

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO
E DO DESEMPENHO ELÉTRICO DE MOTORES
DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA

Autor: EDWIN AVOLIO ^{R3}

Orientador: PROF. DR. ERNESTO RUPPERT FILHO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica da Universidade Estadual de
Campinas, UNICAMP, como parte dos
requisitos exigidos para a obtenção do
título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

MARÇO - 1992

Este exemplar corresponde à redação final da tese
defendida por Edwin Avolio

..... e aprovada pela Comissão
Julgadora em 17 03 1992.


Orientador

UNICAMP

Dedico este trabalho à minha
família, em especial a
Lurdinha, Lígia e Mariana.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho, pela orientação, confiança e dedicação;

Aos amigos Profs. Gilio Aluisio Simone e Pedro da Costa Jr., pelas contribuições ao desenvolvimento deste trabalho;

Ao amigo Prof. Rudolf Ribeiro Riehl, pelo desenvolvimento do sistema de medição utilizado;

Ao amigo Milton de Freitas, pela dedicação e capacidade na montagem do sistema experimental;

Ao Departamento de Engenharia e Tecnologia Elétrica da Faculdade de Engenharia e Tecnologia - UNESP/BAURU, pelo afastamento integral durante o ano de 1991;

A KOHLBACH S/A, pelos dados e pelos motores fornecidos;

À minha família, pela paciência e compreensão;

RESUMO

Apresenta-se um modelo matemático térmico e elétrico para um motor de indução com rotor em gaiola o qual permite especificar sob condições térmicas e elétricas, baseado somente em dados de catálogos e informações técnicas de fabricantes, o melhor motor a um acionamento.

Considera-se as variações dos parâmetros do rotor devido ao Efeito Pelicular e as variações das resistências dos enrolamentos do estator e do rotor com a temperatura.

A precisão do modelo é comprovada experimentalmente.

Obtém-se o comportamento térmico e o desempenho elétrico de alguns motores para regimes de funcionamento contínuo e intermitente com alimentação senoidal e não senoidal.

ABSTRACT

A thermal-electric mathematical model for a squirrel cage induction motors which permits to specify the best motor for specific drive, under thermal and electric aspects based, only on manufacturer technical bulletins and technical information is presented.

Changes of rotor parameters due Skin Effect and changes of winding resistances (both stator and rotor) with the temperature are considered.

The accuracy of this model is appraised using experimental results.

The thermal behavior and electric performance for some motors are obtained for continuous and intermittent duties with sinusoidal and nonsinusoidal voltages.

ÍNDICE

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM ROTOR EM GAIOLA	
II.1 - Introdução	4
II.2 - Variação dos parâmetros do rotor devido ao Efeito Pelicular	6
II.3 - Correção das resistências dos enrolamentos do estator e do rotor com a temperatura	9
II.4 - Determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor	10
CAPÍTULO III - MODELO TÉRMICO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM ROTOR EM GAIOLA	
III.1 - Introdução	22
III.2 - Modelo térmico	24
III.3 - Cálculo das capacidades térmicas	32
III.4 - Cálculo das condutâncias do circuito térmico do estator	34
III.4.1 - Condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o enrolamento e o núcleo do estator	34

III.4.2 - Condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o núcleo do estator e meio ambiente	37
III.5 - Cálculo das condutâncias do circuito térmico do rotor	38
III.5.1 - Condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o enrolamento e o núcleo do rotor	39
III.5.2 - Condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o núcleo do rotor e o meio ambiente	41
III.6 - Influência da ventilação do motor sobre os valores das condutâncias entre o núcleo do estator e o meio ambiente e o núcleo do rotor e o meio ambiente	43

CAPÍTULO IV - MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DO
COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO DESEMPENHO ELÉTRICO
DE UM MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA

IV.1 - Introdução	45
IV.2 - Resolução do sistema de equações diferenciais que constitui o modelo térmico do motor	45
IV.3 - Determinação das grandezas elétricas e mecânicas de um motor de indução com alimentação senoidal	49
IV.3.1 - Determinação do escorregamento em função do tempo para os regimes transitórios	49

IV.3.2 - Determinação do escorregamento em regime permanente	51
IV.3.3 - Determinação das potências dissipadas no circuito elétrico equivalente	53
IV.3.4 - Determinação das grandezas elétricas e mecânicas do motor	54
IV.4 - Determinação das grandezas elétricas e mecânicas do motor com alimentação não senoidal	55
IV.5 - Diagrama de blocos simplificado do programa de computador para simulação do comportamento térmico e do desempenho elétrico do motor de indução	62
IV.6 - Apresentação das subrotinas utilizadas no programa	64
IV.6.1 - Subrotina Le_Dados	64
IV.6.2 - Subrotina Det_Parametros	65
IV.6.3 - Subrotina Reg_Funcionamento	66
IV.6.4 - Subrotina Tipo_Alimentacao	66
IV.6.5 - Subrotina Partida	67
IV.6.6 - Subrotina Res_Circ_Equiv	68
IV.6.7 - Subrotina Det_Temperatura	68
IV.6.8 - Subrotina Det_Escorregamento	69
IV.6.9 - Subrotina Frenacao	69

CAPÍTULO V - VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO TÉRMICO E ELÉTRICO DO MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA ATRAVÉS DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

