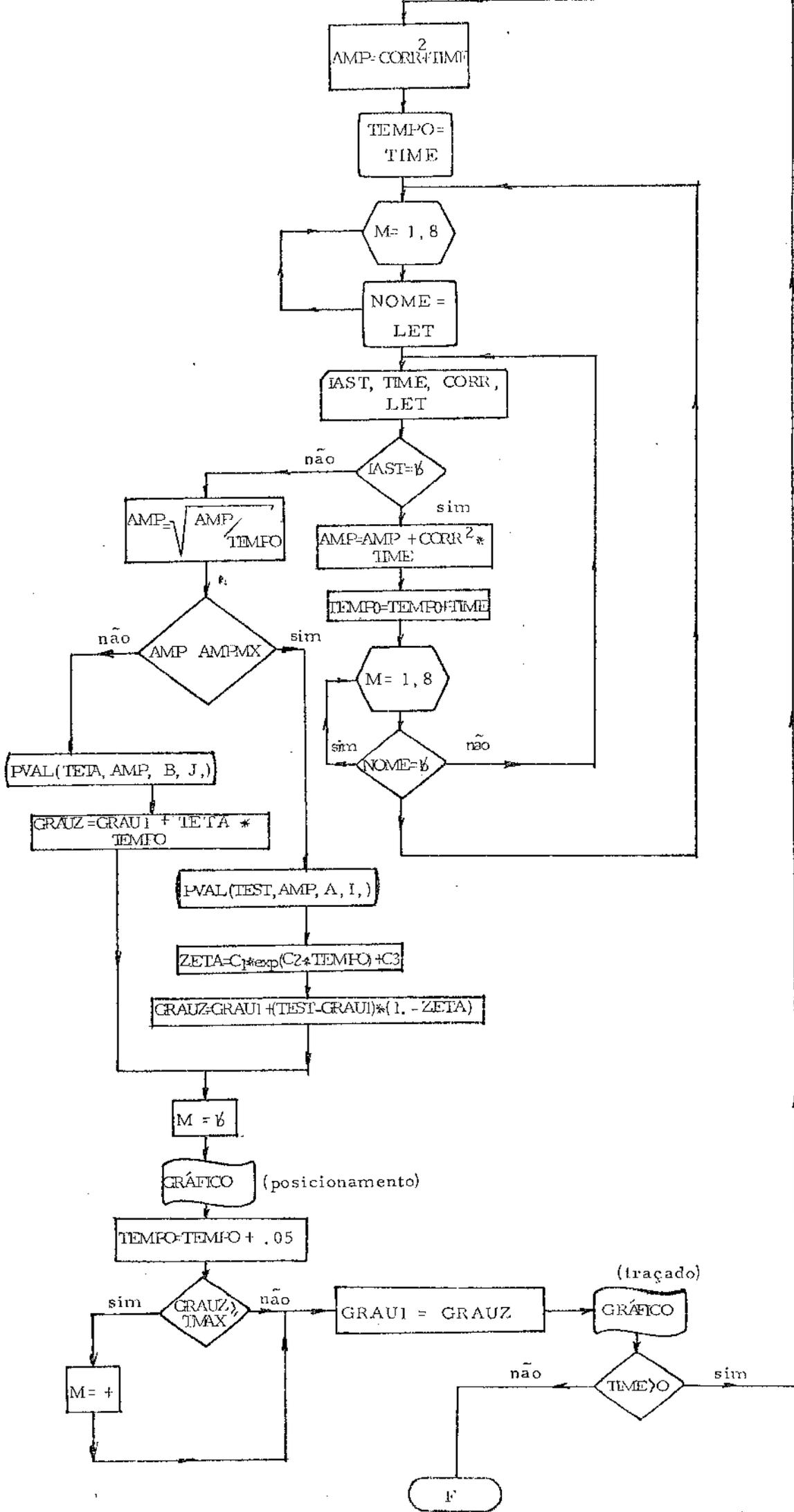
Isto foi necessário para poder testar e aplicar o método, e os resultados da mesma maneira refletem a realidade sem variações.

Como pode ser notado pelos resultados em anexo, os motores apesar de trabalharem em alguns pontos com correntes próximas de I_c , na maioria do tempo estão relativamente frios.

4.5.5 - Programa, para o Perfil Térmico

FLUXOGRAMA





```

DIMENSION A(5), B(2), C(3), LET(25), NOME(25)
EQUIVALENCE(COEF, AMPMX)
DATA IIIII/1RI/
DATA IIIIP/1HP/
DATA IIIIEH/1H#/
DATA IIIEB/1H /
DATA ISTER/1H*/
DATA IIIIA/1HA/
NR=43
NW=31
359 CONTINUE
READ(NR, 20) (LET(I), I=1, 25)
20 FORMAT(25A2)
WRITE(NW, 21) (LET(I), I=1, 6)
21 FORMAT(1H1, 17X, 28HPERFIL TERMICO DO MOTOR TIPO, 6A2, /)
WRITE(NW, 22)
22 FORMAT(/, 56H COEFICIENTES DA CURVA TEMP = F(I) (I MENOR QUE I LIMIT
*E), /)
CLOCK=0.
II=0
J=0
K=0
30 READ(NR, 31) L, COEF
31 FORMAT(I2, E14.7)
GO TO (1, 2, 3, 4), L
1 M=II
II=II+1
A(II)=COEF
40 WRITE(NW, 18) M, COEF
18 FORMAT(8X, 2HAG, I2, 3H) =, E14.7)
GO TO 30
2 IF(J) 60, 60, 61
60 WRITE(NW, 62)
62 FORMAT(/, 39H COEFICIENTES DA CURVA GRAU/SEG = F(I), /)
61 M=J
J=J+1
B(J)=COEF
GO TO 40
3 IF(K) 70, 70, 71
70 WRITE(NW, 72)
72 FORMAT(/, 46H COEFICIENTES DA CURVA PER UNIT DE TEMPERATURA, /)
71 M=K
K=K+1
C(K)=COEF
GO TO 40
4 READ(NR, 86) L
86 FORMAT(A2)
TMAX=180.
GRAU1=180.
IF(L-IIIIP) 87, 88, 87
87 TMAX=160.
IF(L-IIIIA) 89, 88, 89
88 IF(II*J*K) 89, 89, 90
89 WRITE(NW, 91)
91 FORMAT(22H EXISTE ERRO NOS DADOS, /)
GO TO 359
90 READ(NR, 20) (LET(I), I=1, 6)
WRITE(NW, 80) AMPMX, (LET(I), I=1, 6)
80 FORMAT(/, 18H CORRENTE LIMITE =, F7.1, 8H AMPERES, /, 10X, 20HTRECHO DE
* OPERACAO -, 10A2, /)

```

```

WRITE(NW, 957)
957  FORMAT(/, 2X, / COMENTARIOS      TEMPOS: DECORRIDO, DURACAO      CORRENT
E
*      TEMPERATURA', /)
READ(NR, 301) IAST, TIME, CORR, (LET(I), I=1, 6)
301  FORMAT(A2, F5. 2, F7. 2, 25A2)
302  AMP=CORR*CORR*TIME
     TEMPO=TIME
303  DO 300 M=1, 8
300  NONE(M)=LET(M)
310  READ(NR, 301) IAST, TIME, CORR, (LET(I), I=1, 6)
     IF(IAST-IIIIEB) 306, 305, 306
305  AMP=AMP+CORR*CORR*TIME
     TEMPO=TEMPO+TIME
     DO 307 M=1, 8
     IF(NONE(M)-IIIIEB) 310, 307, 310
307  CONTINUE
     GO TO 303
306  AMP=SQRT(AMP/TEMPO)
     GO TO 96
94   WRITE(NW, 95)
95   FORMAT(/, 4H FIM, /)
     GO TO 359
96   IF(AMP-AMPMX) 97, 97, 98
97   CALL PVAL(TEST, AMP, A, I)
     ZETA=C(1)*EXP(C(2)*TEMPO)+C(3)
     GRAU2=GRAU1+(TEST-GRAU1)*(1.-ZETA)
     GO TO 100
98   CALL PVAL(TETA, AMP, B, J)
     GRAU2=GRAU1+TETA*TEMPO
100  M=IIIIEB
     CLOCK=CLOCK+TEMPO
     IF(GRAU2-TMAX) 101, 102, 102
102  M=IIIIEB
101  GRAU1=GRAU2
WRITE(NW, 899)(NONE(I), I=1, 8), CLOCK, TEMPO, AMP, GRAU2, M
899  FORMAT(1X, 8A2, 9X, F5. 1, 4X, F7. 1, 1X, F10. 2, 8X, F8. 2, 1X, 3A2)
     IF(TIME) 94, 94, 302
     END
SUBROUTINE PVAL(RES, ARG, X, IDIMIX)
DIMENSION X(1)
RES=0.
J=IDIMIX
1   IF(J) 3, 3, 2
2   RES=RES*ARG+X(J)
   J=J-1
   GO TO 1
3   RETURN
END

```

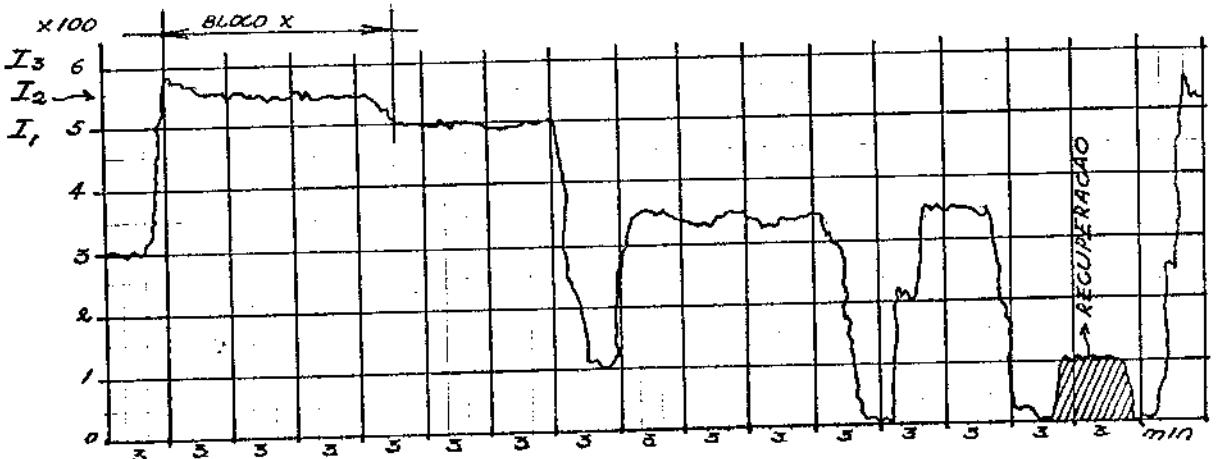
5.1- O TRATAMENTO DOS DADOS $I \cong \varphi(t)$
DA ESTRADA

Foram solicitados dados de corrente em função de tempo para a primeira locomotiva elétrica do tipo 2.200 HP - B-B- 72 toneladas, com motor de tração GE-734, produzidas em Campinas, no ano de 1968 - 1969, e ainda durante o período de produção.

Estes dados foram fornecidos, contando-se com o registro da corrente em função do tempo, tanto em motorização como em regeneração. Os contatos com a estrada foram durante o próprio período de inspeção das locomotivas, as quais em número de 30 foram posteriormente entregues à antiga Estrada de Ferro Sorocabana, hoje Fepasa. Por exigência da própria estrada, o documento original teve que ser devolvido após os dados terem sido anotados.

Os dados de corrente / tempo para um percurso de uma composição com a locomotiva acima especificada, tracionando, são de tal maneira que facilitam bastante o ajuste dos dados.

Como o acelerador da locomotiva, ou o manipulador de frenagem regenerativa, contam com pontos fixos, para cada um desses pontos, estabelece-se uma gama de corrente bastante distinta e que não varia muito, constituindo-se assim, verdadeiros blocos de corrente para os quais o único tratamento necessário é a obtenção da corrente média quadrática de cada trecho, ou bloco. Os dados de corrente em função do tempo, $I \cong \varphi(t)$ da estrada a apresentaram-se diretamente do registro da locomotiva de forma análoga ao exemplo que segue. Fig. (32)



Para o bloco X, como ilustração faz-se:

$$I_x = \sqrt{\frac{\sum I^2 \Delta t}{\sum \Delta t}}$$

assim, para o bloco x, supondo-se $I_1 = 500$, $I_2 = 550$, $I_3 = 600$

I	I^2	Δt	$I^2 \Delta t$
575	330625	1.5	495937.5
550	302500	6.0	1.815000
525	275625	1.5	413437.5
			2724375

portanto:

$$I_x = \sqrt{\frac{2724375}{3}}$$

$$I_x = \frac{1650,5}{3} = 550,16$$

e assim

$$I_{M_x} = \frac{550,16}{4} = 137,54$$

aproximando-se ≈ 137 amperes por motor.

É recomendável que a distinção dos blocos seja feita quando houver uma variação de correntes, entre um instante e outro a qual seja maior do que 5%, para a corrente da locomotiva.

$$\frac{I_{t_k}}{I_{t_{k-1}}} > 1.05$$

ou

$$\frac{I_{t_{k-1}}}{I_{t_k}} > 1.05$$

Para os intervalos de tempo de aceleração ou deceleração, estes são sempre considerados, tomando a corrente média aproximada para o intervalo de tempo $\Delta t = 1 \text{ min.}$ No caso mais raro em que a aceleração ou deceleração (coasting) tenha $\Delta t > 1 \text{ min.}$ ou mesmo dure vários $\Delta t(s)$ de 1 min., com variação de corrente, entre Δt 's maiores do que 5%, neste caso adotou-se o mesmo procedimento usado em $\Delta t(s)$ de 1 minuto, somente que de fração de minuto, retornando para o 1 minuto convencional no final desses períodos.

Entendeu-se que devido à própria forma com que a corrente varia na locomotiva, a influência da aceleração e deceleração é pequena considerando-se um bloco total em que a corrente de regime mantém-se por vários $\Delta t = 1 \text{ minuto}$.

5.2- O USO DOS DADOS DE TESTE

O uso dos dados obtidos, durante os testes de protótipos e convenientemente tratados para o computador através do programa já exposto, deve ser confirmado no mínimo a cada 100 motores produzidos a fim de que se tenha certeza que todo o lote fabricado mantenha a calibração usada nas unidades protótipo.

Para isso foram desenvolvidos testes chamados comerciais, os quais aplicados para todas as unidades, garantem que qualquer motor produzido está de acordo com os protótipos testados.

Depois de 100 motores produzidos, repetiram-se os testes de protótipo, com exceção da função $I = \int \frac{1}{t}$ e todos os demais valores tanto de comutação como de aquecimento foram também confirmados.

5.3- EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DO PERFIL TÉRMICO

COEFICIENTES DA CURVA TEMP = F(I) (I MENOR QUE I LIMITE)

A(0) = -0.4095140E-01
 A(1) = 0.8214700E-01
 A(2) = 0.3675000E-02
 A(3) = -0.1546000E-04
 A(4) = 0.2803000E-07

COEFICIENTES DA CURVA GRAU/SEG = F(I)

A(0) = -0.2356680E+02
 A(1) = 0.7866701E-01

COEFICIENTES DA CURVA PER UNIT DE TEMPERATURA

A(0) = 0.4625580E+00
 A(1) = -0.8144000E-01
 A(2) = 0.5244100E+00

CORRENTE LIMITE = 340.0 AMPERES

TRECHO DE OPERACAO -BF-RJ

COMENTARIOS	TEMPOS: DECORRIDO	DURACAO	CORRENTE	TEMPERATURA
	4.0	4.0	160.94	94.71
DM.	9.0	5.0	86.15	83.16
	14.0	5.0	83.35	73.34
PQ.	19.6	5.5	62.73	63.04
OZ.	24.1	4.5	210.62	67.40
QN.	29.1	5.0	122.04	63.27
	34.1	5.0	80.71	56.61
BY.	39.1	5.0	105.19	52.93
	44.1	5.0	133.92	52.23
	49.1	5.0	98.32	48.74
CT.	54.1	5.0	144.29	49.64
AB.	59.1	5.0	157.40	51.53
	64.1	5.0	179.76	55.13
SJ.	69.2	5.0	206.72	60.77
	74.2	5.0	245.43	69.85
ML.	76.7	2.5	272.20	76.47
GP.	84.7	8.0	77.72	63.76
SR.	89.7	5.0	113.82	59.57
	94.7	5.0	240.18	68.20

TE

*SNR\$0LT\$\$

NR=41

*\$FS41\$42\$0LT\$\$

NR=42

*EG\$\$

FORTRAN: CAVA.F4

LINK: LOADING

[LNKXCT CAVA EXECUTION]

%FRSDEV END OF FILE

UNIT=42 DSK:FOR42.DAT(3046,3015)K057>/ACCESS=SEQIN/MODE=ASCII

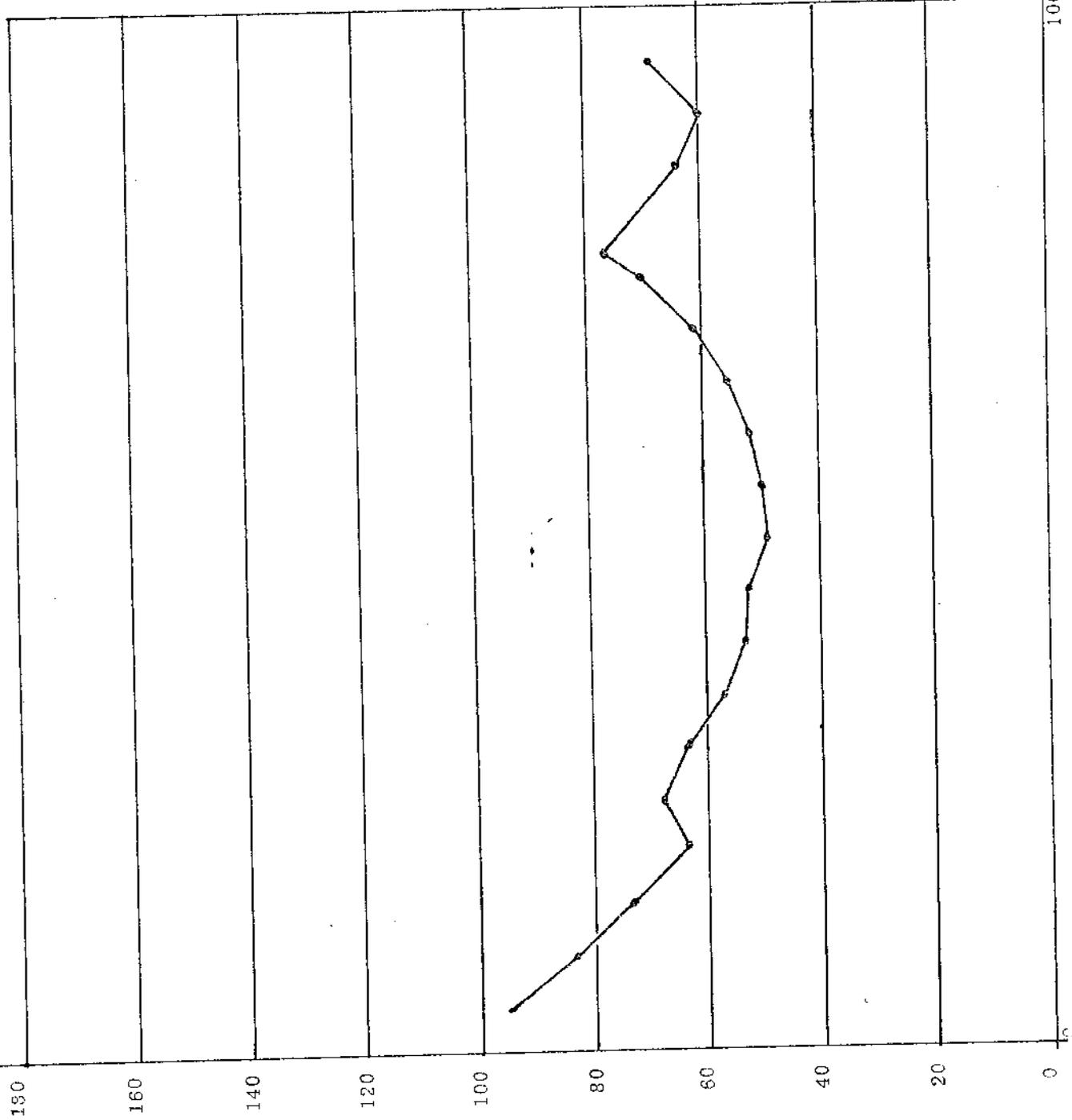
? JOB ABORTED

END OF EXECUTION

CPU TIME: 0.85 ELAPSED TIME: 4.20

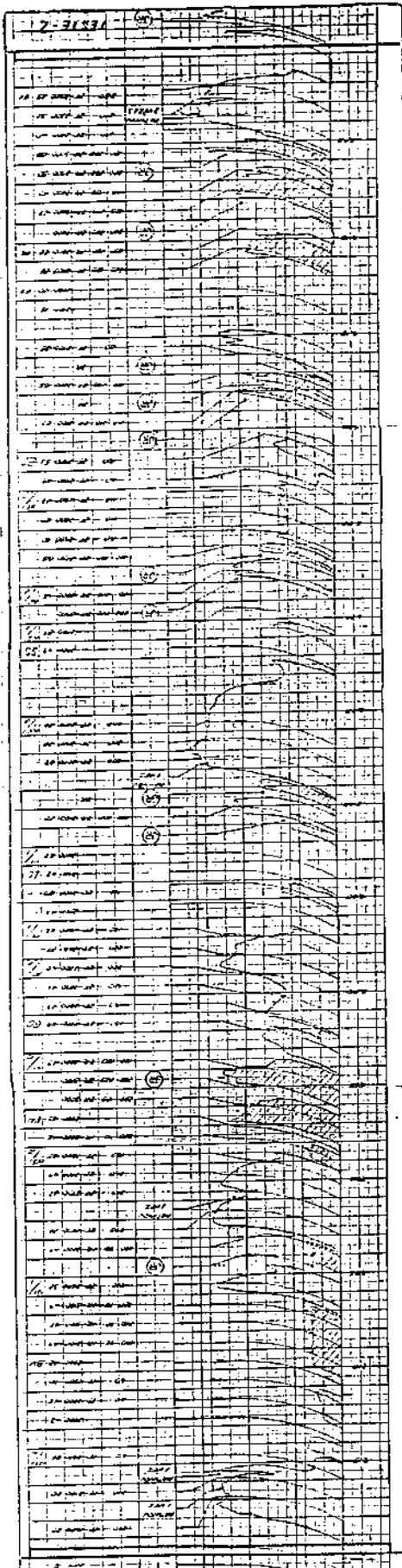
EXIT

e (°C)