V.1 - Introdução	70
------------------------	----

V.2 - Sistema experimental	70
V.3 - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos nas simulações do motor de indução com alimentação senoidal	75
V.4 - Comparação dos resultados experimentais com os obtidos nas simulações do motor de indução com alimentação não senoidal	81
V.5 - Análise dos resultados	91
V.6 - Necessidade de considerar o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros do motor com as temperaturas	92

CAPÍTULO VI - SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO DESEMPENHO ELÉTRICO DE MOTORES DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA

VI.1 - Introdução	94
VI.2 - Resultados das simulações para um motor de 10 CV com alimentação senoidal	97
VI.3 - Comparações dos resultados obtidos nas simulações com os fornecidos pelo fabricante - motor de 10 CV	120
VI.4 - Resultados das simulações para um motor de 10 CV com alimentação não senoidal	121
VI.5 - Resultados das simulações para um motor de 50 CV com alimentação senoidal	125
VI.6 - Comparações dos resultados obtidos nas simulações com os fornecidos pelo fabricante - motor 50 CV	150

VI.7 - Resultados das simulações para um motor de 50 CV com alimentação não senoidal	151
VI.8 - Comentários	155
 CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS	156
 APÊNDICE A - LISTAGEM DAS PRINCIPAIS SUBROTINAS UTILIZADAS NO PROGRAMA	
A.1 - Procedure DET_PARAMETROS	158
A.2 - Procedure RES_CIRC_EQUIV	160
A.3 - Procedure DET_TEMPERATURA	161
A.4 - Procedure PARTIDA	162
A.5 - Procedure FRENAÇÃO	163
A.6 - Procedure DET_ESCORREGAMENTO	164
A.7 - Procedure REGIME_S1	165
 APÊNDICE B - DADOS E PARÂMETROS UTILIZADOS	
B.1 - Introdução	166
B.2 - Dados e parâmetros do motor de 3 CV	166
B.2.1 - Parâmetros calculados do circuito elétrico equivalente	168
B.2.2 - Parâmetros calculados do circuito térmico	169
B.3 - Dados e parâmetros do motor de 10 CV	170
B.3.1 - Parâmetros calculados do circuito elétrico equivalente	171
B.3.2 - Parâmetros calculados do circuito térmico	172
B.4 - Dados e parâmetros do motor de 50 CV	173

B.4.1 - Parâmetros calculados do circuito elétrico equivalente	174
B.4.2 - Parâmetros calculados do circuito térmico	175
B.5 - Dados do conversor	176
BIBLIOGRAFIA	177

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Um dos serviços de engenharia mais nobres e difíceis de serem realizados é o de especificar adequada e corretamente os equipamentos a serem utilizados dentro de um dado projeto.

Para a execução desta tarefa, o engenheiro deve adequar os requisitos do projeto e da operação do sistema às características e limitações dos equipamentos. Nesta tarefa, ele conta com catálogos e informações técnicas dos fabricantes e normas técnicas.

Muitas vezes, devido à falta de experiência no problema específico, além das diversas consultas e discussões técnicas com os fabricantes, torna-se necessário observar instalações semelhantes tornando o tempo de execução do serviço muito grande.

Seria interessante que se dispusesse de modelos de sistemas que permitissem a especificação de equipamentos baseado em dados de catálogos e informações técnicas de fabricantes e de normas técnicas. Com isso o trabalho de especificar equipamentos ficaria desvinculado de contatos frequentes e necessários com os mesmos.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático térmico e elétrico para um motor de indução de rotor em gaiola que permita ao profissional, a partir de dados de seu acionamento e de dados de catálogos e informações técnicas de fabricantes, especificar o melhor motor para o seu sistema.

Esse modelo deve ser simples, de solução matemática rapidamente obtida em computador e confiável, ou seja, preciso em relação ao comportamento real do motor.

Para um dado acionamento, além dos requisitos mecânicos e elétricos que o motor deve satisfazer, ele deve satisfazer também a requisitos térmicos. Dessa forma o modelo que se apresenta permite obter, além das grandezas elétricas e mecânicas, temperaturas em algumas partes principais da máquina.

Os valores obtidos devem ser comparados com os requeridos pelo acionamento em projeto ou com os especificados em normas técnicas.

Para o desenvolvimento do modelo matemático térmico e elétrico do motor de indução com rotor em gaiola, foram consideradas as influências do Efeito Pelicular, que se apresenta nas barras do rotor, sobre os seus parâmetros, bem como a influência da temperatura sobre a resistência elétrica dos enrolamentos.

Trabalhos recentes, por exemplo [5], têm mostrado que há uma preocupação geral com este problema. Entretanto, os modelos até aqui apresentados, exceto os apresentados em [1] e [3], exigem dados de projeto das máquinas.

Para obter dados de projeto do fabricante de uma máquina elétrica do fabricante é necessário definir antes de tudo sobre qual máquina se quer os dados e, nem sempre esses dados estão disponíveis antes da compra do equipamento. Isso faz com que modelos do tipo apresentado em [5] sejam difíceis de serem utilizados.

Os primeiros trabalhos apresentados com esta mesma proposta foram [1] e [3]. As diferenças fundamentais entre aqueles

trabalhos e este são as seguintes : 1) A resistência do enrolamento do estator não é calculada com dados de catálogos como em [1] mas fornecida pelo fabricante. A razão disto é que o equacionamento utilizado em [1] para determinar a resistência do enrolamento do estator, é válida somente para motores grandes, 2) os parâmetros do circuito térmico são calculados de maneira diferente em cada trabalho. Em [1] e [3] certas hipóteses simplificadoras são feitas, neste trabalho considera-se diferenças limites de temperatura estabelecidas na literatura (normas e publicações), 3) o modelo apresentado é comprovado experimentalmente tanto para alimentação senoidal como para alimentação não senoidal (inversor), 4) o modelo é aplicado para quase todos os regimes de funcionamento definidos em [4] , 5) o modelo é aplicado para alimentação senoidal e não senoidal, 6) os resultados obtidos através do modelo são comparados com os resultados de ensaios fornecidos pelo fabricante.

No capítulo II apresenta-se uma formulação para calcular os parâmetros do circuito elétrico equivalente considerando as necessárias correções nos parâmetros devido à ação do Efeito Pelicular e da variação das temperaturas nos enrolamentos. No capítulo III desenvolve-se o modelo térmico do motor apresentando-se os cálculos de seus parâmetros. No capítulo IV os modelos elétrico e térmico são acoplados de maneira a resultar um modelo matemático térmico e elétrico para o motor de indução.

A validação do modelo apresentado no capítulo IV é feita no capítulo V, através de comparações com resultados experimentais. No capítulo VI são apresentados exemplos de aplicação do modelo.

CAPÍTULO II

CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM ROTOR EM GAIOLA

II.1 - INTRODUÇÃO

Uma das formas de se analisar o desempenho de um motor de indução em regime permanente é através de um circuito elétrico equivalente. Com o circuito elétrico equivalente, obtém-se valores de grandezas características do motor, entre elas : correntes, conjugado desenvolvido, potência mecânica, rendimento, fator de potência e potências de perdas.

Dependendo da necessidade e do grau de precisão dos resultados a serem obtidos, pode-se utilizar diferentes circuitos elétricos equivalentes e métodos mais convenientes para a determinação dos seus parâmetros.

Como a proposta fundamental deste trabalho, é a utilização de dados que possam ser obtidos com certa facilidade, através de catálogos e informações técnicas do fabricante do motor, de normas técnicas e da prática geral de projetos, os parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor são determinados, principalmente, a partir de dados de catálogos dos fabricantes e de outros dados de conhecimento geral.

Os parâmetros do rotor que variam no tempo, com o escorregamento, devido ao Efeito Pelicular (Skin), são corrigidos por expressões que levam em conta a ação deste efeito. As resistências dos enrolamentos são corrigidas devido às suas variações com as temperaturas desses enrolamentos.

A figura 2.1, mostra o circuito elétrico equivalente utilizado para a obtenção das características necessárias para o estudo do comportamento térmico do motor.

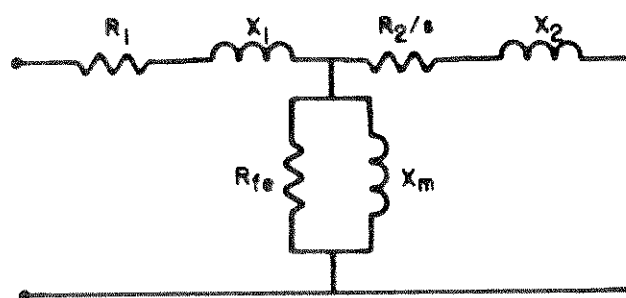


figura 2.1 - Circuito elétrico equivalente do motor

A seguir apresenta-se a metodologia para a determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente e a forma com que se corrige os parâmetros que variam com o Efeito Pelicular e com a temperatura.

II.2 - VARIACÃO DOS PARÂMETROS DO ROTOR DEVIDO AO EFEITO PELICULAR

Nos motores de indução de rotor em gaiola, principalmente aqueles que possuem barras profundas, a variação da densidade de corrente nas barras, causada pela variação da frequência da corrente induzida no rotor, produz variações na resistência e na reatância de dispersão do enrolamento do rotor.

Na partida a frequência das correntes do rotor é igual à das correntes de estator e, nesta condição, devido à distribuição do fluxo de dispersão, a corrente se concentra na parte superior da barra produzindo um acréscimo no valor da resistência da barra e uma diminuição na reatância de dispersão. Com o rotor em aceleração, a frequência das correntes de rotor diminui, diminuindo também o fluxo de dispersão.

Com o rotor girando à velocidade nominal, a corrente na barra tem uma distribuição praticamente uniforme, alterando os valores da resistência e a reatância de dispersão do enrolamento do rotor.

Entre estas duas condições de funcionamento, partida e nominal, torna-se necessário definir uma forma para a correção dos valores da resistência e da reatância de dispersão do enrolamento do rotor em função da frequência das correntes do rotor que está relacionada com o escorregamento do motor.