Teste I

t (min)



TY FOR31.DAT

PERFIL TERMICO DO MOTOR TIPO GE 734-R2

COEFICIENTES DA CURVA TEMP = F(I) (I MENOR QUE I LIMITE)

- A(0) = -0.4095140E-01
- A(1) = 0.8214700E-01
- A(2) = 0.3675000E-02
- A(3) = -0.1546000E-04
- A(4) = 0.2800000E-07

COEFICIENTES DA CURVA GRAU/SEG = F(I)

- A(0) = -0.2356680E+02
- A(1) = 0.7866701E-01

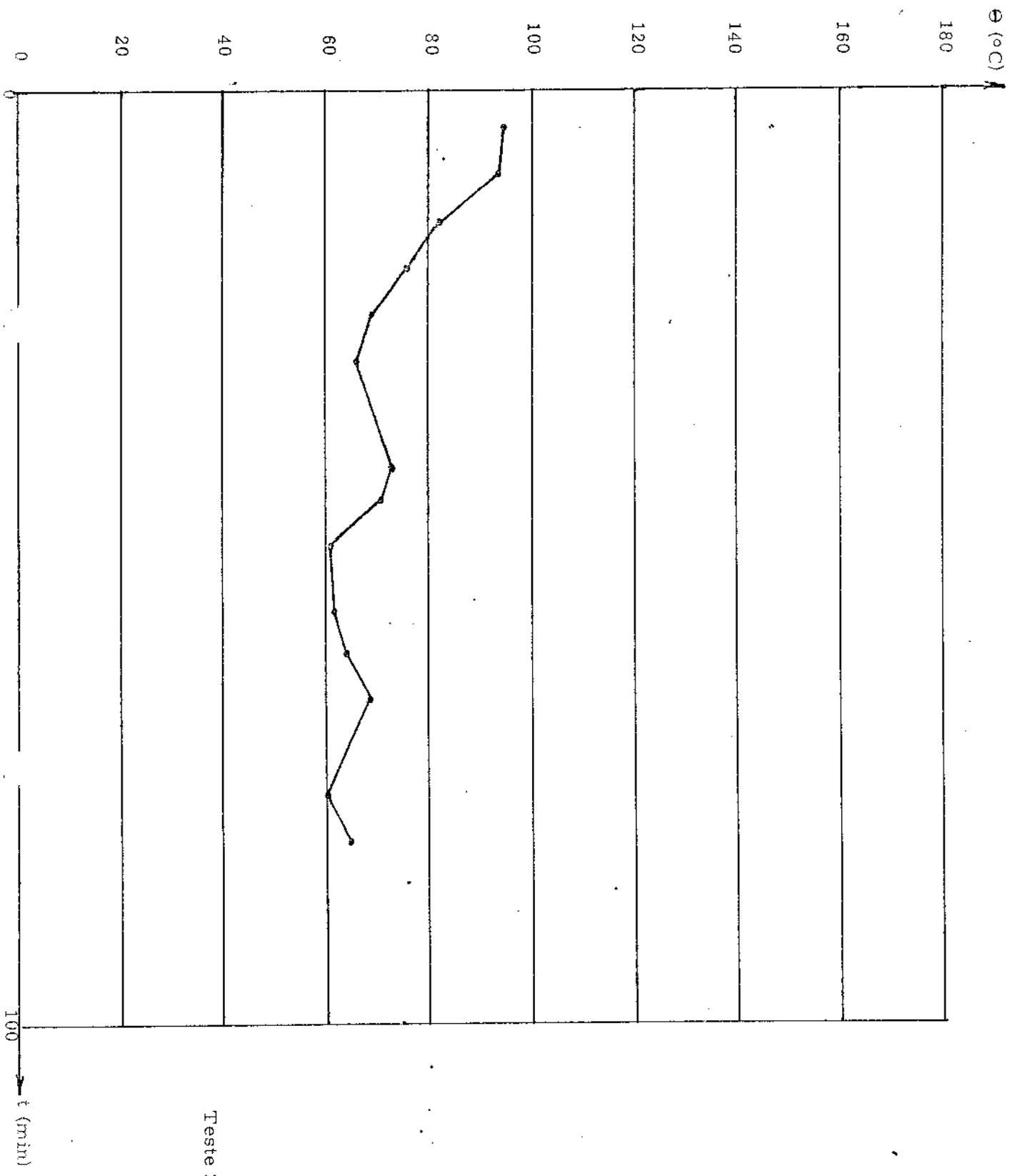
COEFICIENTES DA CURVA PER UNIT DE TEMPERATURA

- A(0) = 0.4625580E+00
- A(1) = -0.8144000E-01
- A(2) = 0.5244100E+00

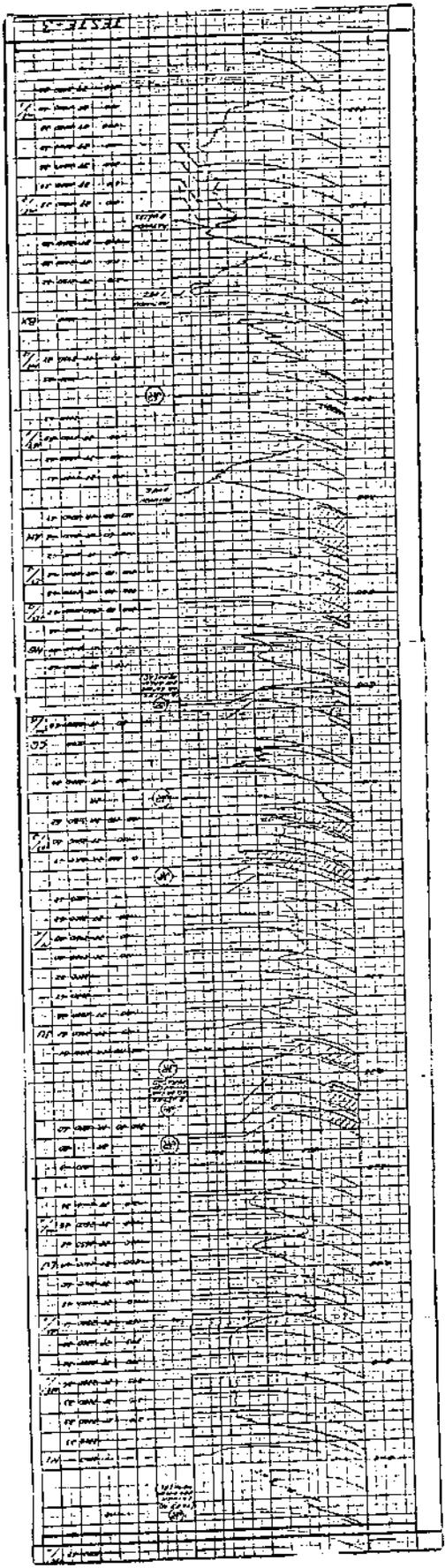
CORRENTE LIMITE = 340.0 AMPERES

TRECHO DE OPERACAO -BF-RJ

COMENTARIOS	TEMPOS: DECORRIDO, DURACAO	CORRENTE	TEMPERATURA
	4.0 4.0	154.21	94.21
	9.0 5.0	204.73	93.08
	14.0 5.0	88.79	82.00
	19.0 5.0	125.46	75.71
BT.	24.1 5.0	107.91	69.03
	29.1 5.0	139.13	66.07
SS.	40.1 11.0	207.91	72.77
LL.	43.6 3.5	153.74	71.00
	48.6 5.0	52.46	61.15
GO.	55.6 7.0	163.55	61.79
YP.	60.1 4.5	186.93	64.16
	65.1 5.0	210.60	60.69
BV.	75.6 10.5	114.00	60.38
	80.7 5.0	205.47	65.01



Teste 2



TY FOR31.DAT

1

PERFIL TERMICO DO MOTOR TIPO GE 734-A2

COEFICIENTES DA CURVA TEMP = F(I) (I MENOR QUE ILIMITE)

A(0) = -0.4095140E-01
A(1) = 0.8214700E-01
A(2) = 0.2675000E-02
A(3) = -0.1546000E-04
A(4) = 0.2808000E-07

COEFICIENTES DA CURVA GRAU/SEG = F(I)

A(0) = -0.2356680E+02
A(1) = 0.7866701E-01

COEFICIENTES DA CURVA PER UNIT DE TEMPERATURA

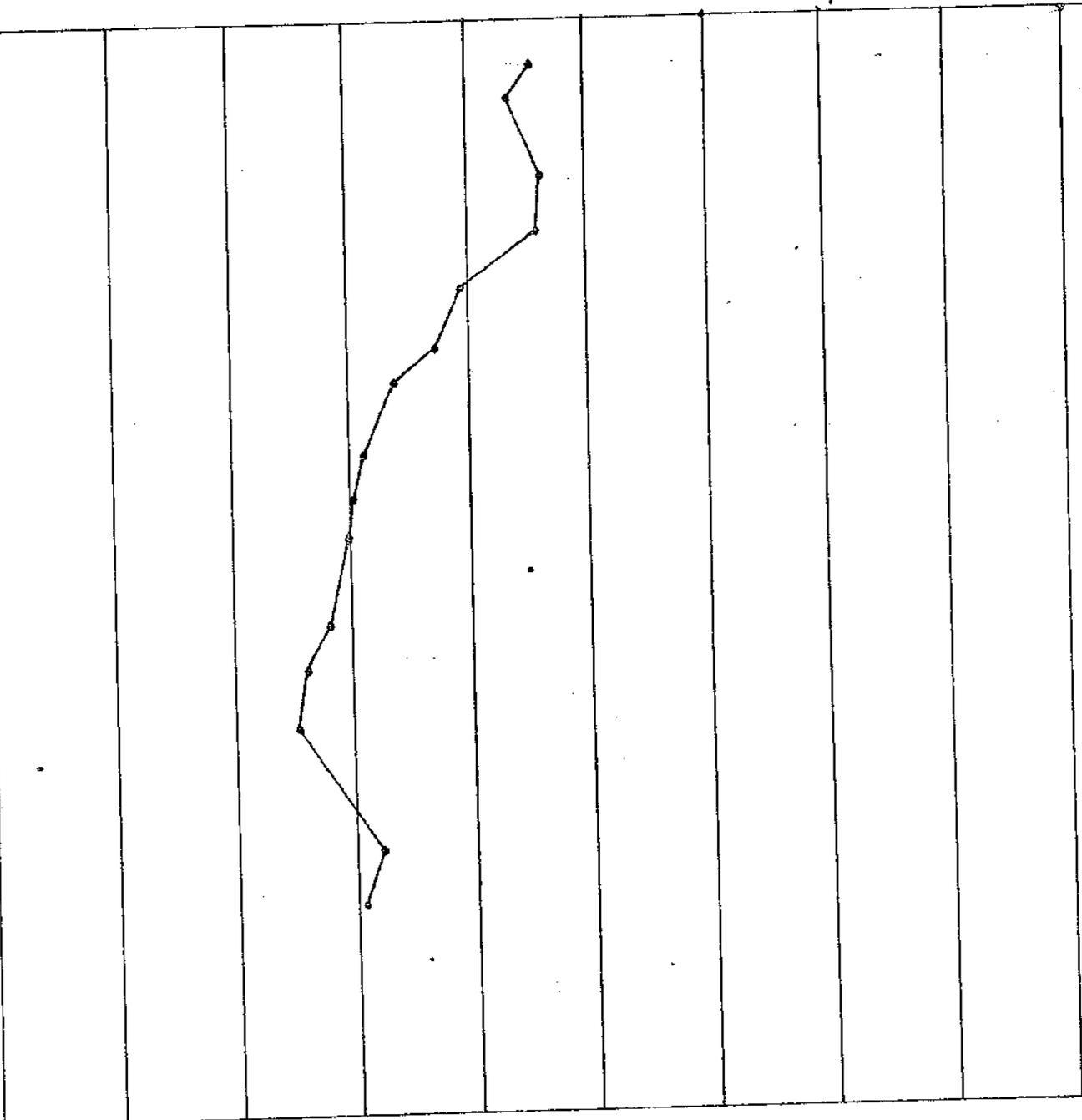
A(0) = 0.4625580E+00
A(1) = -0.8144000E-01
A(2) = 0.5244100E+00

CORRENTE LIMITE = 340.0 AMPERES

TRECHO DE OPERACAO -BF-RJ

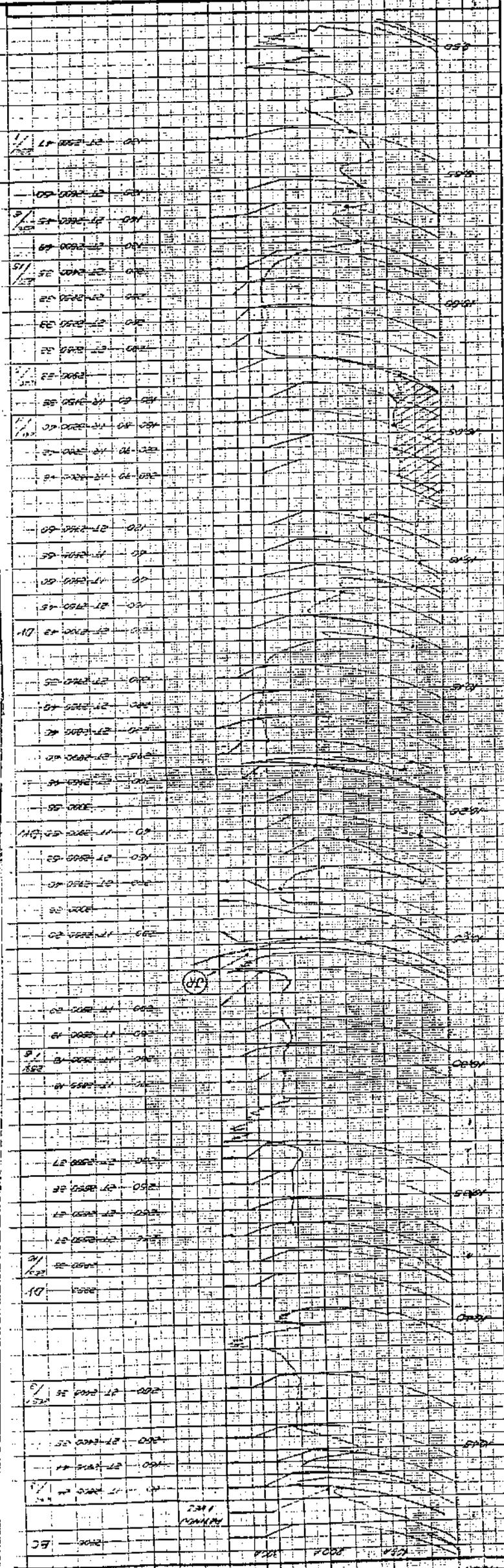
COMENTARIOS	TEMPOS: DECORRIDO, DURACAO	CORRENTE	TEMPERATURA
	4.0 4.0	109.52	91.03
	7.0 3.0	147.88	87.04
	14.0 7.0	242.56	92.53
BX.	19.0 5.0	283.44	91.55
	24.1 5.0	60.54	78.75
AM.	29.6 5.5	144.32	74.30
HG.	32.6 3.0	54.44	67.34
CO.	39.1 6.5	120.34	62.19
	43.1 4.0	134.78	60.35
	46.6 3.5	143.01	59.46
JU.	54.6 8.0	126.84	56.12
	58.6 4.0	90.90	52.14
	64.1 5.5	121.25	50.40
LJ.	75.6 11.5	221.00	64.33
MI.	80.7 5.0	128.56	61.26

$\theta(^{\circ}\text{C})$
180
160
140
120
100
80
60
40
20



Teste 3

t (min)



30

01-0000-10 02-0000-10 03-0000-10

TY FOR31.DAT

PERFIL TERMICO DO MOTOR TIPO GE 734-A2

1

COEFICIENTES DA CURVA TEMP = F(I) (I MENOR QUE ILIMITE)

- A(0) = -0.4895140E-01
- A(1) = 0.8214700E-01
- A(2) = 0.3675000E-02
- A(3) = -0.1546000E-04
- A(4) = 0.2900000E-07

COEFICIENTES DA CURVA GRAU/SEG = F(I)

- A(0) = -0.2356600E+02
- A(1) = 0.7866701E-01

COEFICIENTES DA CURVA PER UNIT DE TEMPERATURA

- A(0) = 0.4625500E+00
- A(1) = -0.8144000E-01
- A(2) = 0.5244100E+00

CORRENTE LIMITE = 340.0 AMPERES

TRECHO DE OPERACAO -BF-RJ

COMENTARIOS	TEMPOS:DECORRIDO,DURACAO	CORRENTE	TEMPERATURA
	3.0 3.0	207.65	98.78
	9.0 6.0	137.18	89.49
	13.0 4.0	265.23	95.35
	19.0 6.0	69.26	88.57
DV.	23.0 4.0	144.58	76.83
	29.1 6.0	230.34	82.04
DVI.	33.1 4.0	94.53	74.62
DY.	50.1 17.0	247.55	89.66

e(°C)

180

160

140

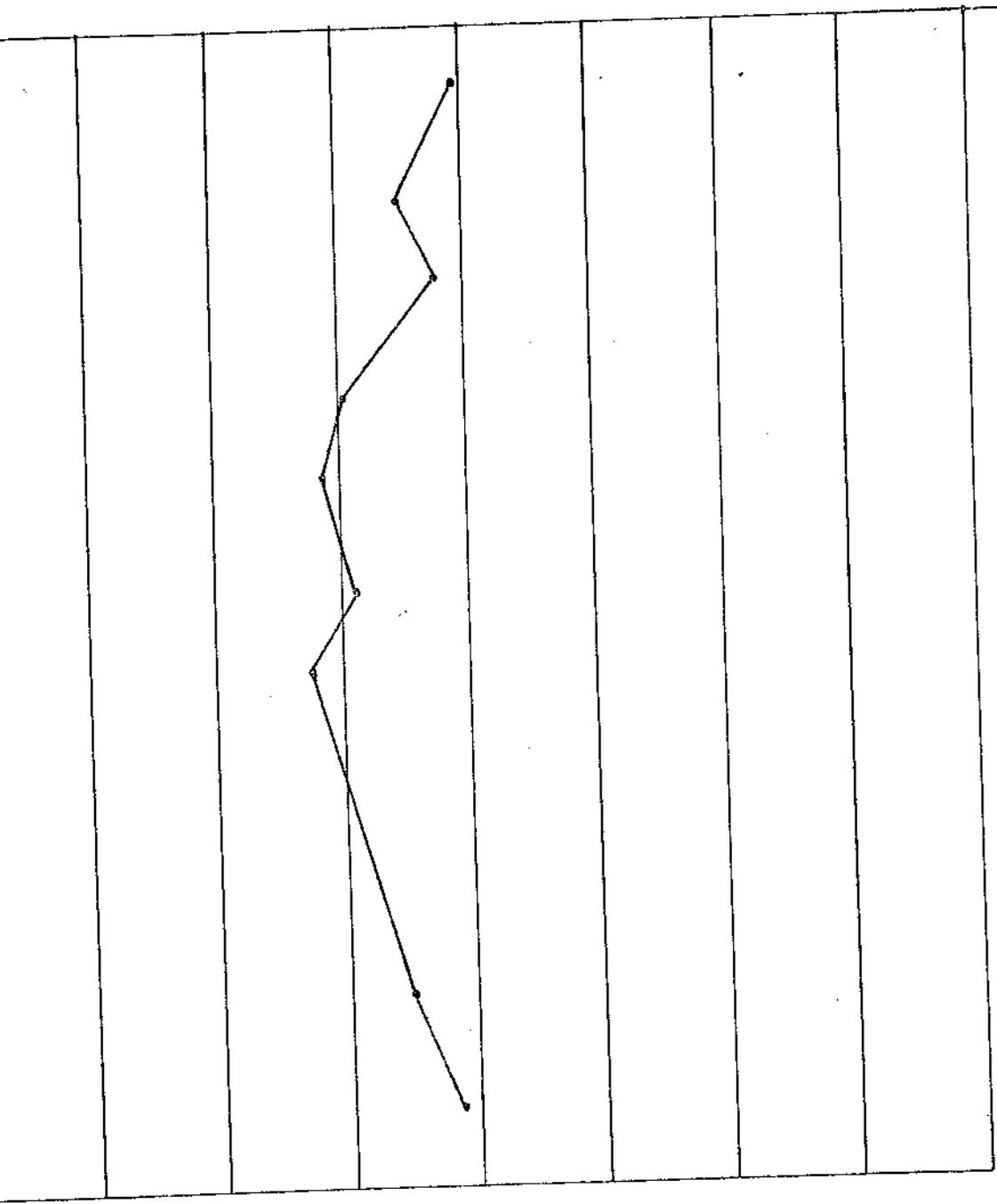
120

100

80

60

40



(1) O método apresentado oferece dados seguros e nos casos de correntes muito altas, $I \gg I_c$ os resultados são do lado pessimista. Com este panorama, qualquer medida tomada pelo usuário em relação aos resultados de um Perfil Térmico no sentido de melhorar a performance da locomotiva de uma composição serão de confiança.