Para estas duas condições de funcionamento, pode-se definir os valores da resistência e da reatância de dispersão do enrolamento do rotor como:

Na partida, para $s = 1$:

$$R_2 (s=1) = R_{2p} \quad (II.1)$$

$$X_2 (s=1) = X_{2p} \quad (II.2)$$

Na condição nominal de operação para $s = s_n$:

$$R_2 (s=s_n) = R_{2n} \quad (II.3)$$

$$X_2 (s=s_n) = X_{2n} \quad (II.4)$$

De acordo com [1] e [2], os parâmetros do rotor podem ser corrigidos utilizando-se uma função que define a variação da densidade de corrente na barra do rotor, com o escorregamento do motor.

Em [3], foi feita uma proposta para se corrigir os parâmetros do rotor devido ao Efeito Pelicular, utilizando-se as seguintes expressões :

$$R_2 (s) = R_{20} \exp \left(g_r \sqrt{s} \right) \quad (II.5)$$

$$X_2 (s) = X_{20} \exp \left(g_x \sqrt{s} \right) \quad (II.6)$$

onde:

R_{20} - resistência do enrolamento do rotor para o motor operando em vazio

X_{20} - reatância de dispersão do enrolamento do rotor para o motor operando em vazio

g_r , g_x - constantes de proporcionalidade

Utilizando-se as expressões (II.5) e (II.6) para as condições de partida e nominal, tem-se :

$$R_2 (s=1) = R_{2p} = R_{20} \exp \left[g_r \right] \quad (\text{II.7})$$

$$R_2 (s=s_n) = R_{2n} = R_{20} \exp \left[g_r \sqrt{s_n} \right] \quad (\text{II.8})$$

$$X_2 (s=1) = X_{2p} = X_{20} \exp \left[g_x \right] \quad (\text{II.9})$$

$$X_2 (s=s_n) = X_{2n} = X_{20} \exp \left[g_x \sqrt{s_n} \right] \quad (\text{II.10})$$

Dividindo-se (II.7) por (II.8), tem-se :

$$\frac{R_{2p}}{R_{2n}} = \exp \left[g_r \left(1 - \sqrt{s_n} \right) \right] \quad (\text{II.11})$$

Com isso pode-se escrever :

$$g_r = \frac{\ln \left(R_{2p} / R_{2n} \right)}{1 - \sqrt{s_n}} \quad (\text{II.12})$$

Da mesma forma , dividindo-se (II.9) por (II.10), tem-se :

$$\frac{X_{2p}}{X_{2n}} = \exp \left[g_x \left(1 - \sqrt{s_n} \right) \right] \quad (\text{II.13})$$

$$g_x = \frac{\ln \left[X_{2p} / X_{2n} \right]}{1 - \sqrt{s_n}} \quad (\text{II.14})$$

Substituindo-se os valores de g_r e g_x calculados em (II.12) e (II.14) em (II.7) e (II.9) respectivamente, pode-se determinar os valores de R_{20} e X_{20} .

$$R_{20} = \frac{R_{2p}}{\exp \left(g_r \right)} \quad (\text{II.15})$$

$$X_{20} = \frac{X_{2p}}{\exp \left(g_x \right)} \quad (\text{II.16})$$

II.3 - CORREÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR E DO ROTOR COM A TEMPERATURA

De acordo com [4] , os valores das resistências de enrolamentos obtidos em ensaios devem ser referidos à uma

temperatura de referência de 20° C utilizando a expressão :

$$R_{(\theta)} = R_{(\theta_r)} \left[1 + \alpha \left(\theta - \theta_r \right) \right] \quad (\text{II.17})$$

onde :

$R_{(\theta)}$ - resistência do enrolamento à uma temperatura θ

$R_{(\theta_r)}$ - resistência do enrolamento à temperatura de referência

α - coeficiente que define a variação da resistência de um condutor metálico com a temperatura

Neste trabalho, as resistências dos enrolamentos do estator e do rotor são obtidas através de informações técnicas de fabricante e dos dados de catálogos do motor respectivamente. Durante a resolução das equações do circuito elétrico equivalente para a obtenção do comportamento térmico do motor, estas resistências são corrigidas com a temperatura, de modo que se torna necessário referir estes valores à temperatura de referência de 20° C [4] .

II.4 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO MOTOR

A seguir apresenta-se uma metodologia para a determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente da figura 2.1 , a partir dos seguintes dados que constam de catálogos fornecidos pelos fabricantes de motores :

- P_n - potência nominal (W)
- V_n - tensão de linha nominal (V).
- I_n - corrente de linha nominal do estator (A)
- n_n - velocidade nominal (rpm)
- f_{P_n} - fator de potência nominal
- η_n - rendimento nominal
- f - frequência da tensão da rede de alimentação (Hz)
- p - número de polos
- \overline{C}_p - conjugado de partida (pu)
- \overline{C}_m - conjugado máximo (pu)
- \overline{I}_p - corrente de partida (pu)

Além destes dados de catálogos, utilizam-se os seguintes dados que, apesar de não constarem dos catálogos, podem ser fornecidos pelo fabricante do motor para toda a série de motores apresentada em catálogos e obtidos de normas técnicas :

- R_1 - resistência do enrolamento do estator a uma determinada temperatura conhecida (fornecida pelo fabricante)
- P_{rot} - perdas mecânicas do motor em operação nominal
- σ - relação entre as reatâncias de dispersão do estator e do rotor [4]

Na partida, a corrente no enrolamento do estator é muito maior do que a corrente no ramo paralelo do circuito elétrico equivalente, de forma que se pode modificar a configuração do circuito, suprimindo-se o ramo paralelo.

A resistência do enrolamento do rotor nesta condição pode ser determinada através do conjugado de partida.

$$C_p = \frac{3 R_{2p} (I_{2p})^2}{\omega_s} \quad (\text{II.18})$$

com,

$$C_p = \overline{C_p} C_n \quad (\text{II.19})$$

$$C_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (\text{II.20})$$

$$s_n = \frac{\omega_s - \omega_n}{\omega_s} \quad (\text{II.21})$$

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad (\text{II.22})$$

$$\omega_s = \frac{2 \pi}{60} n_s \quad (\text{II.23})$$

$$\omega_n = \frac{2 \pi}{60} n_n \quad (\text{II.24})$$

$$I_{2p} = \overline{I}_p I_{fn} \quad (II.25)$$

onde:

I_{2p} - corrente de fase no enrolamento do rotor na partida

I_{fn} - corrente de fase nominal do motor (depende de I_n e da ligação do enrolamento do estator)

\overline{C}_p , C_n , P_n , \overline{I}_p , f , n_n são dados de catálogo.

A resistência do rotor na partida pode ser determinada por :

$$R_{2p} = \frac{C_p \omega_s}{3 \left(I_{2p} \right)^2} \quad (II.26)$$

Como os dados utilizados para a determinação desta resistência são referentes à condição de partida não existe necessidade de corrigir a mesma para a temperatura de referência.

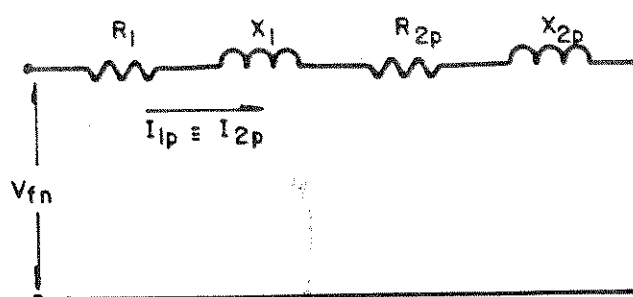


figura 2.2 - Circuito elétrico equivalente do motor na partida

Do circuito da figura 2.2 , pode-se escrever :

$$Z_{ep} = \frac{V_{fn}}{I_{1p}} = \sqrt{(R_1 + R_{2p})^2 + (X_1 + X_{2p})^2} \quad (\text{II.27})$$

onde :

Z_{ep} - impedância equivalente do motor na partida

V_{fn} - tensão de fase nominal

I_{1p} - corrente de fase no enrolamento do estator, na partida

Com os valores de R_{2p} , calculado por (II.26) e de R_1 fornecido pelo fabricante referida à temperatura de referência, pode-se determinar a reatância de dispersão equivalente do motor na partida.

A relação entre as reatâncias de dispersão X_1 e X_{2p} dos enrolamentos do estator e do rotor, na partida, é definida em [4] , baseada na categoria de desempenho do motor na partida.

$$y = \frac{X_1}{X_{2p}} \quad (\text{II.28})$$

Os seus valores para as diversas categorias de motor conforme [4] são :

categoria - D : $y = 1.0$

categoria - N : $y = 0.67$

categoria - H : $y = 0.43$

De (II.27) tem-se :

$$X_1 + X_{2p} = \sqrt{\left(\frac{V_{fn}}{I_{1p}}\right)^2 - (R_1 + R_{2p})^2} \quad (\text{II.29})$$

Utilizando-se (II.28), tem-se :

$$X_{2p} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_{fn}}{I_{1p}}\right)^2 - (R_1 + R_{2p})^2}}{1 + y} \quad (\text{II.30})$$

$$X_1 = y X_{2p} \quad (\text{II.31})$$

Na condição nominal, o conjugado desenvolvido pelo motor é dado por :

$$C_n = \frac{P_{gn}}{\omega_s} \quad (\text{II.32})$$

onde :

P_{gn} - potência através do entreferro na condição nominal

ω_s - velocidade síncrona

A potência através do entreferro na condição nominal é dada por :

$$P_{gn} = \frac{3 R_{2n} (I_{2n})^2}{s_n} \quad (\text{II.33})$$

De acordo com [1], a corrente do rotor na condição nominal pode ser dada por :

$$I_{2n} = I_{fn} \cdot f_{p_n} \sqrt{1 + \left(\frac{s_n}{2s_m}\right)^2} \quad (\text{II.34})$$

onde o escorregamento para a condição de conjugado máximo (s_m) é dado por :

$$s_m = s_n \left[\frac{C_m}{C_m} + \sqrt{\left(\frac{C_m}{C_m}\right)^2 - 1} \right] \quad (\text{II.35})$$

De (II.32) tem-se :

$$P_{gn} = C_n \omega_s \quad (\text{II.36})$$

Igualando-se (II.33) e (II.36) tem-se :

$$\frac{3 R_{2n} (I_{2n})^2}{s_n} = C_n \omega_s \quad (\text{II.37})$$

A resistência do rotor para a condição nominal pode ser dada por :

$$R_{2n} = \frac{C_n s_n \omega_s}{3 (I_{2n})^2} \quad (\text{II.38})$$

Pode-se observar que nesta condição todos os parâmetros são fornecidos ou calculados através de dados de catálogo e informações do fabricante. O valor obtido através de (II.38) é o da resistência do enrolamento do rotor na temperatura de funcionamento, portanto na temperatura em que o equilíbrio térmico na condição de funcionamento nominal é alcançado.