(2) Como o método é baseado em dados obtidos diretamente da sala de testes, os seus resultados serão tão exatos quanto forem os resultados obtidos nos testes. No caso em questão, foram usados todos os instrumentos e técnicas mais modernas e que perduram até hoje, para os níveis de medidas relativas ao tipo de equipamento testado. (Vide relação de instrumentos em anexo).

(3) O método será ainda mais perfeito, para motores de tração do tipo fechado com ventilação externa, para os quais é grande a probabilidade de existência de uma C.T.T. única.

(4) Da mesma maneira em que já foi exposto o processo é aplicável a qualquer tipo de motor de tração, tanto para carros elétricos como locomotivas.

(5) É fundamental que as funções $\Delta \Theta = \mathcal{F}(I)$ e $I = \mathcal{F}(\frac{1}{t})$ sejam determinadas com as tensões mais frequentes na catenária, para o trecho indicado de percurso ou tensões próximas delas. Por outro lado, quando se pretende levantar dados para o traçado do Perfil Térmico, a estrada poderá, para o teste, manter por um período determinado de tempo uma tensão estável na catenária. Não será recomendável a tomada de dados em trechos de catenária em balanço e sim sempre entre duas subestações.

(6) A vazão de ar de entrada para os motores de tração deve manter a pressão estática de entrada nas câmaras de comutação dos vários M.T. da locomotiva e por esta razão a tensão da catenária não poderá variar muito.

(7) Os testes praticados nos M.T. devem ser extremamente rigorosos e seus resultados devem ser conferidos, tanto quanto possível, pois constituem a base para a obtenção de resultados de confiança através do método.

(8) Quando a produção do lote de M. T. (s) envolvidos for grande, ao redor de no mínimo 100 unidades, recomenda-se que sejam feitos ensaios de aquecimento com correntes $I \gg I_c$ até a estabilidade térmica, mesmo que nas correntes maiores se venha a provocar alguns danos no motor. Entendemos que é compensatório praticar testes que possam ser destrutivos em uma unidade de protótipo com a finalidade posterior de proteção a outras 99 ou 100 unidades.

(9) Os M. T. teoricamente poderão suportar testes de aquecimento até o ponto em que a calibração de comutação da máquina permita.

(10) Não poderá, nem deverá ser feito qualquer ensaio de aquecimento sem uma prévia e rigorosa calibração do protótipo, no que se refere à sua comutação.

(11) O método tem flexibilidade suficiente para ajustes a qualquer máquina que saia do padrão mais convencional, podendo a função $Z \equiv \mathcal{F}(t)$ ser determinada em conformidade com o caso ou casos de exceção mais evidentes. Com auxílio de um programa conveniente, o computador poderá facilmente contornar tais exceções. (Casos de locomotivas bicorrente e M. T. s que trabalham em AC e DC).

(12) As locomotivas em questão, até a presente data, não apresentaram nenhum problema em motores de tração que revelem dano por fadiga térmica, determinando o reparo do motor, por fim de vida precoce dos materiais isolantes.

(13) O método do Perfil Térmico pode facilmente ser adaptado a tensões de catenaria diferentes de 3.000 V-C.C. e suas respectivas variações bastando-se que para isso ao invés de uma só função $\Delta\theta \equiv \mathcal{F}(I)$ desenvolvam-se uma família delas, com as variações de tensão e/ou vazão de ar conforme for desejado.

CAPÍTULO VII - BIBLIOGRAFIA

- (1) M. LIWSCHITZ - Calcolo e Determinazione delle dimensioni delle Macchine Elettriche - 1957.
- (2) TRACTION MOTOR HANDBOOK - AAR publication 1967.
- (3) M. KOSTENKO AND L. PIOTROVSKY - Electrical Machines - Part One - 1970.
- (4) WAGNER WANECK MARTINS - Curso de Tração Elétrica - EEUM - 1959
- (5) ASME - American Standards for Mechanical Engineers - Power test codes, part 5, chapter 4, Flow Measurements.
- (6) A. QUERQUES - Materiali Elettrici - Volume Primo - Materiali Isolanti - 1948.
- (7) M. LIWSCHITZ - GARIK - CLYDE C. WHIPPLE - Máquinas de Corrente Contínua - Tradução da 2a. edição - 1958.
- (8) M. MIKHEYEV - Fundamentals of Heat Transfer - 1968
- (9) A. J. STEPANOFF - Turboblenders - Theory, Design of Centrifugal and Axial Flow Compressors and Fans - 1955
- (10) M. LIWSCHITZ - H. GLOCKNER - Le Machine Elettriche - Parte Seconda - Tecnica Dell'isolamento e Construzione Meccanica-1962
- (11) VIRGIL MORING FAIRES - Thermodynamics - 1957.
- (12) CHARLES S. SISKIND - Induction Motors - 1958.
- (13) ANTONIO CARRER - Macchine Elettriche - Ristampa della seconda edizione.
- (14) TIMBIE AND BUSH - Principios de Eletrotecnica - 1963.
- (15) CHESTER L. DAWES - Curso de Eletrotecnica - 1957.
- (16) CLARENCE V. CHRISTIE - Elementos de Eletrotecnica - 1956.
- (17) A. E. KNOWLTON - Standard Handbook for Electrical Engineers - 1957.
- (18) JOHN H. KUHLMANN - Diseño de Aparatos Electricos - 4a. Impression - 1969.
- (19) N. VINOGRADOV - Electrical Machine Winder - 1970.
- (20) I. M. POSTNIKOV - Proektirovanie Elektricheski Maxin - 1952.
- (21) BUFFALO FORGE COMPANY - Fan Engineering - 1961.
- (22) GENERAL ELECTRIC TEST MANUAL - General Electric Inc. 1948.
- (23) MORGAN-CRUCIBLE GROUP - Carbon Brushes and Electrical Machines - Morganite Carbon Limited - 1961.
- (24) ENRICO POLLONI - JERSZY - KORNBLUH - Tração Elétrica - Material de Tração - EEUM - Departamento de Publicações do Centro Académico Horacio Lane - 1971.

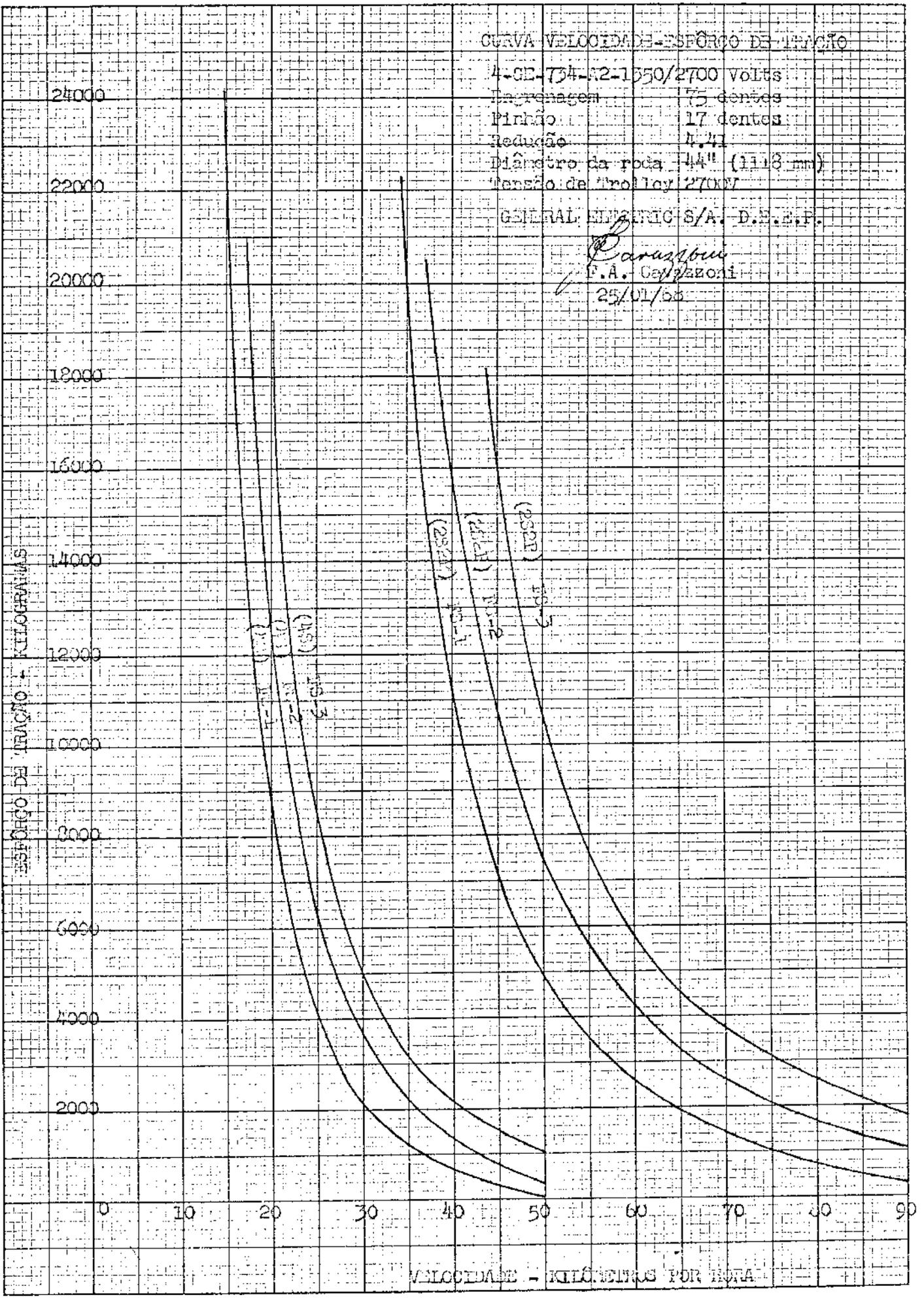
- (25) FELICE CORINI - Trazione Elettrica - Terza edizione - 1950
Volume II
- (26) RUDOLF RICHTER - Elektrische Maschinen - Band I
Gleichstrommaschinen - 1962.
- (27) WALTER NURNBERG - Die Prüfung Elektrischer Maschinen
Springer - Verlag - 1962.
- (28) F. A. CAVAZZONI - Curso de Locomotivas para a Estrada de
Ferro Sorocabana - General Electric do Brasil S/A - 1969.
- (29) C. A. ATWELL - Fellow A. I. E. E. - Fundamentals of Flashing
of Diesel-Electric Motors and Generators - Publicação Revista -
Electrical Engineering 1954.
- (30) G. M. WOODS - Member A. I. E. E. - C. R. STEEN - Associate
Member A. I. E. E. - New Series - Type Trolley Coach Motor -
1952 - Publicação - Electrical Engineer.
- (31) NORMAN PEACH - Motors - Power Magazine Special Report
June 1969.
- (32) AMERICAN-STANDARD DEFINITION OF ELECTRICAL TERMS -
AEEI - Group 42 Transportation - Land - (42.10.005 a 42.95.055)
- (33) METALS HANDBOOK - Vol. 1 - ASM - Properties and Selection
of Metals - 1961.
- (34) AMERICAN STANDARD FOR ROTATING ELECTRIC MACHINERY -
Forming a part of the power equipment on electrically - propelled
railway cars, railway locomotives, and coaches (trolley and prime
mover) - ASA - C35.1 - 1962 UDC - 621.333 - AIEE N°11 - 1962.
- (35) AMERICAN STANDARD - ELECTRICAL INDICATING INSTRUMENTS
NEMA N° E 1 1-1955 - ASA C39.1 - 1955 - UDC 621.317.7
1955.

CURVA VELOCIDADE-ESFÓRÇO DE TRACÇÃO

4-GE-734-A2-1550/2700 Volts
 Engrenagem 75 dentes
 Pinhão 17 dentes
 Redução 4,41
 Diâmetro da roda 44" (1118 mm)
 Tensão de Trolley 2700V

GENERAL ELECTRIC S/A. D.E.S.P.

Carazzini
 F.A. Carazzini
 25/01/68



CURVA VELOCIDADE-ESFÓRÇO TRATOR

LOCOMOTIVA - B-3 - SORCUBANA
4-GE-734-A2-1500/3000 Volts

Engrenagem - 75 dentes
Pinão - 17 dentes

Redução - 4.41

Diâmetro da roda - 44" (1118 mm)

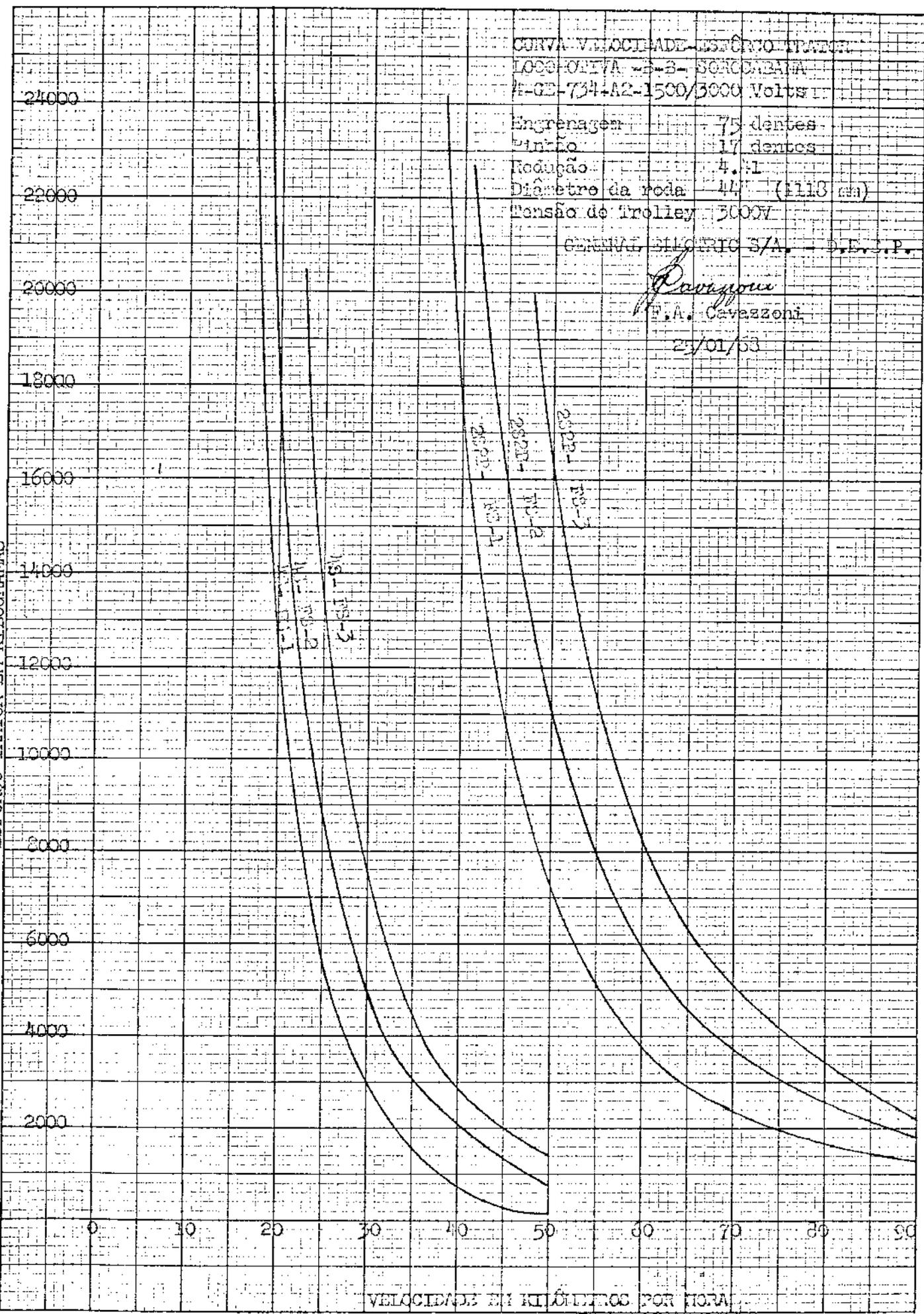
Tensão de Trolley - 3000V

GENÉRIAS ELÉTRICO S/A. - S.E.L.P.

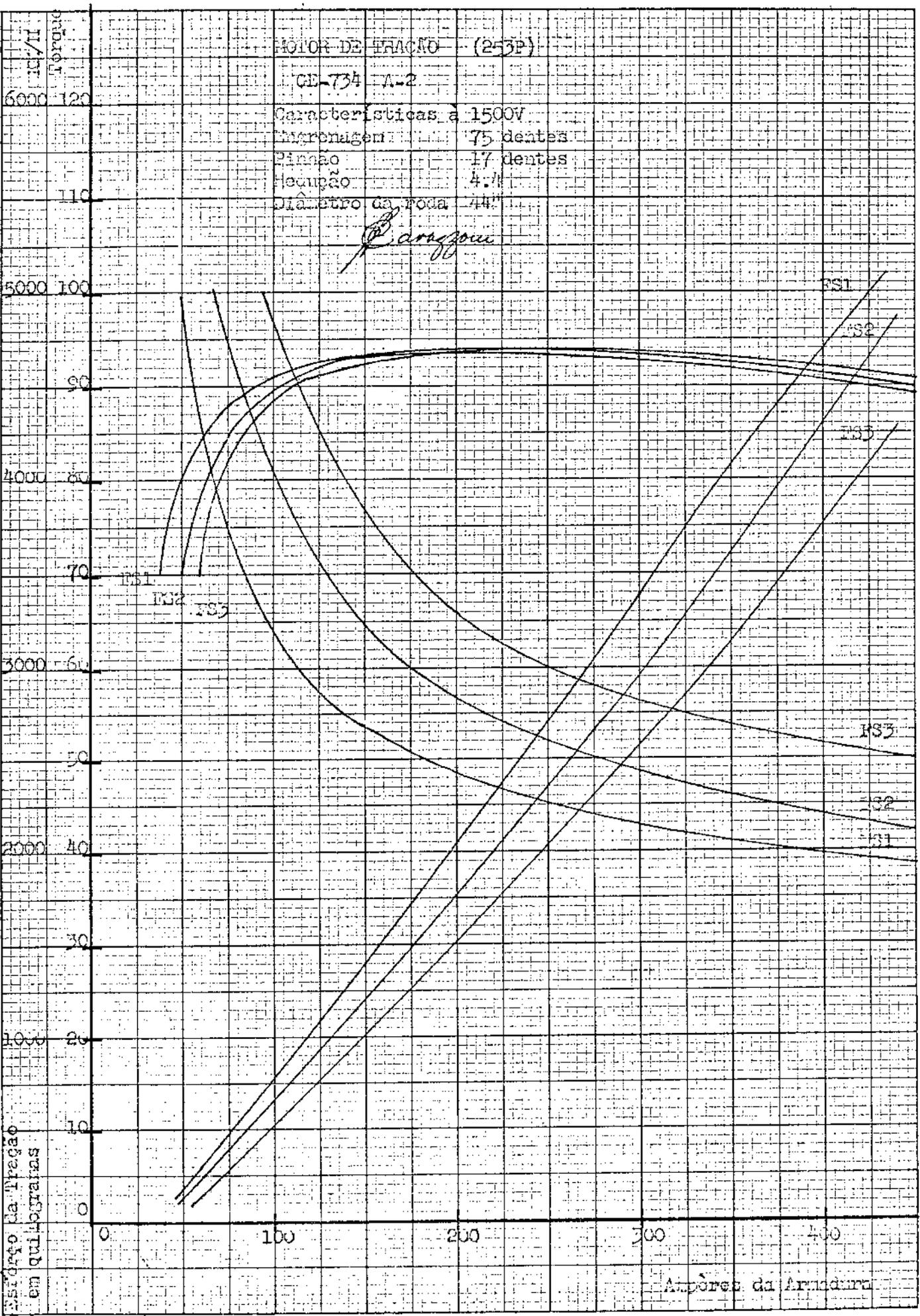
F. A. Cavazzoni
F.A. Cavazzoni

25/01/63

ESFÓRÇO TRATOR EM KILOGRAMAS



VELOCIDADE EM KILOMETROS POR HORA



EFF

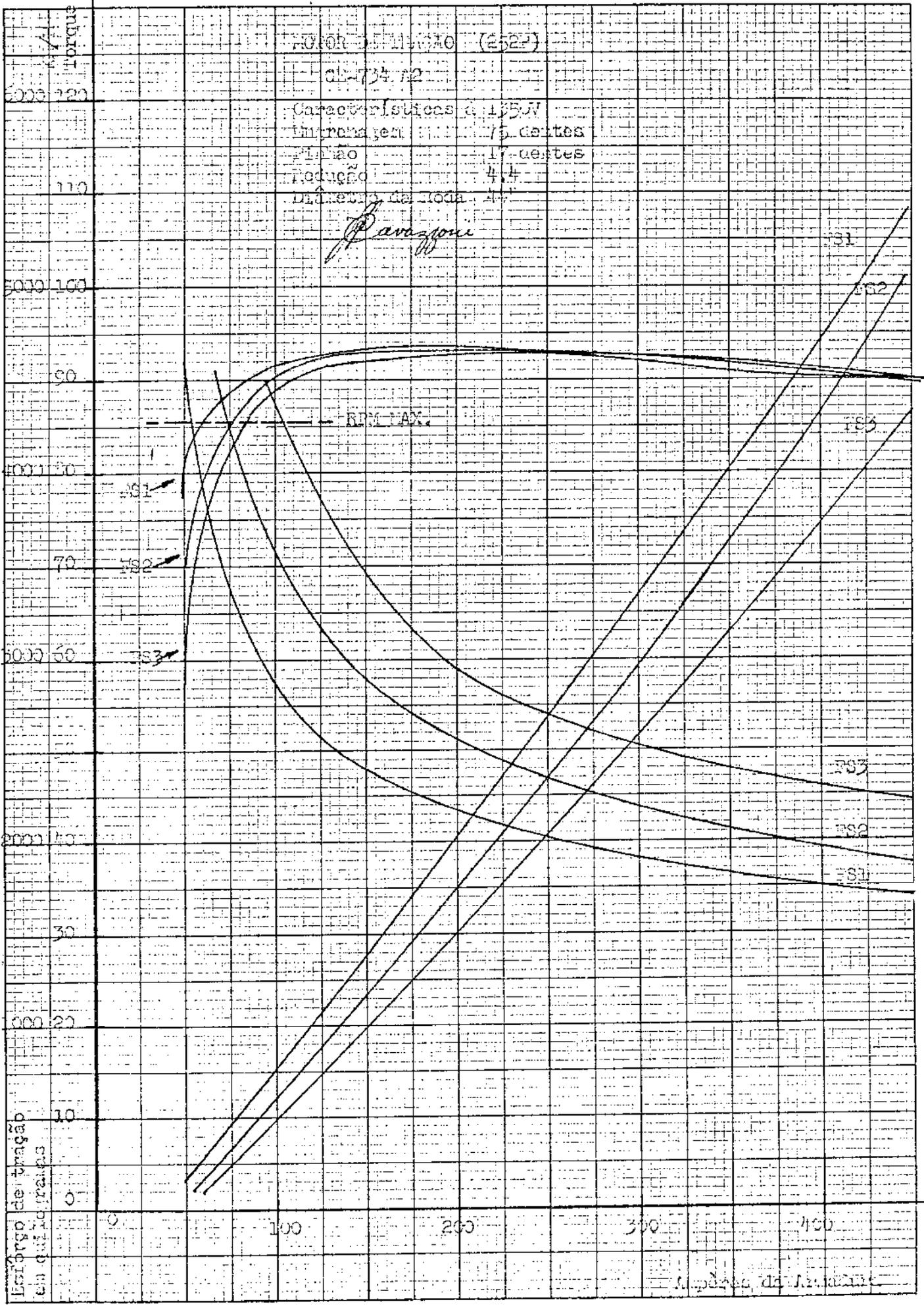
torque

Modelo 11-11-110 (2521)