Para se determinar a reatância de dispersão do enrolamento do rotor para a condição nominal, utiliza-se o circuito elétrico equivalente da figura 2.3.

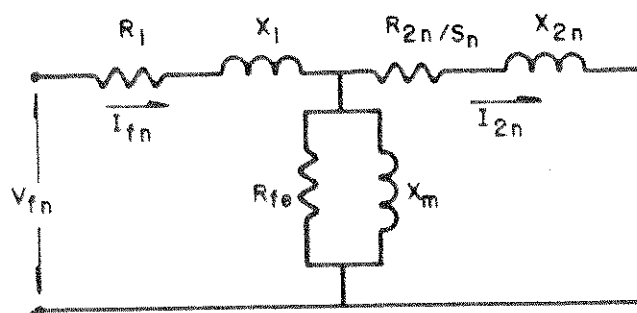


figura 2.3 - Circuito equivalente para a condição nominal

Do circuito da figura 2.3 tem-se :

$$E_m = V_1 - [R_1 + j X_1] I_1 \quad (\text{II.39})$$

$$\dot{E}_m = \left(\frac{R_{2n}}{s_n} + j X_{2n} \right) \dot{I}_{2n} \quad (\text{II.40})$$

$$\dot{V}_1 = V_{fn} \angle 0^\circ \quad (\text{II.41})$$

$$\dot{I}_1 = I_{fn} \angle -\varphi_n \quad (\text{II.42})$$

Conhecendo-se o módulo de \dot{I}_{2n} (II.34) e determinando-se o módulo de \dot{E}_m (II.40), pode-se determinar X_{2n} .

$$X_{2n} = \sqrt{\left(\frac{|\dot{E}_m|}{|\dot{I}_{2n}|} \right)^2 - \left(\frac{R_{2n}}{s_n} \right)^2} \quad (\text{II.43})$$

Os parâmetros do ramo paralelo do circuito equivalente da figura 2.3, que representam as perdas no ferro e o estado de magnetização da máquina, podem ser determinados por :

$$R_{fe} = \frac{3 |\dot{E}_m|^2}{P_{fe}} \quad (\text{II.44})$$

$$X_m = \frac{3 |\dot{E}_m|^2}{Q_m} \quad (\text{II.45})$$

onde :

P_{fe} - perdas no ferro da máquina (W)

Q_m - potência reativa responsável pela magnetização do circuito magnético da máquina (Var) (II.52)

Para a condição nominal, pode-se escrever :

$$P_{en} = P_n + (P_{j1n} + P_{j2n} + P_{fen} + P_{rot}) \quad (II.46)$$

onde:

P_{en} - potência ativa de entrada na condição de operação nominal (W)

P_{j1n} - potência dissipada no enrolamento do estator na condição nominal de operação (W)

P_{j2n} - potência dissipada no enrolamento do rotor na condição nominal de operação

P_{fen} - perdas no ferro na condição nominal de operação

P_{rot} - perdas rotacionais

O valor das perdas no ferro, para a condição nominal de operação, pode ser dado por :

$$P_{fen} = P_{en} - P_n - (P_{j1n} + P_{j2n} + P_{rot}) \quad (II.47)$$

sendo :

$$P_{en} = \frac{P_n}{\eta_n} \quad (II.48)$$

As potências dissipadas são determinadas para uma temperatura de referência de funcionamento. Segundo [4] , esta temperatura depende da classe de isolamento do motor. Esta correção é

necessária pois os dados nominais do motor são referentes à máquina funcionando em equilíbrio térmico na condição nominal. Salvo especificação diferente, todas as potências dissipadas devem ser indicadas para um dos seguintes valores de temperatura de funcionamento (θ_{rf}) : 75° C para máquinas de classes de isolamento A, B e E e 115° C para máquinas de classes de isolamento F e H .

A temperatura de referência de funcionamento não corresponde, necessariamente, ao limite de temperatura admissível para a classe de isolamento empregado numa determinada máquina. Desta maneira :

$$P_{j1n} = 3 R_1 (\theta_{rf}) (I_{fn})^2 \quad (II.49)$$

$$P_{j2n} = 3 R_{2n} (\theta_{rf}) (I_{2n})^2 \quad (II.50)$$

Com os valores das potências dissipadas, determinadas por (II.49) e (II.50), a potência de entrada através de (II.48) e as perdas mecânicas fornecidas pelo fabricante, pode-se determinar o valor das perdas no ferro por (II.47) .

Através de (II.44) pode-se determinar a resistência que representa as perdas no ferro da máquina no circuito elétrico equivalente da figura 2.1 .