01-734-72

Características a 115V
 Impedância 11.5 ohms
 Rotação 1700 rpm
 Redução 4.4
 Diâmetro da roda 4"

Paragon



INSTRUMENTOS USADOS NOS TESTES

Fig. (5)

V - Voltmetro - Singer Metrics Division Classe 0,2 %

A - Ampermetro - Singer Metrics Division Classe 0,2 %

Fig. (13)

V1; V2; V3; V4; Voltmetros Sensitive Reserv Division Singer Corporation Classe 0,1 %

A1 Milivoltmetro - Sensitive Reserv Division Singer Corporation Classe 0,1 %

A2 Milivoltmetro Singer Metric Division Classe 0,2 %

FOLHA DE ENSAIO DE COMUTACAO

CLIENTE: E.F. SORCABANA O.P.: 210039 N.S.: 210092 REQ. INTERNA: N.E.:
 TIPO DA MAQUINA: MOTOR DE TRACAO 734 RPM: TENSÃO: 1500 V CORRENTE: A KW:

MAQUINA: MOTORCABANO

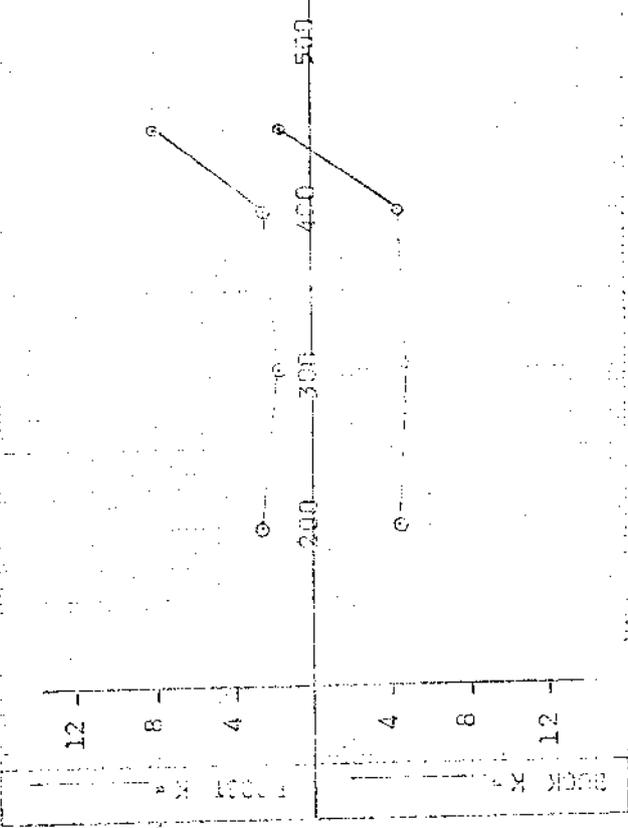
CAMPO DE COMUTACAO

SENTIDO DE RODACAO: AH
 CONTEUDO NOS ESCOVAS: -
 POSICAO DAS ESCOVAS: SPEED = 5410
 TANG. DE ESCOVAS: BOA
 POSICAO NAS ESCOVAS: BOA
 CONEXAO DAS ESCOVAS: 100%
 CONTEUDO DO COMUTADOR: BOA
 CALIBRE NOS MAGNETICOS: 0,195"

CORRENTE EM DERIVACAO:
 RESISTOR N.º:
 CONEXAO DO RESISTOR:
 CAMPO SÓLID
 CORRENTE EM DERIVACAO: 50%
 RESISTOR N.º:
 CONEXAO DO RESISTOR:

CAMPO EM DERIVACAO:
 CORRENTE EM VAZIO:
 CORRENTE EM PLENA CARGA:

CARGA %	GRAU DE COMUT.	LIM. DE FAIXA		SENTE DO DERIVAÇÃO	FAIXA %
		K = $\frac{Z}{2}$	K = $\frac{Z}{2}$		
200		2,2	1,3		
300		2,4	0,8		
400		2,2	1,0		
450		-0,8	-4,0		



RESPOSTAS:

DEPARTAMENTO DE EQUIPAMENTO ELÉTRICO PESADO ÁREA DE ENSAIOS FINAIS

FOLHA DE ENSAIO DE COMUTÇÃO

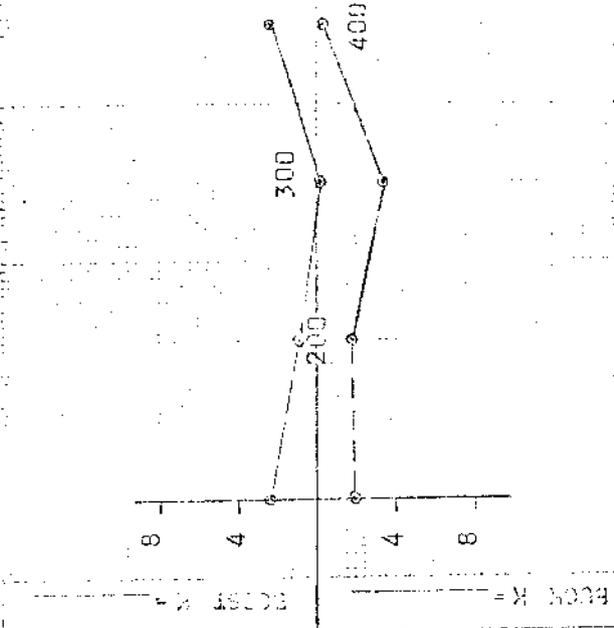
CLIENTE: E.F. SOROCADANA O.P.: 210010 N.ºS.: 210898 C.C.Q. INTERNA: N.E.:
 TIPO DA MÁQUINA: MOTOR DE TENSÃO 734 RPM: TENSÃO: 1500 V CORRENTE: A N.ºS.:

MAQUINA: MOTORISANDO
 SENTIDO DE ROTÇÃO: H
 ERREIRO NOS PÓLOS DE COMUT.: -
 POSIÇÃO DAS ESCÓVAS: SPEER - 5410
 TIPO DE ESCÓVAS: BDA
 ALISAMENTO DAS ESCÓVAS: 100%
 COM. PÓLO DO COMUTADOR: BDA
 CALIBROS NÃO MAGNÉTICOS: 0,195"

CAMPO DE COMUTÇÃO: ~~200~~ SÉRIE
 CORRENTE EM DERIVAÇÃO: 50%
 RESISTOR N.º: ~~200~~
 CONEXÃO DO RESISTOR: ~~200~~
 CAMPO EM DERIVAÇÃO: 50%
 RESISTOR N.º: ~~200~~
 CONEXÃO DO RESISTOR: ~~200~~

CAMPO EM DERIVAÇÃO: 50%
 CORRENTE EM VAZIO:
 CORRENTE EM PLENA CARGA:

CARGA %	LIMITE FAIXA		CENTRADA FAIXA		FAIXA %
	K=2	K=1	BUCK	BOOST	
	1500 V				RPN
200	1	0,9	0,4		1466
300	1 +	1,7	-0,2		1251
400	1	0,1	1,0		1116



Observações:

FOLHA DE ENSAIO DE COMUTAÇÃO

CLIENTE: E.F. SOROCADANA O.P.: 210039 N.ºS.: 210902 REQ. AUTOM.: - N.º: -
 TIPO DA MÁQUINA: MOTOR DE TRACÇÃO 734 RPM: - TENSÃO: 1500 V CORRENTE: - A

MÁQUINA: MOTORIZANDO

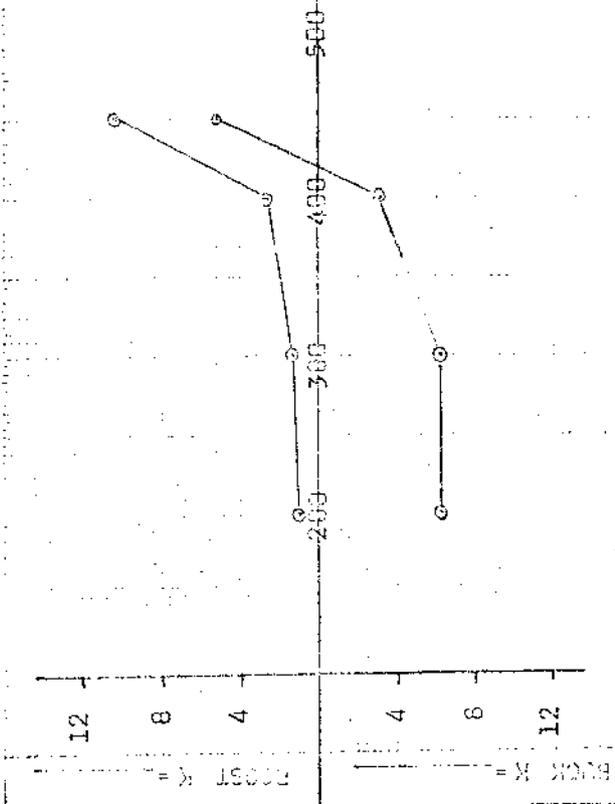
SENTIDO DE ROTAÇÃO: H
 ENTREFEHO NOS PÓLOS DE COMUT.: -
 POSIÇÃO DAS ESCÓVAS: SPEER - 5410
 TIPO DE ESCÓVAS: ODA
 INCLINAÇÃO DAS ESCÓVAS: 100%
 COMUTAÇÃO DAS ESCÓVAS: BOA
 CALIBRAÇÃO DO COMPUTADOR: 0,195"
 CALIBRES NÃO MAGNÉTICOS: -

CAMPO DE COMUTAÇÃO

CORRENTE EM DERIVAÇÃO: _____
 RESISTOR N.º: _____
 CONEXÃO DO RESISTOR: _____
 CAMPO ~~EM DERIVAÇÃO~~ SÉRIE _____
 CORRENTE EM DERIVAÇÃO: 0
 RESISTOR N.º: _____
 CONEXÃO DO RESISTOR: _____

CORRENTE EM VAZIO: _____
 CORRENTE EM PLENA CARGA: _____

CARGA %	GRAU DE COMUT. SUCK	LIM. DE FAIXA K =	BOOST	CENTRO DA FAIXA K =		FAIXA %
				SUCK	BOOST	
		1500V				
200		3,4	0,5			
300		3,2	0,6			
400		1,5	1,3			
450	1 1/4	-1,8	5,2			



COMENTÁRIOS:

DEPARTAMENTO DE EQUIPAMENTO ELÉTRICO PESADO ÁREA DE ENSAIOS FINAIS

FÓLHA DE ENSAIO DE COMUTAÇÃO

CLIENTE: E.F. SOROCABANA O.P.: 210039 Nº S.: 210829 RCQ INTERNA: - A.S.: -
 TIPO DA MÁQUINA: MOTOR DE TRACÇÃO 734 RPM: - TENSÃO: 1500 V CORRENTE: - A LINEAR: -

MÁQUINA: MOTORIZADO

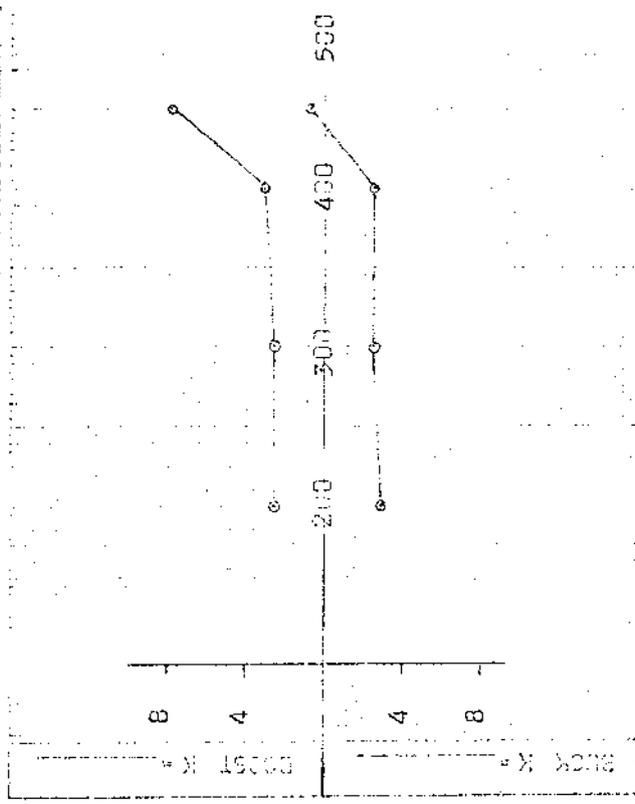
CAMPO DE COMUTAÇÃO

SENTEDO DE ROTAÇÃO: H
 ENCLAVAMENTO NOS POLOS DE COMUT.: -
 POSIÇÃO DAS ESCÓVAS: -
 TIPO DE ESCÓVAS: SPEER - 5410
 TENSÃO NAS ESCÓVAS: 0CA
 CAPACIDADE DAS ESCÓVAS: 100%
 CONDIÇÃO DO COMUTADOR: BQA
 CALIBRES NÃO MAGNÉTICOS: 0,195"

CORRENTE EM DERIVAÇÃO: -
 RESISTOR Nº: -
 CONEXÃO DO RESISTOR: -
 CAMPO 0 SÓLDO
 CORRENTE EM VAZIO: -
 CORRENTE EM PLENA CARGA: -
 CORRENTE EM DERIVAÇÃO: 0
 RESISTOR Nº: -
 CONEXÃO DO RESISTOR: -

CAMPO EM DERIVAÇÃO EM VAZIO: -
 CORRENTE EM VAZIO: -
 CORRENTE EM PLENA CARGA: -

CARGA %	GRAU DE COMUT.	LIM. DE FAIXA K=2		CENTRO DA FAIXA K=	FAIXA %
		BUCK	BOOST		
200		1,4	1,3		
300		1,2	1,3		
400		1,2	1,6		
450	1/4	-0,4	4,0		



OBSERVAÇÕES:

FOLHA DE BASTÃO DE COMPUTAÇÃO

CLIENTE: E.F. SORCABALIA O.P.: 211039 NES.: 210992 REQ. INTERNA: J.E.F. -
 TIPO DA MAQUINA: UNICL DE TRILHAÇÃO 734 RPM: TENSÃO: 120V V CORRENTE: A 12/1992

MAQUINA: MOTRICANDO

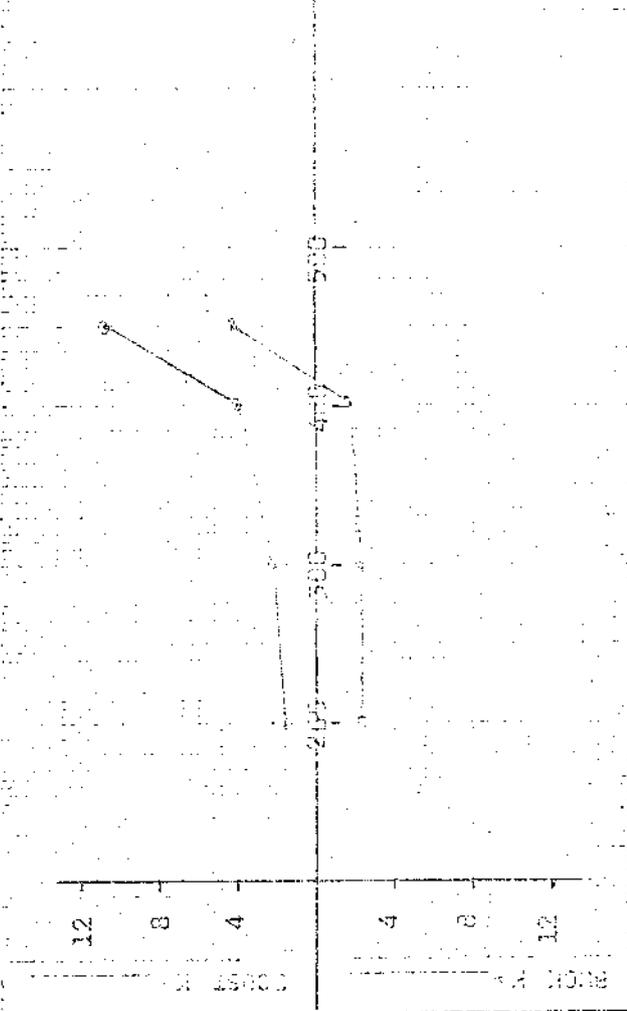
SENTIDO DE ROTAÇÃO: RH
 ENTREFEROS NOS PÓLOS DE COMUT.:
 POSIÇÃO DAS ESCÓVAS: DE
 TIPO DE ESCÓVAS: SPEER - 54AD
 PRESSÃO DAS ESCÓVAS: BOA
 COMBUSTÍVEL: 100%
 COMBUSTÍVEL NO COMPUTADOR: RAZOÁVEL
 CALÇES NÃO MAGNÉTICOS: D. 1950

CAMPO DE CONSULTAÇÃO

CORRENTE EM DERIVAÇÃO:
 RESISTOR Nº:
 CONEXÃO DO RESISTOR:
 CAMPO DE CONSULTAÇÃO: CAMPO EM VAZIO
 CONEXÃO DO RESISTOR: CONEXÃO EM PLEIA CARGA

CORRENTE EM DERIVAÇÃO: 0
 RESISTOR HZ:
 CONEXÃO DO RESISTOR:

CORRENTE %	GRAU DE COMUT. DC	LIMITE FAIXA K =		CENTRO DA FAIXA K =		FAIXA %	RPM
		BUCK	BOOST	BUCK	BOOST		
200	1	1,1	0,0			1071	
300	1	1,1	1,1			967	
400	1	0,05	2,0				
470	1 1/2	-2,2	5,3				



CORREÇÕES:

C. P. Duarte / C. R. Souza
 SUPERVISOR

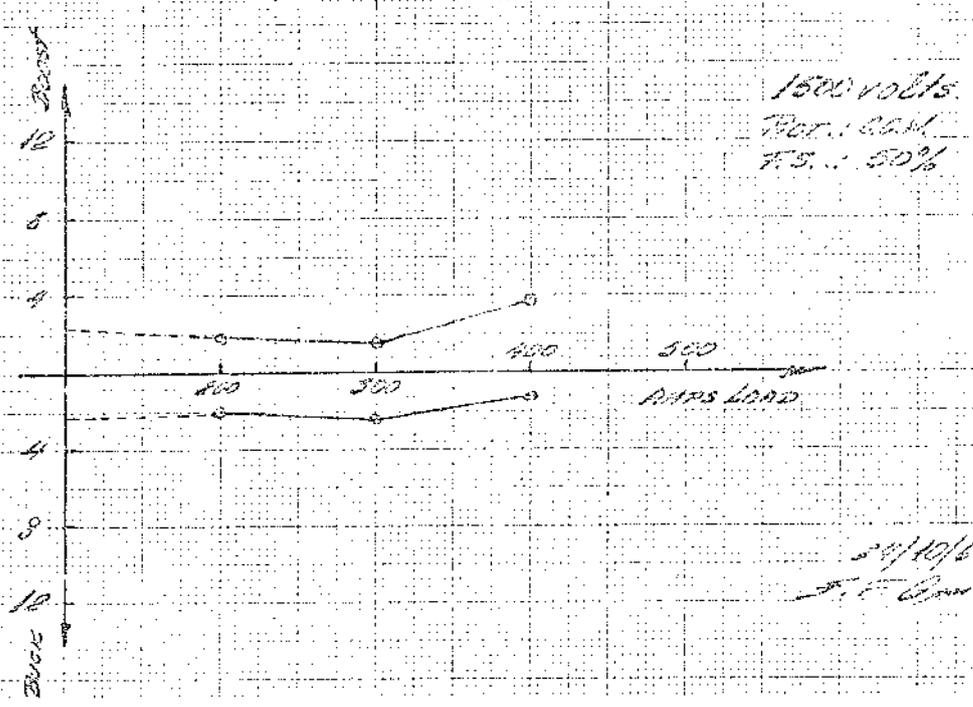
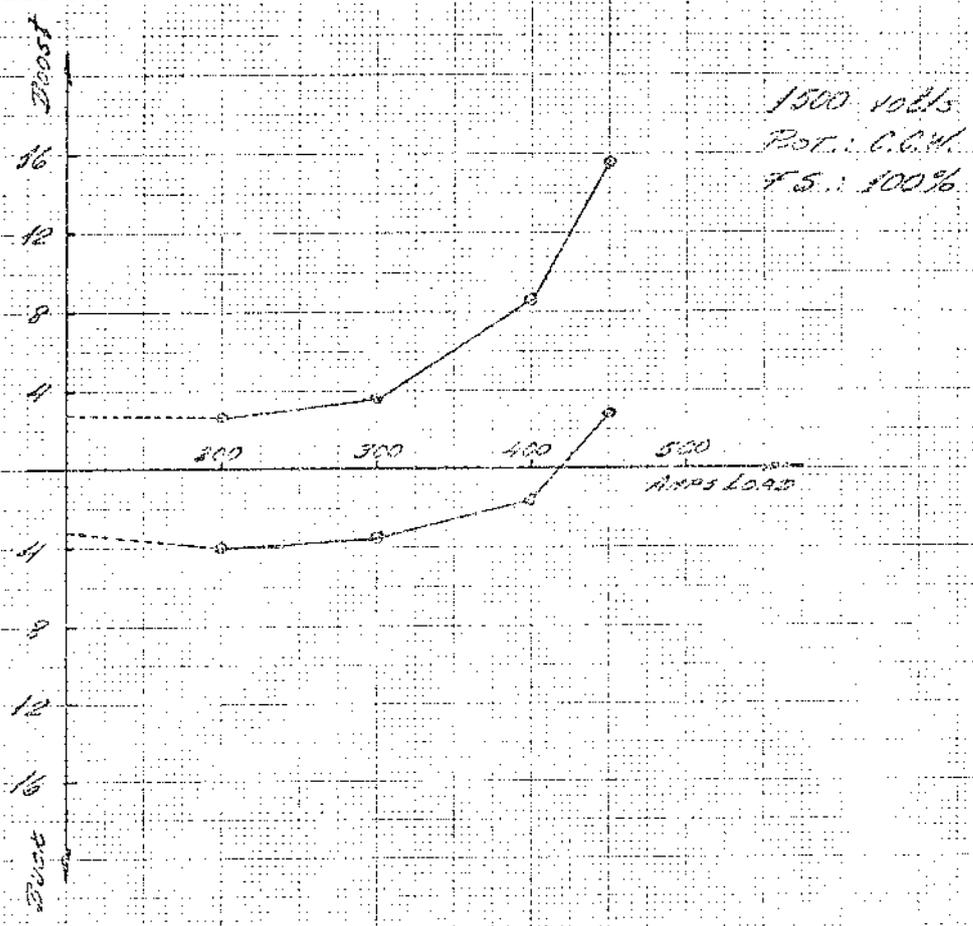
INGENHEIRO SUPERVISOR CHIEF

Carvalho

DEPARTAMENTO DE ENCOMENDAS

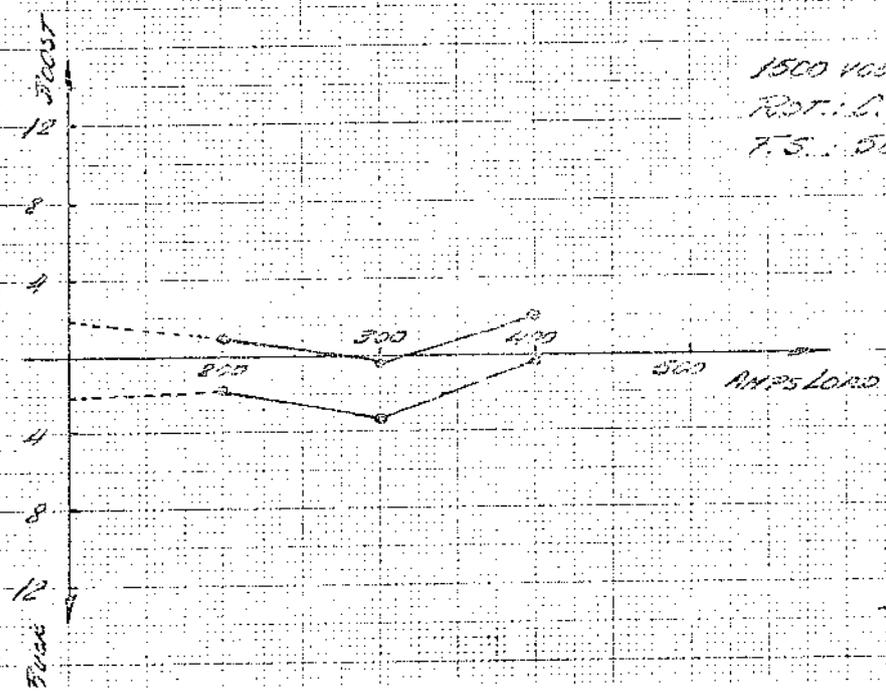
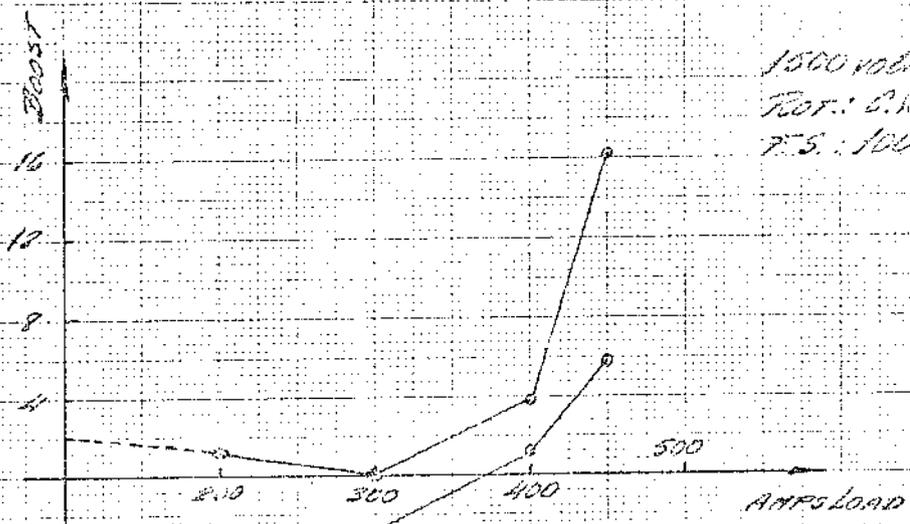
01/11/67

M-734-MS210222
COMUTACION
CARGAS MIPERMANES : 0,195"



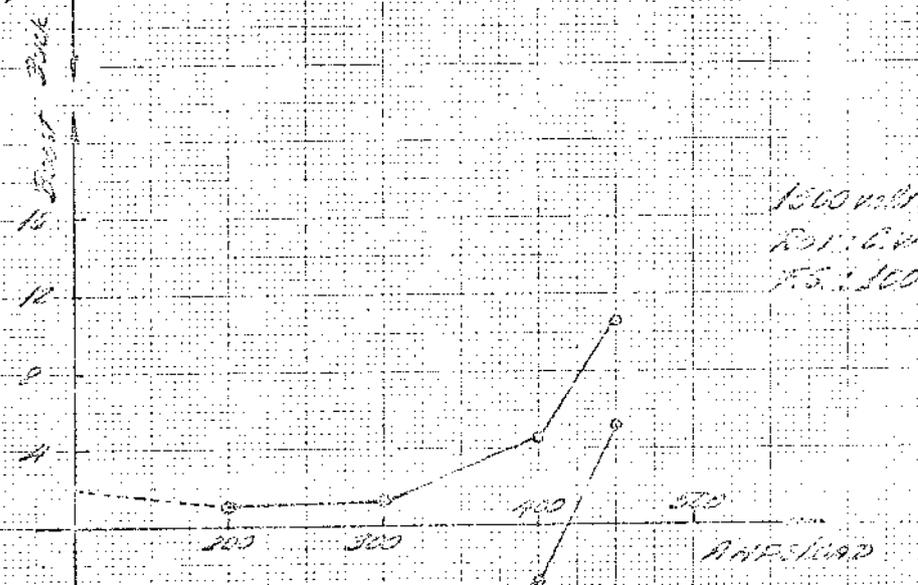
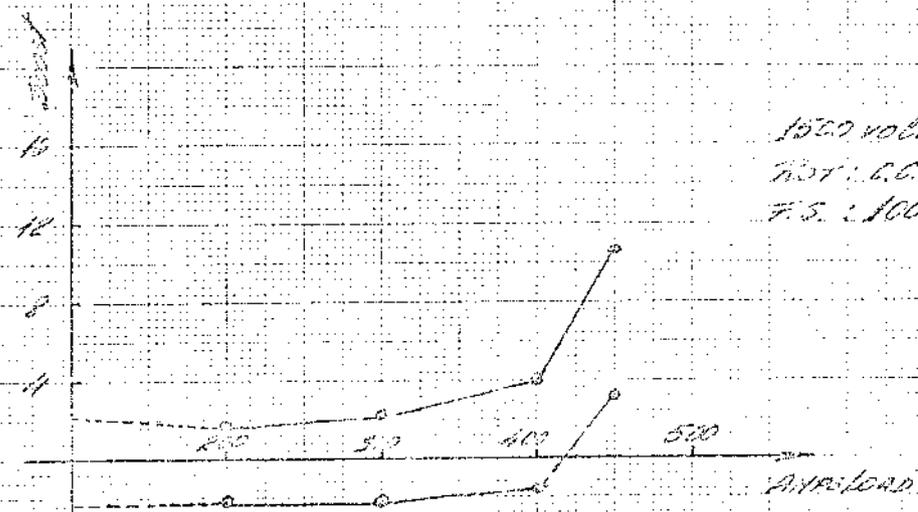
29/10/67
F. F. Corina

N. 734 - 15 21000
Circuit 10-12
CASPOs ALD. TURNS : 6145"



24/10/63
V. L. ...

110 V - 100 WATT
CONTINUED
 CALCS N. P. FINALS : 0.105"

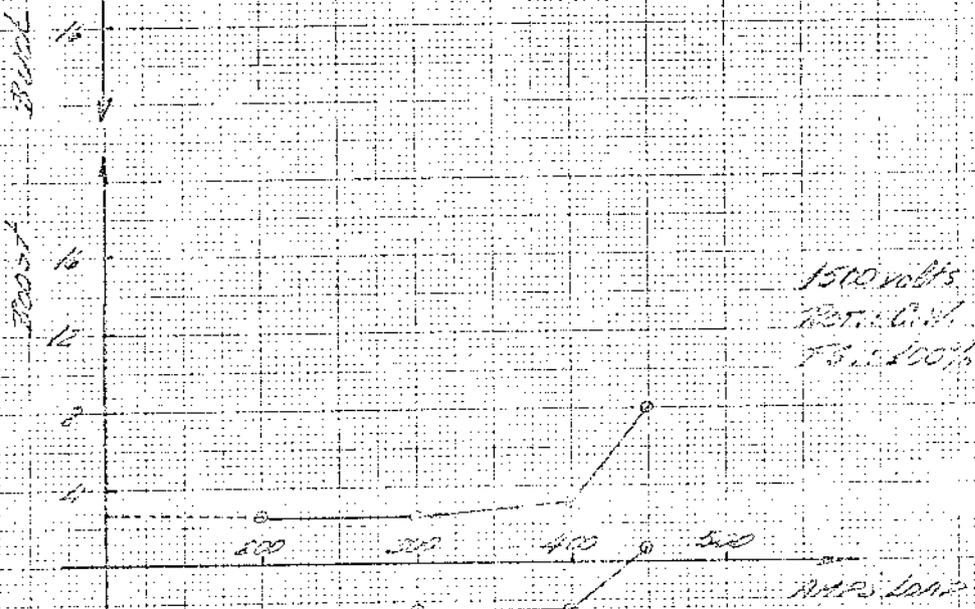
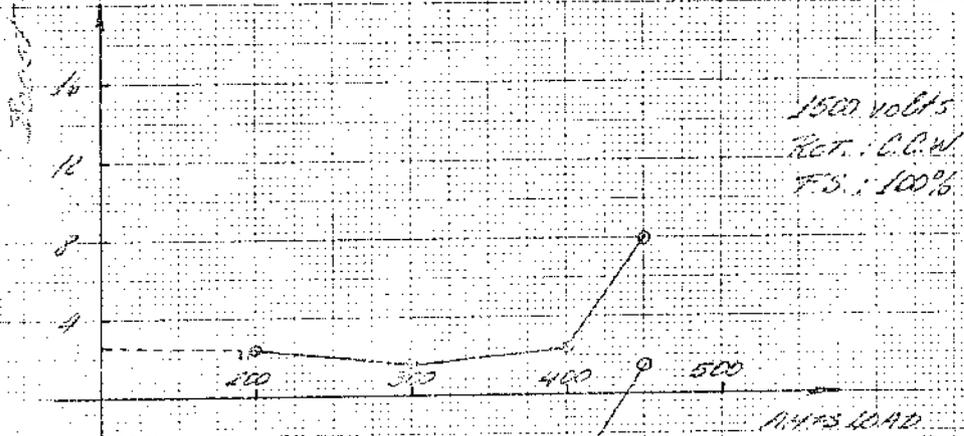


4/14/64
 F. P. ...

H-TR-1-N-210003

CONTRACT NO.

CALGOS N.H. FINALS 1 Q195*

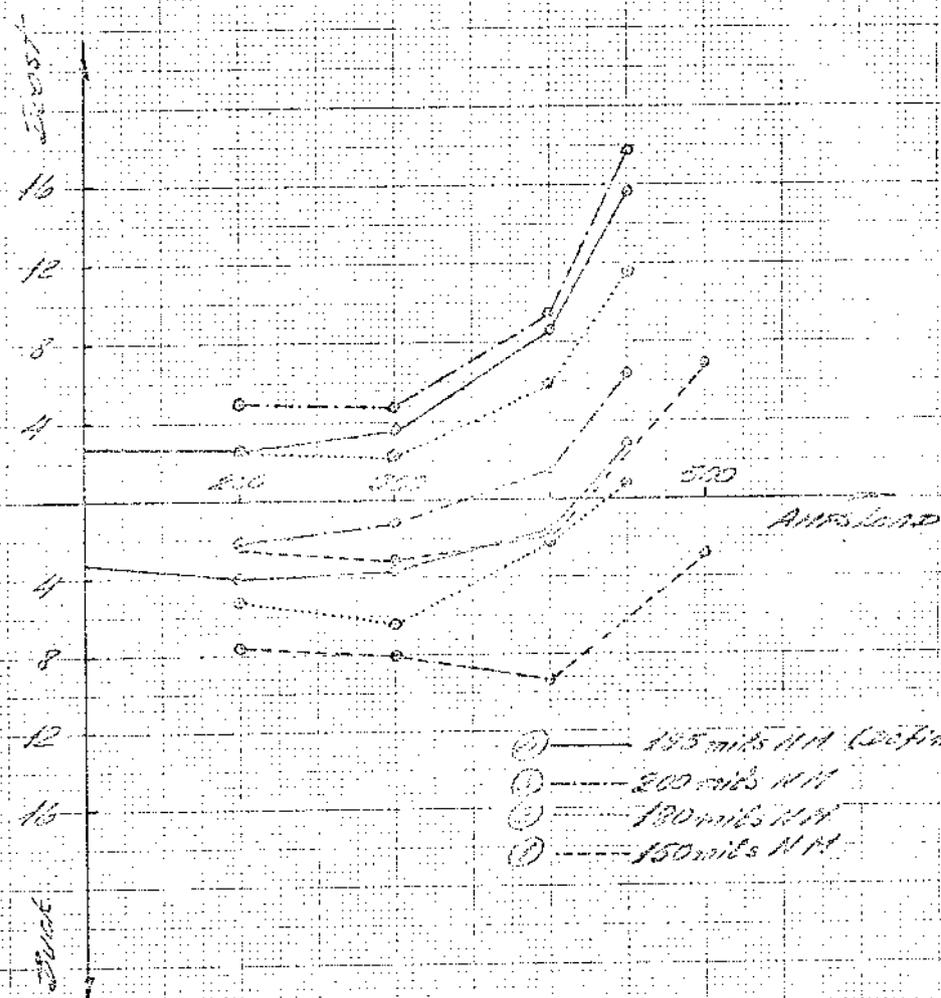


100%
12
8
4

1500 volts
Ret. C.C.W.
F.S. 100%

H. 734 - No 210833/902
COMPUTATIONS

1520 volts.
Rot.: C.G.W.
FS: 100%

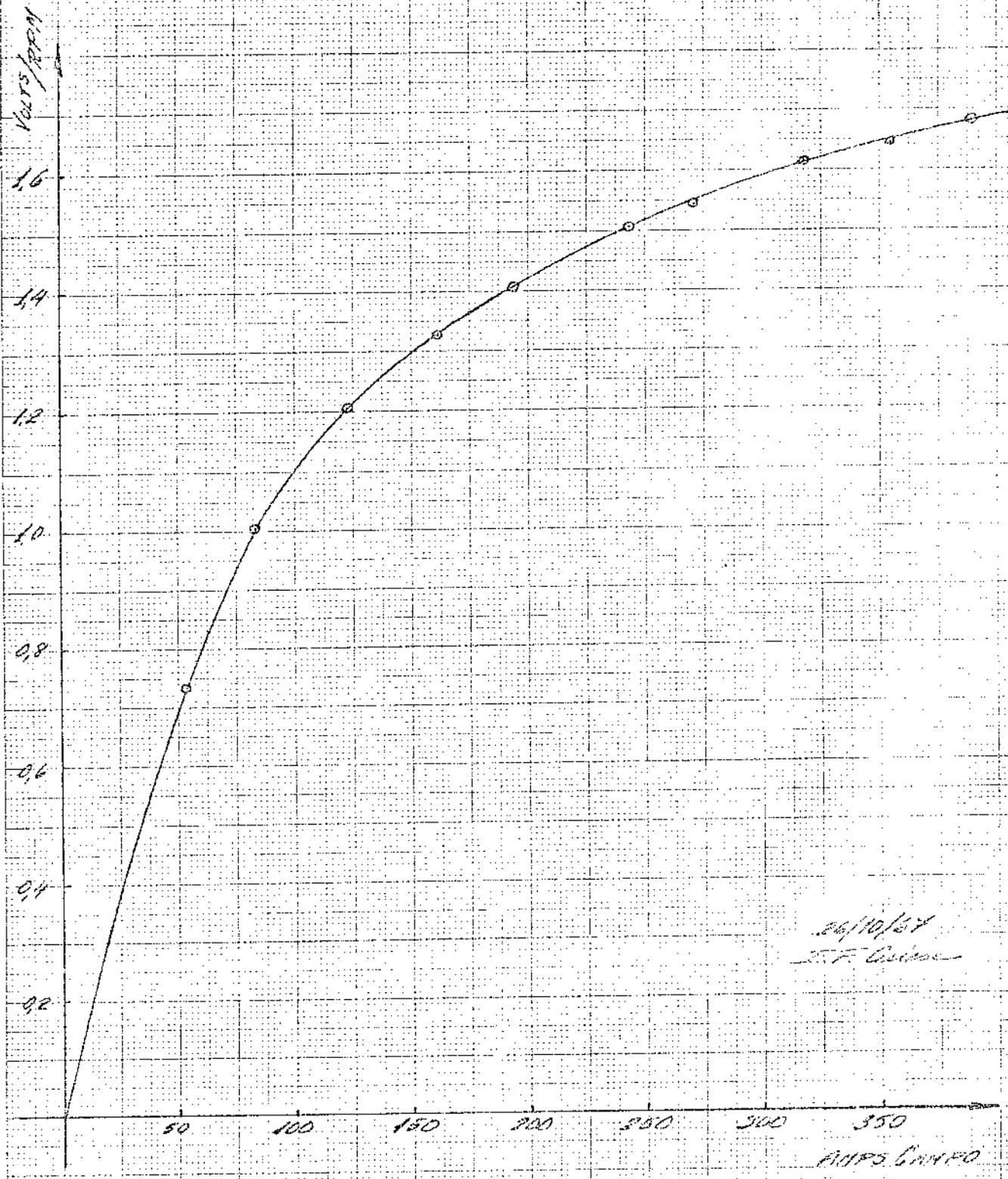


- ① — 195 miles N.M. (Definitive)
- ② — 200 miles N.M.
- ③ — 180 miles N.M.
- ④ — 150 miles N.M.

24/10/67
E.F. Sime

H-734-15,2102,00

SATURACÃO EM VAZIO

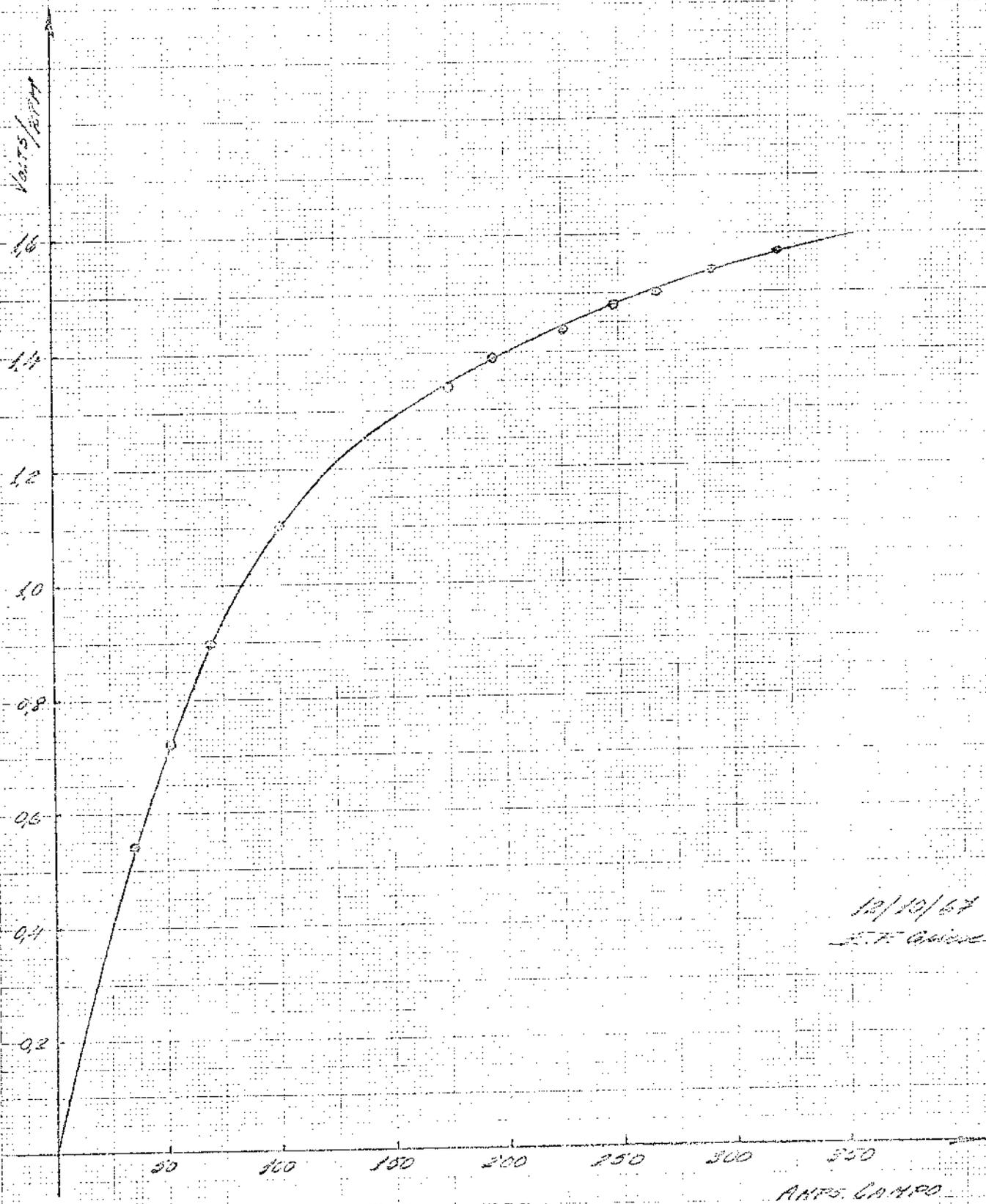


06/10/57
S.F. Gibson

AMPS CAMPO

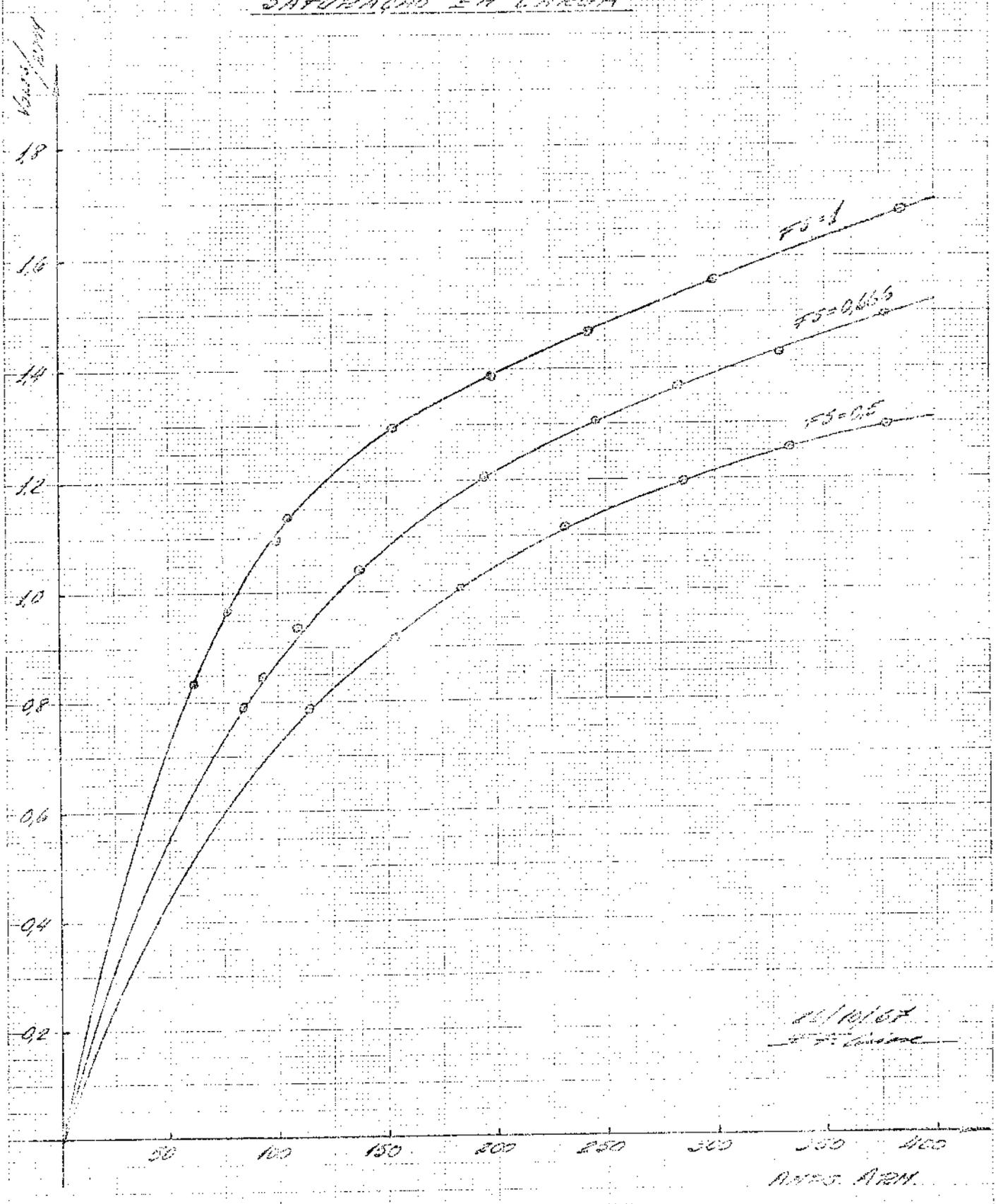
HYD-MECHANICS

SATURATED AN VARIO



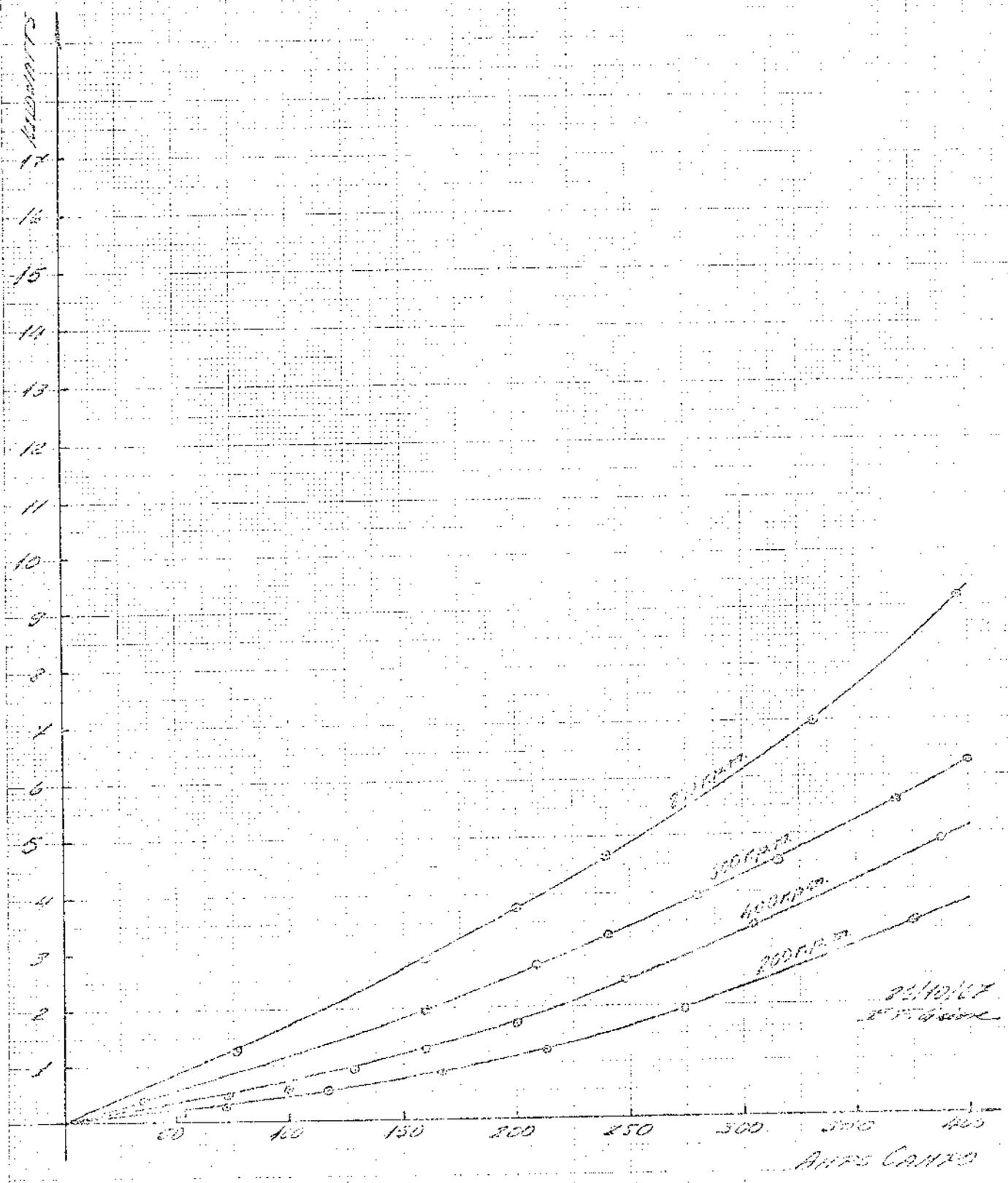
12/19/67
E. F. Gause

11-701-1008
SATURACION EN CARGA



4-2-4-100-100

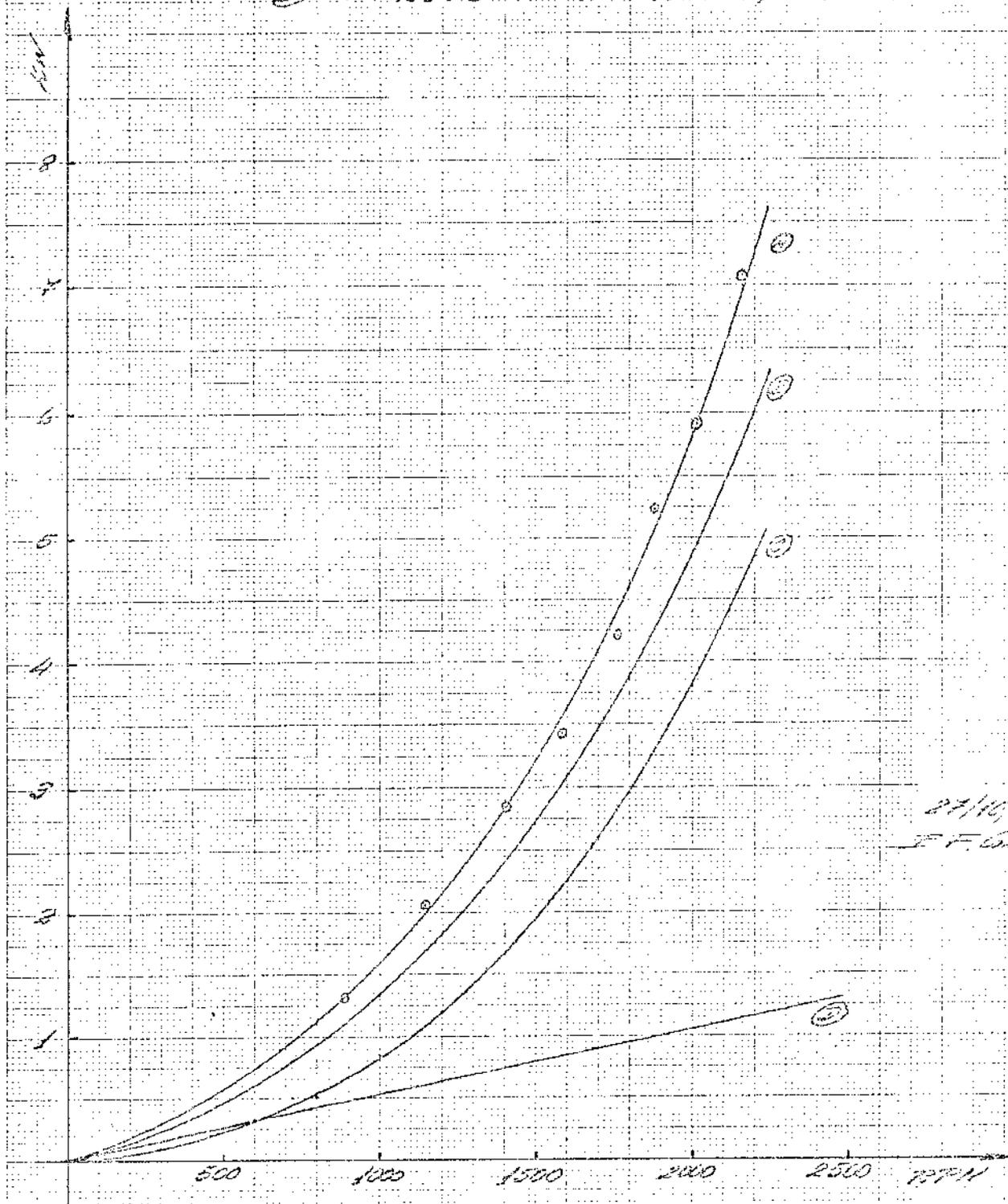
PRESSURE vs. TEMPERATURE



H 424 - 14 - 2000

PERDAS POR ATRITO E VENTILAÇÃO

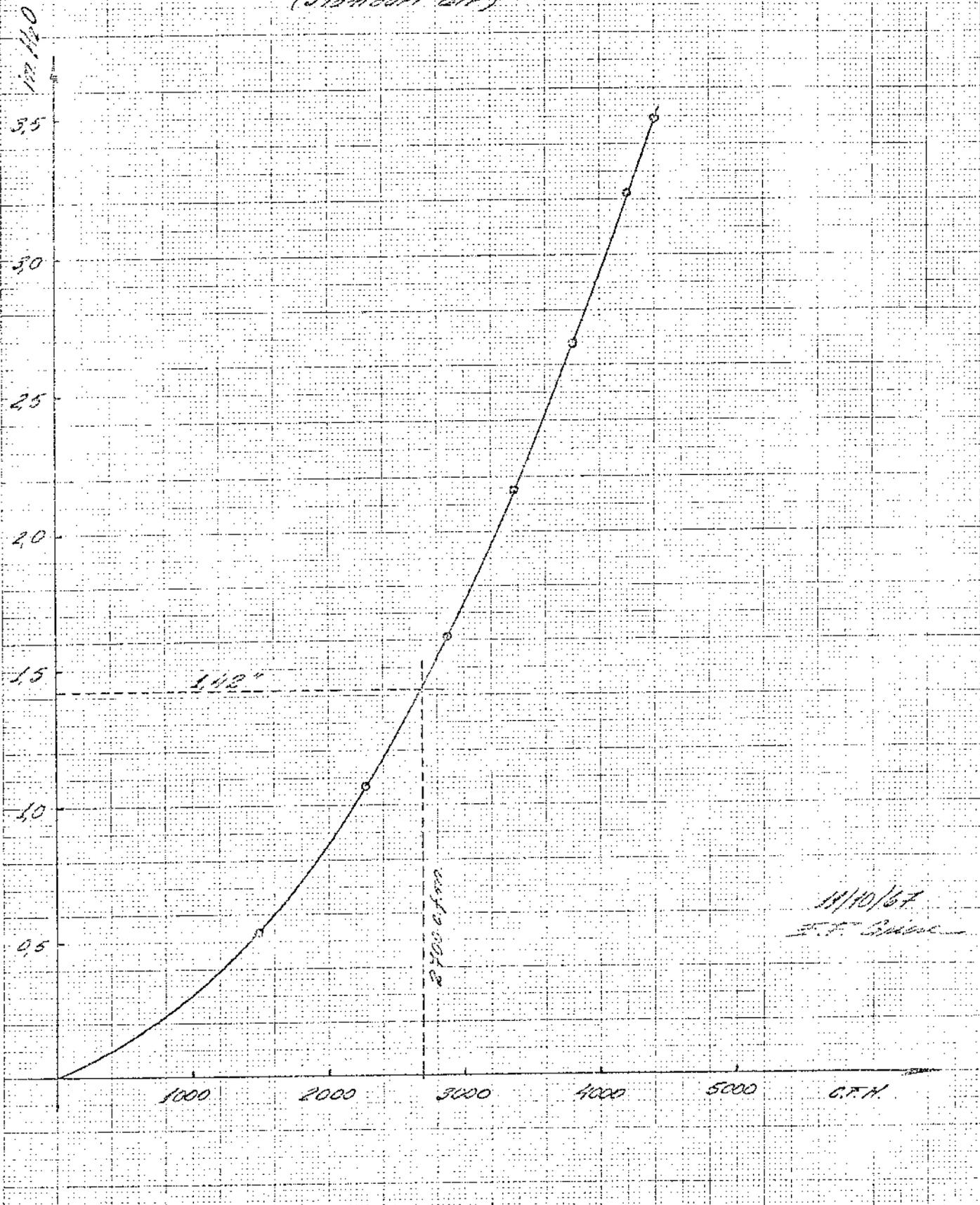
- ⊙ ATRITO + VENTILAÇÃO + FERRO
- ⊙ ATRITO + VENTILAÇÃO
- ⊙ VENTILAÇÃO : $KW = 0,000000820070PM^2$
- ⊙ ATRITO : $KW = 0,000525 \cdot PM^2$



27/10/87
F. F. G. G.

11434-15210000

STATIC PRESSURE COMPUTATOR CHAMBER
* FLOW
(Standard air)

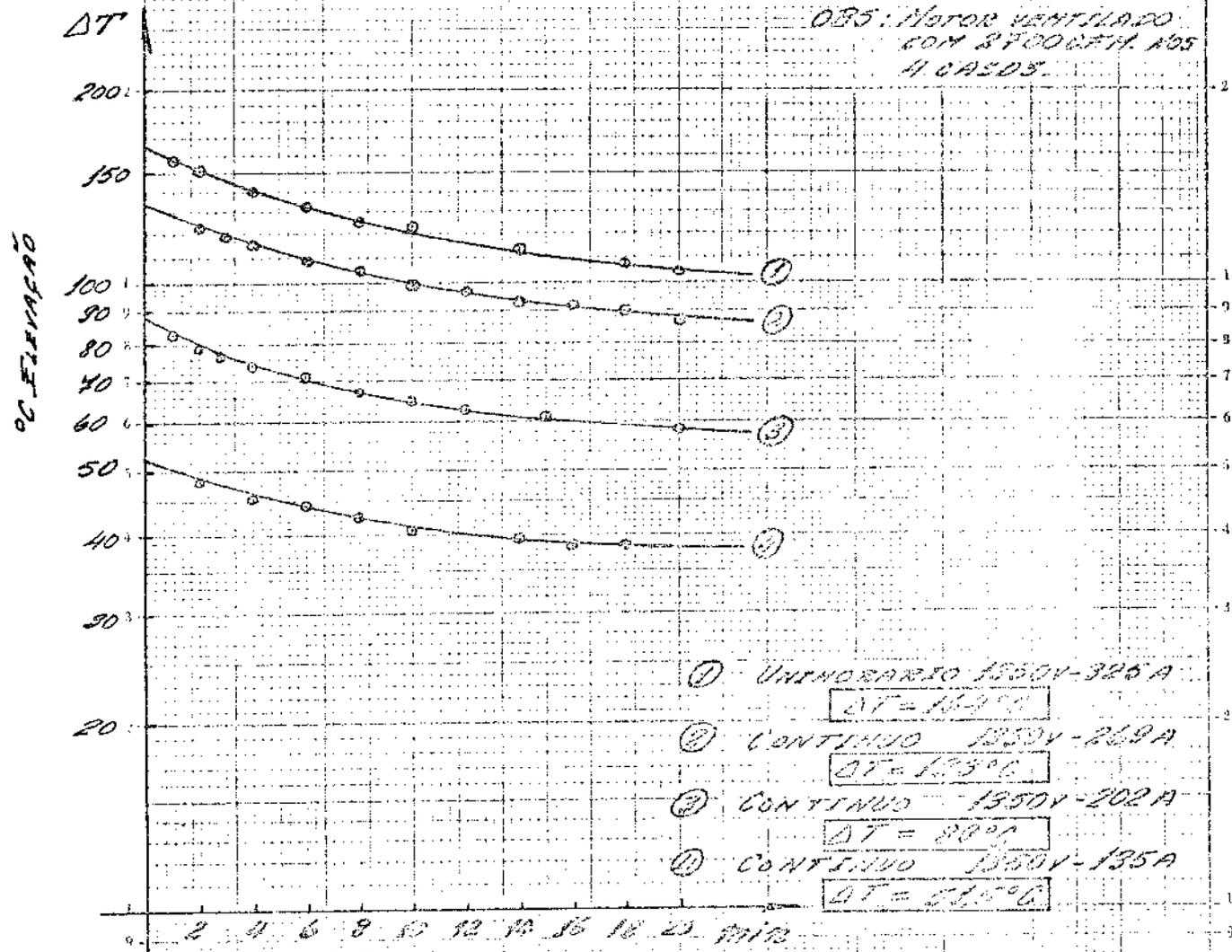


11/10/57
E. F. Bassel

HYPER-NEOLITE
AVUECIMENTO

Ⓐ ARMADURA

035: MOTOR VENTILADO
COM 3 FOLHAS 105
4 CASOS.