A potência reativa absorvida pelo motor na condição nominal é dada por :

$$Q_{en} = Q_{x1} + Q_{x2n} + Q_m \quad (II.51)$$

onde:

Q_{en} - Potência reativa de entrada

Q_{x1} - Potência reativa absorvida pela reatância de dispersão do estator

Q_{x2n} - Potência reativa absorvida pela reatância de dispersão do rotor na condição nominal

então:

$$Q_m = Q_{en} - Q_{x1} - Q_{x2n} \quad (II.52)$$

com:

$$Q_{en} = P_{en} \operatorname{tg} (\varphi_n) \quad (II.53)$$

$$\varphi_n = \operatorname{arc} \cos (f_p_n) \quad (II.54)$$

$$Q_{x1} = 3 X_1 (I_{fn})^2 \quad (II.55)$$

$$Q_{x2n} = 3 X_{2n} (I_{2n})^2 \quad (II.56)$$

Desta forma, pode-se obter todos os parâmetros do circuito equivalente do motor, utilizando-se apenas os dados de catálogos, informações técnicas do fabricante e normas técnicas.

CAPÍTULO III

MODELO TÉRMICO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM ROTOR EM GAIOLA

III.1 - INTRODUÇÃO

Em diversos tipos de acionamentos os regimes de funcionamento impostos a um motor de indução podem fazer com que sejam atingidas ou mesmo ultrapassadas as limitações e condições técnicas impostas pelo seu projeto. Estas limitações permitem que o motor possa desenvolver suas características nominais, sem quaisquer prejuízos para a sua vida útil esperada.

Dificuldades para se definir os limites de carga e para se especificar um motor, cujo regime de funcionamento produz severas solicitações térmicas e elétricas, ocorrem com frequência. Procurando-se diminuí-las, propõe-se um modelo térmico para o motor de indução que poderá permitir a análise do comportamento térmico do motor, tanto em regime transitório (partidas, frenagens, etc.), como em regime permanente.

Os parâmetros deste modelo também são calculados, com base em dados que podem ser obtidos com certa facilidade em normas técnicas, em catálogos e nas informações técnicas dos fabricantes. Desta forma, um engenheiro ao especificar um motor para um acionamento que requer alguns cuidados especiais, poderá utilizar

este modelo térmico para que com os resultados obtidos através de simulações, possa escolher, com maior confiabilidade em relação às formas convencionais de especificação de motores, o motor mais adequado ao acionamento, dentre os normais apresentados em catálogos.

A literatura, por exemplo [5] , tem mostrado modelos mais sofisticados e provavelmente mais precisos para o cálculo da temperatura das diversas partes da máquina de indução. Entretanto, tais modelos exigem o conhecimento de características específicas de projeto (dimensões, forma e material da barra do rotor, comprimento do estator, características do enrolamento do estator, entreferro, etc).

Estes valores, em geral não são fornecidos pelos fabricantes e, se forem, é necessário especificar bem o tipo e a potência do motor a ser utilizado.

Como na fase de se especificar um motor, em geral, esses dados ainda não são conhecidos, é necessário que se possua um universo maior de dados, tais como os dos catálogos, seja possível especificá-lo com boa precisão.

Com o uso de inversores para controle de velocidade e de conjugado, os motores de indução passaram, muitas vezes, a serem mais solicitados elétrica e termicamente pois, a alimentação, nestes casos, pode ser não senoidal.

As ordens e amplitudes das componentes harmônicas de corrente e de corrente na saída dos inversores, dependem de seu projeto e em menor grau do tipo da carga. Estas componentes de corrente, presentes na entrada de um motor de indução, produzem ondas de

força magnetomotriz girantes com o mesmo número de pólos da componente fundamental as quais giram a uma velocidade maior e ainda, algumas giram em sentido oposto ao da fundamental. Estas ondas de força magnetomotriz produzem perdas e conjugado pulsante. As perdas adicionais devido às harmônicas temporais de corrente aumentam o aquecimento da máquina e podem reduzir a potência disponível no eixo.

Dependendo do tipo de inversor, estas perdas adicionais podem ser altas, quando comparadas com as perdas da componente fundamental. Desta forma, a necessidade do conhecimento do comportamento térmico de um motor quando este for alimentado por um inversor torna-se ainda maior.

III.2 - MODELO TÉRMICO

O modelo térmico, proposto neste trabalho, está baseado na analogia existente entre comportamento térmico do motor e comportamento de um circuito elétrico do tipo RC, alimentado por uma fonte de corrente.

As máquinas elétricas são compostas por partes que possuem características e propriedades físicas diferentes. Porém, quando se deseja analisar o comportamento térmico de somente algumas destas partes, pode-se utilizar a teoria do aquecimento de um corpo sólido ideal, na qual o corpo possui a propriedade em que sua dissipação de calor se processa de forma uniforme sobre toda a sua superfície.