- Ⓛ UNIFORME 1550V-325A
ΔT = 152,5°C
- Ⓜ CONTINUA 1550V-269A
ΔT = 125°C
- Ⓨ CONTINUA 1550V-202A
ΔT = 88°C
- Ⓩ CONTINUA 1550V-135A
ΔT = 52,5°C

Ⓑ CAMPOS SÉRIE E COMUTAÇÃO

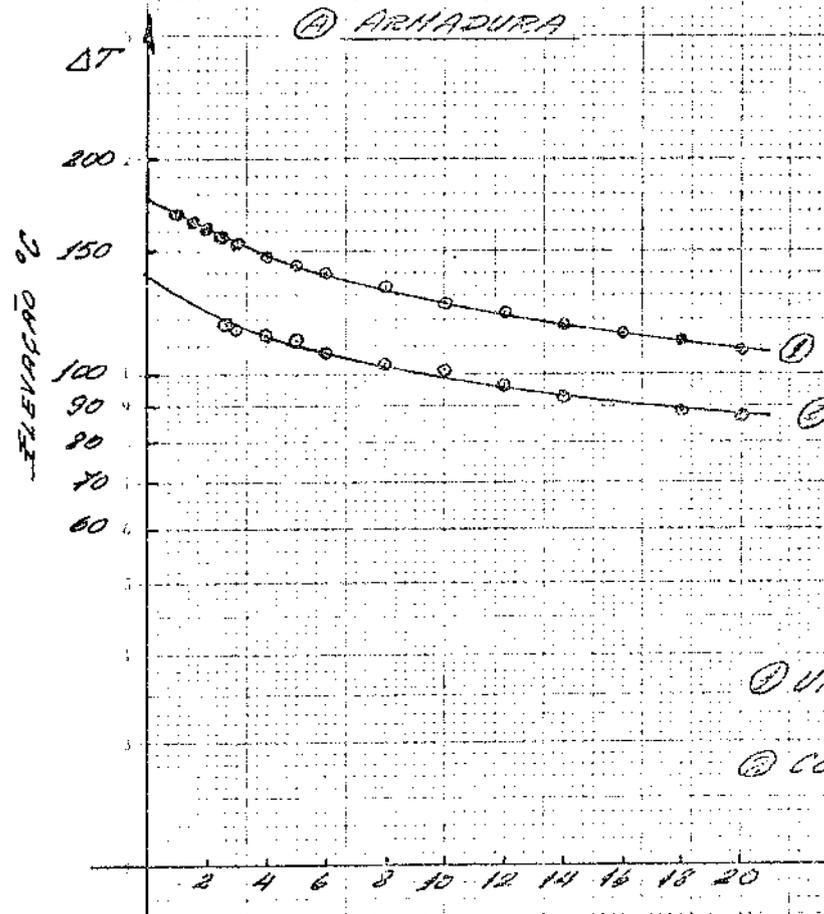
	RATING	ΔT Caso S003	ΔT Caso F011
Ⓛ	1550V-325A Uniforme	92,5°C	151,9°C
Ⓜ	1550V-269A Contínua	48,4°C	142,4°C
Ⓨ	1550V-202A Contínua	61,2°C	82,5°C
Ⓩ	1550V-135A Contínua	52,0°C	44,9°C

13/10/57
S.F. G... ..

MTA - N° 210808
ARQUEAMENTO

Ⓐ ARMADURA

OB5: MOTOR VENTILADO
COM 2700 CFM NOS
2 CASOS.



- ① UNHORARIO 1500V - 320A
 $\Delta T = 147^{\circ}\text{C}$
- ② CONTINUO 1500V - 264A
 $\Delta T = 139^{\circ}\text{C}$

2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

MITZ.

Ⓑ CAMPOS SERIE E COMUTAÇÃO

	RATING	ΔT Cto. Conv.	ΔT Cto. Exit.
①	1500V-320A Unhorario	95,5°C	154,1°C
②	1500V-264A Contínuo	101,4°C	148,1°C

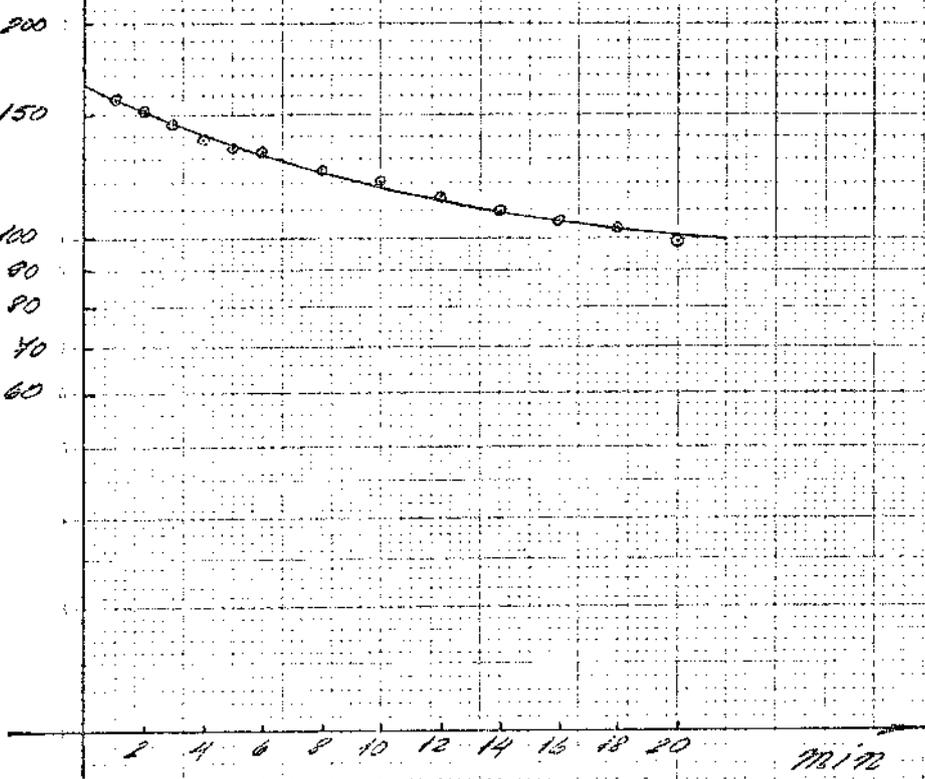
15/10/67
E. F. Galvão

M 724-N5210898
BQUE CEMENTO
1500 V - 320 A - 3050 CFM

TEMPERATURA °C

DT
200
150
100
80
70
60

Ⓐ ARMADURA : 164 °C



Ⓑ CAMPO SERIE : DT = 145,6 °C

Ⓒ CAMPO CONUT. : DT = 35,3 °C

17/10/68
S.F. [Signature]

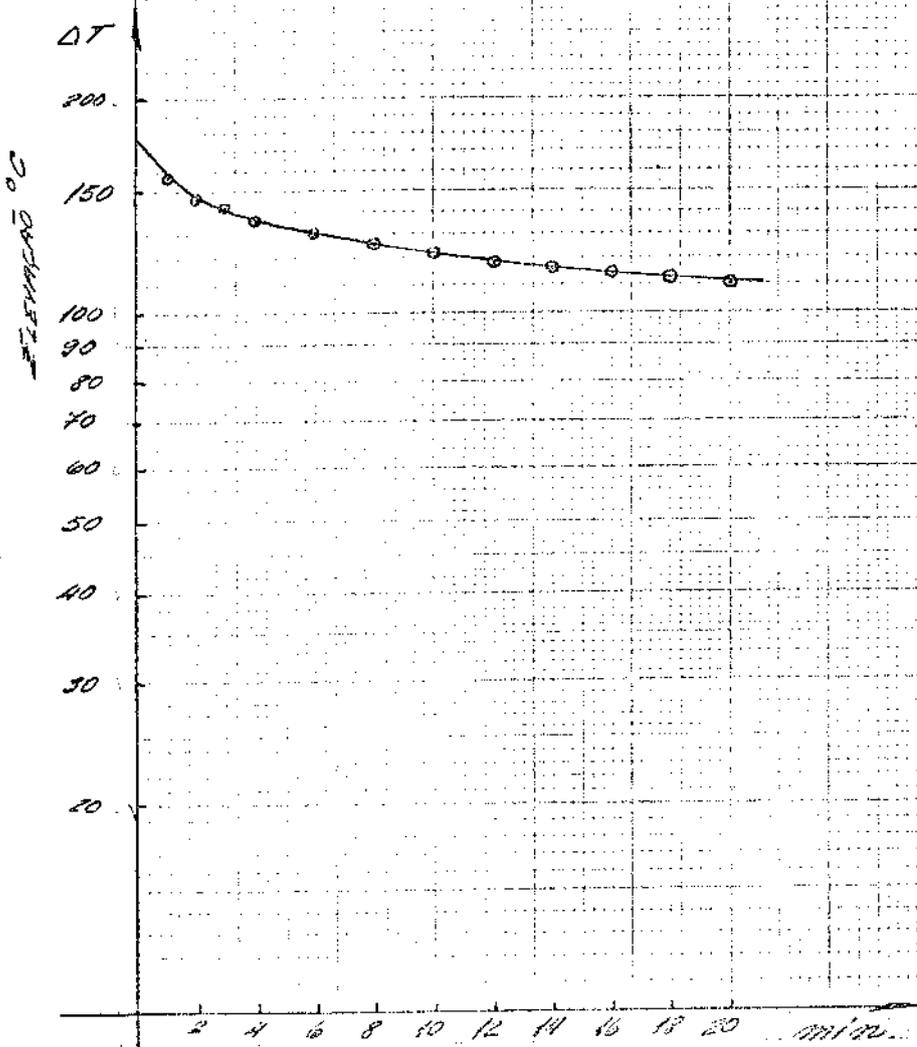
TF-134-015

N 739 - 15810 902

ACUQUINENTE

1 HORA - 1500V - 320A - 2400cfm.

② ARMADURA : 176°C



③ CAMPO SÉRIE : 150,6°C

④ CAMPO COMUT : 103,8°C

6/11/64
E. F. B. [Signature]

TF-134-016

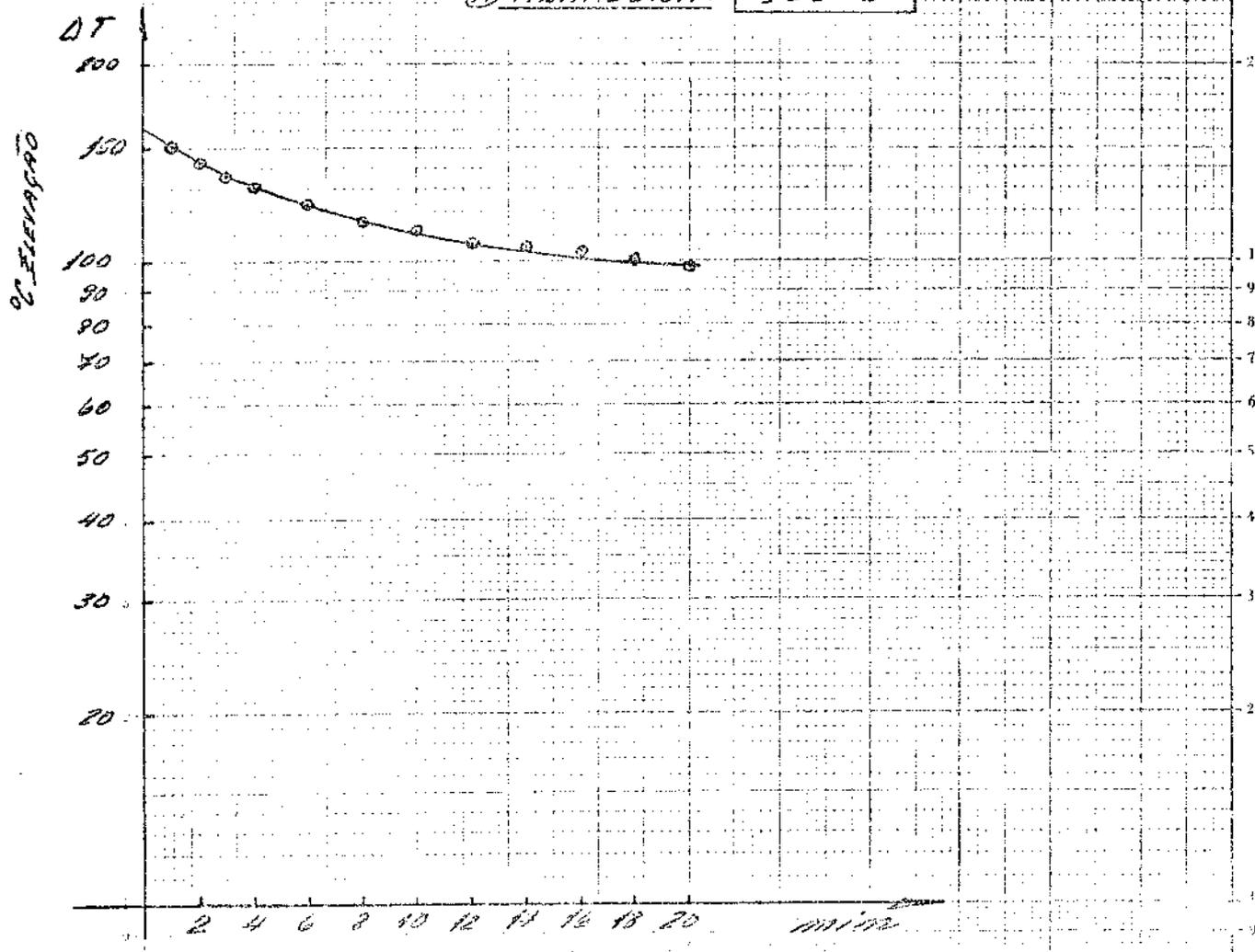
M 134 - N5210302

ARQUECIMENTO

1500V - 100A - 1500 c/min

60 min

ARMADURA: 165°C



CAMPO SÉRIE: 124,8°C

CAMPO COMUT: 81,7°C

6/11/67
E. F. GIBSON

10-106

11-734

REQUIREMENTS OF DESIGN
FOR AIR-CONDITIONING
IN THE REGION OF THE

(2700 c.f.m.)

DT
°C

200

150

100

50

110°

6.000
5.800

1.000
1.000

8/11/57
F.F. [unclear]

100

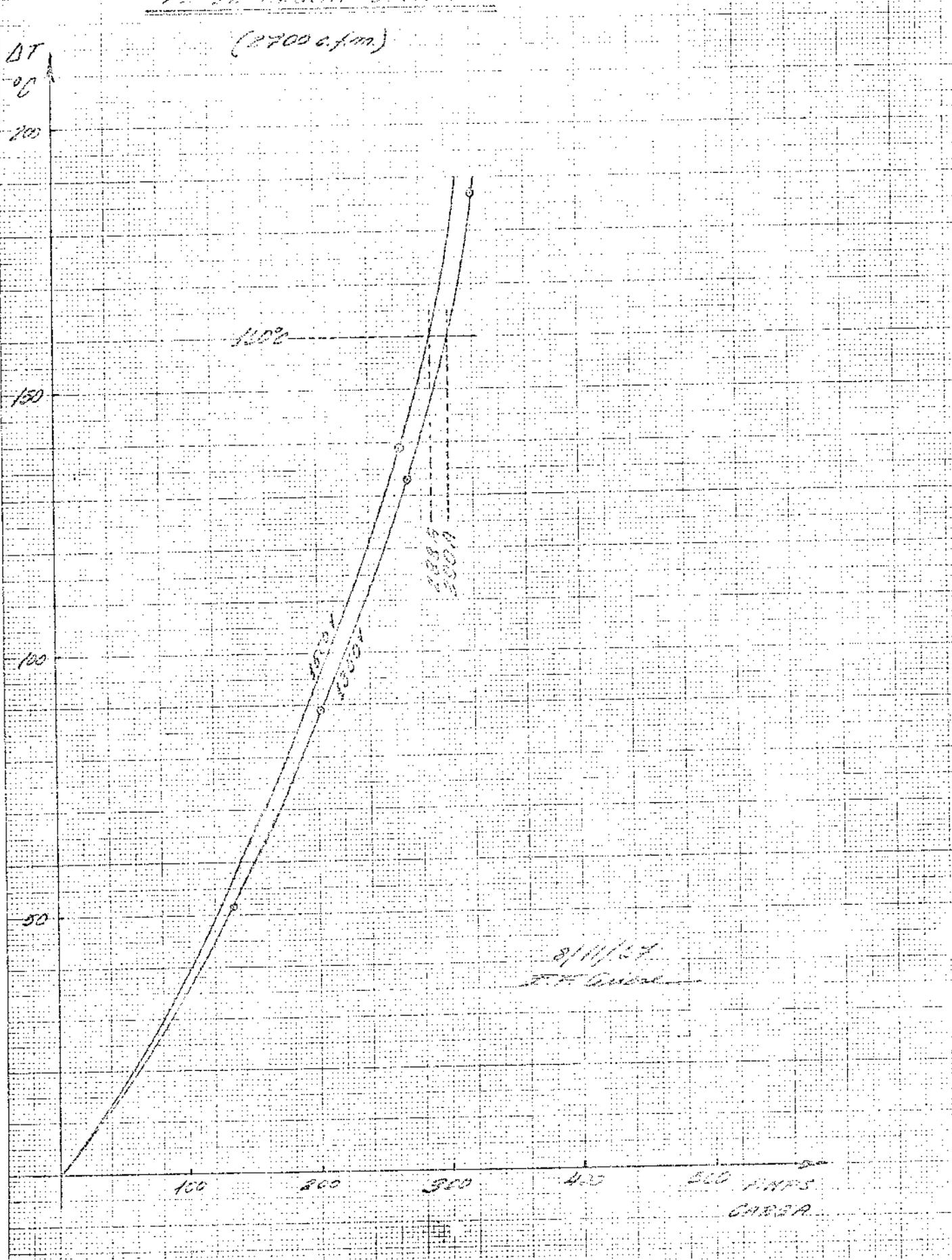
200

300

400

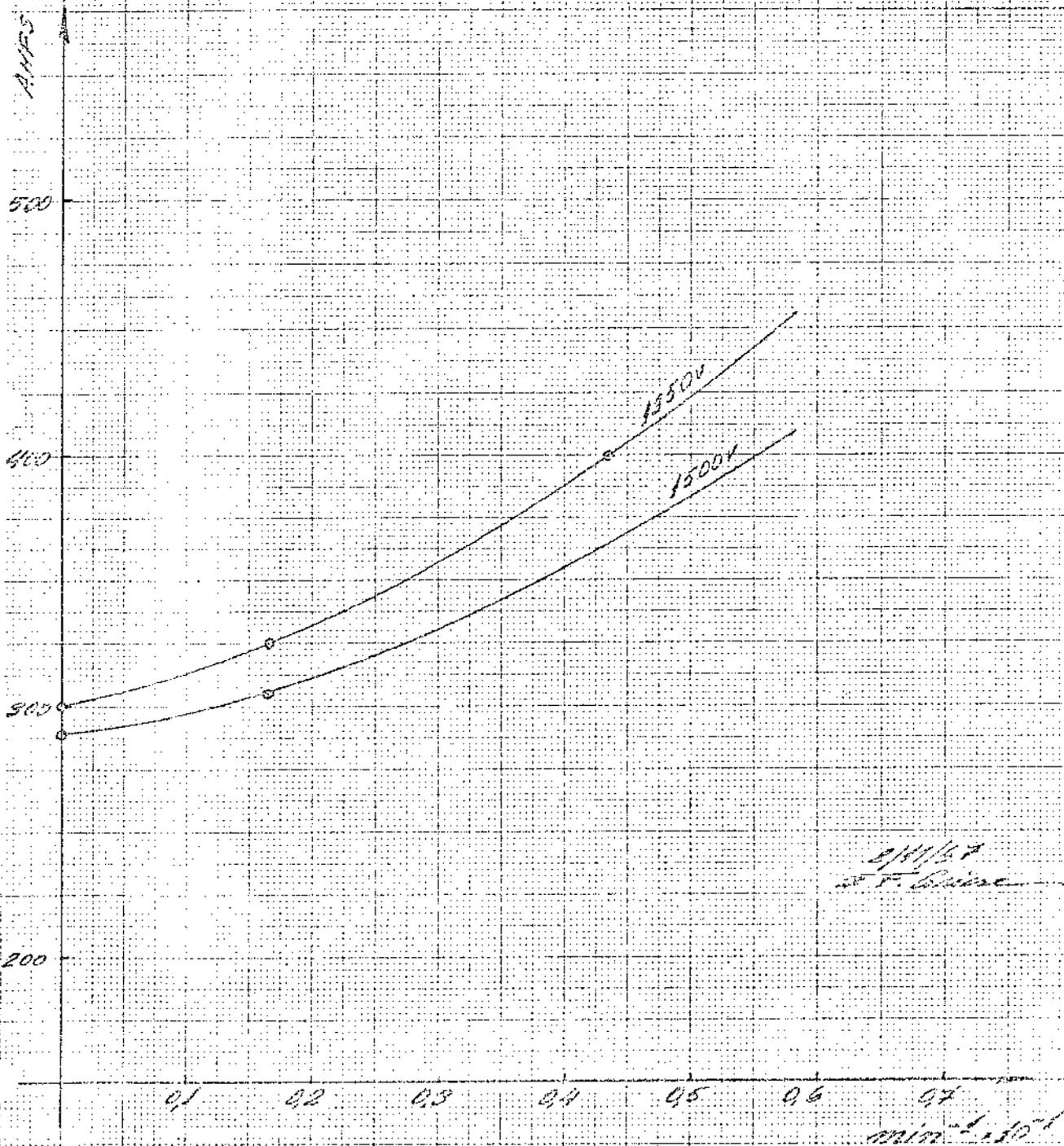
500 WATTS

CHINA



M-734

CORRENTE DE ARMADURA
PERMISSIVEL FUNÇÃO DE TEMPO
PARTINDO-SE COM MAQUINA FRIA
VENTILADA COM 2300 c.f.m PARA
ATINGIR ELEVAÇÃO DE 110°C SEMPRE
ALTERNATE



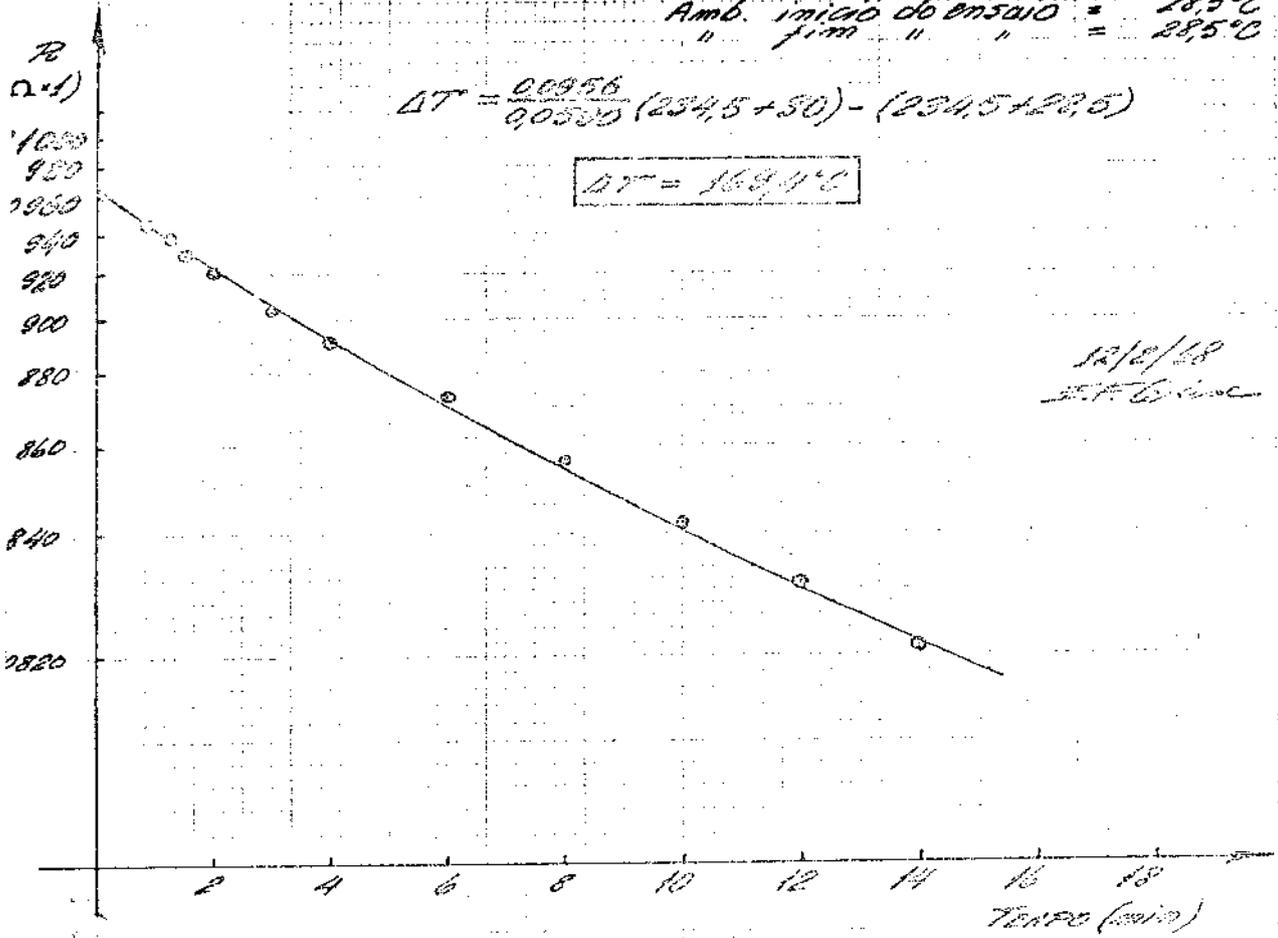
11-524 - 40210214
ADJUNTO
 1350 volts - 400 Amps - 3/20 c.f.m.

$T = 83 \text{ mils } \pm 0,001$

A) ARMADURA: $R_0 = 0,0965 \Omega$ c/amb. de $28,5^\circ\text{C}$
 $R_F = 0,0590 \Omega$ à $50,0^\circ\text{C}$
 Amb. início do ensaio = $28,5^\circ\text{C}$
 fim " " " = $28,5^\circ\text{C}$

$$\Delta T = \frac{0,0965}{0,0590} (234,5 + 50) - (234,5 + 28,6)$$

$\Delta T = 169,4^\circ\text{C}$



12/2/58
 J.F. G. inc

B) CANPO SÉRIE:

$R_0 = \frac{38,8}{400} = 0,097 \Omega$ c/amb. de $28,5^\circ\text{C}$
 $R_F = 0,060 \Omega$ à $26,0^\circ\text{C}$

$$\Delta T = \frac{0,097}{0,060} (234,5 + 26,0) - (234,5 + 28,5)$$

$\Delta T = 157,9^\circ\text{C}$

C) CANPO LOMUT:

$R_0 = \frac{17,0}{400} = 0,0425 \Omega$ c/amb. de $28,5^\circ\text{C}$
 $R_F = 0,0310 \Omega$ à $25,0^\circ\text{C}$

$$\Delta T = \frac{0,0425}{0,0310} (234,5 + 26,0) - (234,5 + 28,5)$$

$\Delta T = 97,1^\circ\text{C}$

ONDE USAR: INSTRUÇÃO DE ENGENHARIA	TÍTULO: ENSAIOS COMERCIAIS - MOTOR DE TRACÇÃO GE- 734	INSTRUÇÃO DE PROCESSO IP N.º P24B-cb18 PAG. 1 DE 3
--	---	--

O
 DADE
 IS
 ITOS
 O)
 O
 IO
 Y
 RTE
 O
 V
 IE
 IÇÃO
 1
 1
 1
 1
 J)
 na 1

1. Impedância a quente nos circuitos de campo (60 c/s):
- | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|
| | <u>MAX</u> | <u>MIN</u> |
| Campo de excitação : 6 amperes | 65V | 55V |
| Campo de comutação : 12 amperes | 62V | 52V |

Esta impedância deverá ser medida antes da montagem da armadura imediatamente após a montagem a quente das bobinas de campo e polos na carcaça, antes que a temperatura caia demasiadamente.

2. Entreferros.
- | | |
|---------------------------|--------|
| Polos de excitação: | 0.288" |
| Polos de comutação: | 0.300" |

Estes diâmetros deverão ser medidos antes da montagem da armadura e anotados no cartão de identificação para registro posterior na folha de ensaio da máquina.

3. Folgas nos mancais de rolamento :
- | | | |
|---|---------|---------|
| Folga axial da armadura..... | 0.016" | 0.005" |
| Desvio axial da pista externa (lado comut).. | 0.003" | 0.000" |
| Desvio axial da pista externa (lado pinhão).. | 0.005" | 0.000" |
| Folga radial (lado comut.)..... | 0.0075" | 0.0025" |
| Folga radial (lado pinhão)..... | 0.009" | 0.003" |

Medir no motor completamente montado, com os parafusos dos escudos bem apertados, sem as tampas externas dos mancais. A folga radial é medida com um calibre de lâminas. O desvio axial da pista externa é medido fixando um relógio comparador a cada extremidade do eixo e girando a armadura manualmente de maneira que a haste móvel do comparador percorra toda pista externa do mancal. A armadura deve estar então forçada para o lado do comutador de encontro ao encosto do mancal, de maneira a eliminar a folga axial. O mesmo comparador deve ser usado para a medição da folga axial.

Data Rev. Presente: 18-10-65	Data Rev. Anterior: Nova	Revisão: φ Indica alteração		
Proposta: J. Neto	Aprovada - Engenharia: L. W	Aprovada - Contr. Geral:	Aprovada - Engenharia:	Emitida - Engenharia:
Data:	Data:	Data:	Data:	Data:

ONDE USAR: INSTRUÇÃO DE ENGENHARIA	TÍTULO: ENSAIOS COMERCIAIS - MOTOR DE TRACÇÃO GE - 734	INSTRUÇÃO DE PROCESSO: IP N.º P24B-cb 18 PAG. 2 DE 3
--	--	--

/O
 DADE
 AIS
 NTOS
 IO)
 SO

)
 AO

 >
 ORTE

 |
 AO

 2A
 7
 UE

 | |
 2

 INÇÃO
 | 1
 |
 | 1
 | 1
 | 1
 | 1
 | 9
 | 1

	<u>MAX.</u>	<u>MIN.</u>
--	-------------	-------------

4. Resistência a frio (25°C).

Medir e registrar na folha de ensaio de cada motor (ohms)

Armadura.....	0,0744
Campo de excitação.....	0,061
Campo de comutação.....	0,030

5. Ensaio sob carga.

Assentar as escovas e limpar cuidadosamente com ar comprimido. Acoplar duas máquinas e fazer funcionar uma como gerador e outra como motor, com 200 amperes, 1500 volts nos terminais, durante o tempo de uma hora distribuído como abaixo:

- a. 15 min. máq. nº1 motor - rotação horária
- b. 15 min. máq. nº2 motor - rotação anti-horária
- c. 15 min. máq. nº2 motor - rotação horária
- d. 15 min. máq. nº1 motor - rotação anti-horária

Medir e registrar as rotações nos quatro casos acima...

RPM	968	912
-----------	-----	-----

A diferença máxima permissível entre a rotação horária e anti-horária é de 28 RPM.

Observar a comutação.

6. Ensaio de tensão induzida.

Fazer funcionar cada máquina como gerador a 1860 RPM, 1800 V, em vazio, durante 30 minutos.

Medir a potência consumida pela máquina que funciona como motor no início e no fim do período de 30 minutos. Medir as temperaturas dos mancais da carcaça e do ambiente de 10 em 10 minutos.

Observar a comutação.

Depois de uma hora de funcionamento a 1860 RPM, as elevações de temperatura máximas são as seguintes:

Data Rev. Presente 18-10-65	Data Rev. Anterior Nova	Revisão: § Indica alteração		
Preparada J. Neto	Aprovada - Eng. Ind L. W	Aprovada - Contr. Qual	Aprovada - Engenharia	Emenda - Engenharia
Data	Data	Data	Data	Data

ONDE USAR. INSTRUÇÃO DE ENGENHARIA	TÍTULO. ENSAIOS COMERCIAIS-MOTOR DE TRACÇÃO GE - 734	INSTRUÇÃO DE PROCESSO IP N.º P24B-cb 18 PAG. 3 DE 3
--	--	---

70
DADE
MS
NTOS
OI
SO

AO

RTE

AO

A

UE

Carcaça 40 °C
 Mancais 55 °C

7. Ensaio de sobrevelocidade.

Desacoplar as máquinas e fazer funcionar cada uma como motor, em vazio a 2230 RPM durante 2 minutos. Observar qualquer vibração anormal.

8. Ensaio de tensão aplicada.

Aplicar entre todos os enrolamentos e a terra, 8000 V, 60 c/s, durante um minuto.

oooooooooooooooo

IIÇÃO
1
1
1
1
1
9
ind 1

Data Rev. Presente 18-10-65	Data Rev. Anterior Nova	Revisão: Indica alteração		
Preparada J. Neto	Aprovada - Eng. Ind. L. W	Aprovada - Contr. Qual.	Aprovada - Manutenção	Revisão - Encargado
Data	Data	Data	Data	Data

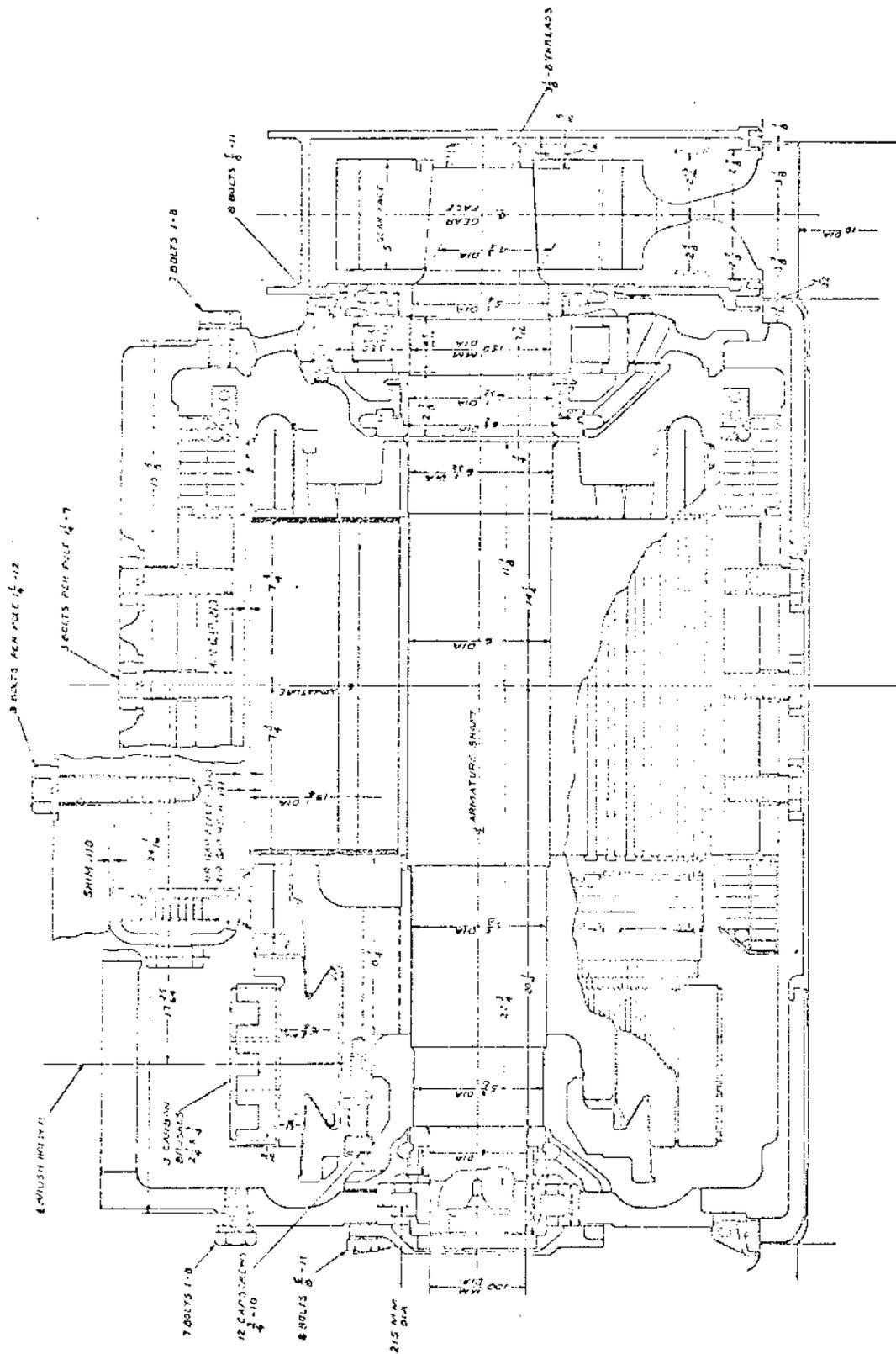


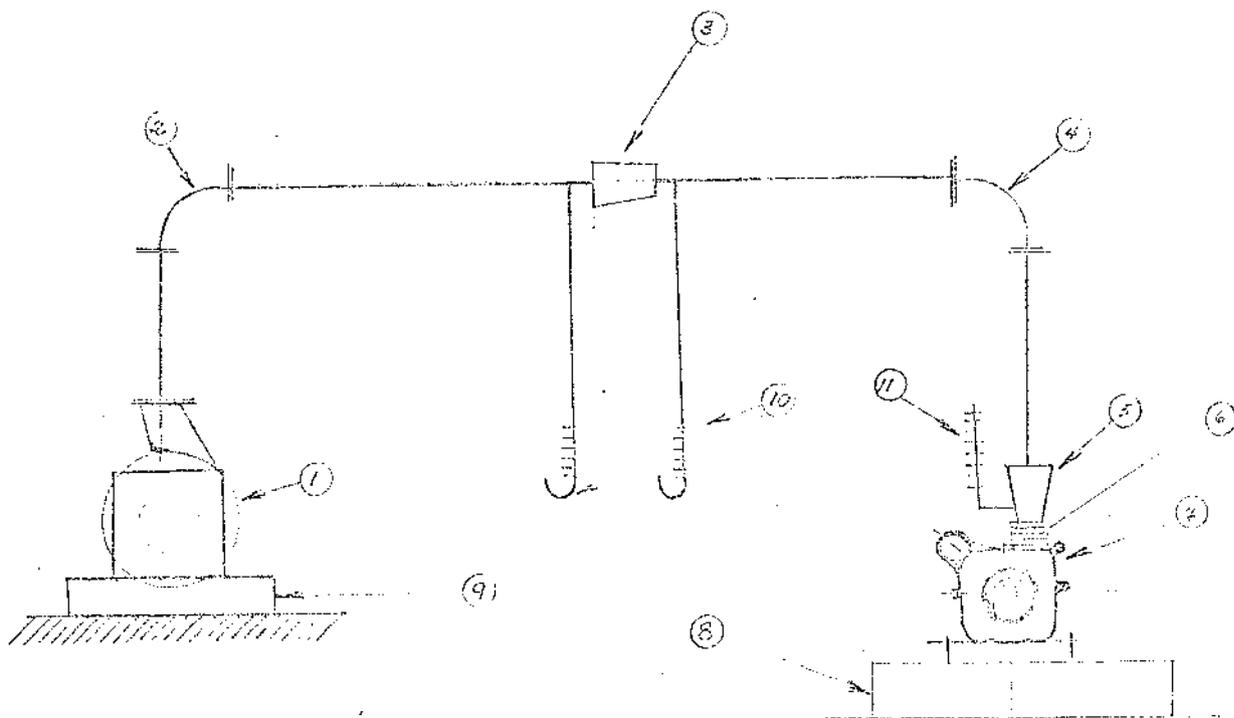
Fig. 2--Longitudinal Section Through A Typical D-C Traction Motor

ESQUEMA PARA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE
VENTILAÇÃO PARA SIMULAÇÃO DAS
CONDIÇÕES DA LOCOMOTIVA

MOTOR GE-734 A2

LOCOMOTIVAS ELÉTRICAS - 2.200 HP 72T BB

ESTRADA DE FERRO SOROCABANA



1. Motor de corrente contínua - rotação variável e perfeitamente controlada acoplado com ventilador centrífugo de volume.
2. Curva de 90 graus com baixa perda de carga.
3. Redutor de secção com orifício padrão tipo vertedouro para determinação de vazão através da queda de pressão dada pela diferença das colunas de água 10 - norma ASME.
4. Curva de 90 graus com baixa perda de carga.
5. Redutor de secção para acoplamento com a câmara de comutação do motor GE-734-A2.
6. Fole ou bota de borracha igual a usada na locomotiva.
7. Dois motores de tração acoplados mecanicamente um funcionando como gerador outro como motor - circuito. Fig. (13)

8. Base
9. Base
10. Colunas de água para verificação da queda de pressão e determinação de vazão de ar.
11. Coluna de água para verificação da pressão do ar de entrada na câmara de comutação do motor de tração.