A equação fundamental do aquecimento de um corpo sólido é dada por :

$$Q dt - A \lambda \theta dt = m c d\theta \quad (\text{III.1})$$

onde:

Q - energia térmica por unidade de tempo (W)

A - área da superfície do corpo (m^2)

λ - coeficiente de transmissão de calor do corpo ($\text{W}/^\circ\text{C m}^2$)

θ - temperatura do corpo ($^\circ\text{C}$)

m - massa do corpo (kg)

c - calor específico do material que constitui o corpo
($\text{W s}/\text{kg } ^\circ\text{C}$)

Em regime térmico permanente, tem-se :

$$Q dt - A \lambda \theta_f dt = 0 \quad (\text{III.2})$$

portanto a temperatura final é dada por :

$$\theta_f = \frac{Q}{A \lambda} \quad (\text{III.3})$$

Definindo-se :

$$\tau = \frac{m c}{A \lambda} \quad (\text{III.4})$$

onde :

τ - constante de tempo térmica (s)

e substituindo-se (III.3) e (III.4) em (III.1), tem-se :

$$(\theta_f - \theta) dt = \tau d\theta \quad (\text{III.5})$$

A integração desta equação, fornece a temperatura do corpo em função do tempo.

$$\theta = \theta_f \left[1 - e^{-t/\tau} \right] + \theta_{(t=0)} \quad (\text{III.6})$$

Se em $t=0$, a temperatura do corpo for igual à temperatura do meio ambiente, pode-se escrever :

$$\theta = \theta_f \left[1 - e^{-t/\tau} \right] + \theta_a \quad (\text{III.7})$$

onde :

θ_a - temperatura ambiente

Portanto a elevação de temperatura do corpo em relação à temperatura ambiente pode ser dada por :

$$\Delta\theta = \theta - \theta_a \quad (\text{III.8})$$

$$\Delta\theta = \theta_f \left[1 - e^{-t/\tau} \right] \quad (\text{III.9})$$

Esta equação descreve a elevação de temperatura de um corpo durante seu aquecimento. Pode-se notar que esta equação é semelhante à equação que descreve a variação da tensão em um circuito composto por um capacitor em paralelo com uma resistência,

alimentados por uma fonte de corrente.

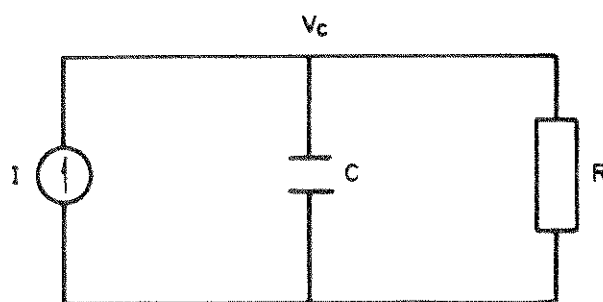


figura 3.1 - Circuito elétrico do tipo RC

Da figura 3.1, tem-se :

$$I = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (\text{III.10})$$

A integração desta equação, fornece a variação da tensão no capacitor em função do tempo.

$$v_c = R I \left[1 - e^{-t/\tau} \right] + v_{(t=0)} \quad (\text{III.11})$$

em regime permanente tem-se :

$$v_c = R I \quad (\text{III.12})$$

então :

alimentados por uma fonte de corrente.

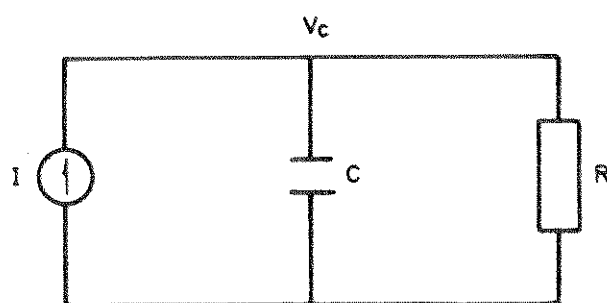


figura 3.1 - Circuito elétrico do tipo RC

Da figura 3.1, tem-se :

$$I = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (\text{III.10})$$

A integração desta equação, fornece a variação da tensão no capacitor em função do tempo.

$$v_c = R I \left[1 - e^{-t/\tau} \right] + v_{(t=0)} \quad (\text{III.11})$$

em regime permanente tem-se :

$$V_c = R I \quad (\text{III.12})$$

então :

$$v_c = v_c \left[1 - e^{-t/\tau} \right] + v_0 \quad (\text{III.13})$$

Dois sistemas são análogos, quando ambos obedecem equações e condições de contorno semelhantes. Isto significa que a equação que descreve o comportamento de um sistema pode ser transformada em uma outra equação para representar um outro sistema, simplesmente pela mudança de variáveis.

Comparando-se as equações (III.7) e (III.13), pode-se verificar a semelhança nas variações da temperatura do corpo e da tensão no capacitor. Baseado nesta semelhança, pode-se representar o circuito térmico do estator e do rotor de um motor de indução através de um circuito elétrico equivalente.

Os circuitos térmicos do estator e do rotor, são compostos por dois corpos cada um, o enrolamento e o núcleo, sendo que o maior interesse sobre o comportamento térmico se concentra nos enrolamentos.

Cada corpo tem suas características térmicas definidas por :

- 1) capacidade térmica que representa a propriedade do corpo de armazenar calor (análoga à capacitância),
- 2) condutância térmica que representa a propriedade do corpo de transferir calor, (análoga à condutância elétrica).

Como já visto nas equações (III.7) e (III.13), a temperatura de cada corpo é análoga da tensão no capacitor. As potências dissipadas nos enrolamentos são análogas da corrente elétrica, pois representam as fontes de alimentação dos circuitos. Além das potências dissipadas nos enrolamentos, existe uma outra fonte de

energia térmica que é a potência dissipada devido às perdas no ferro nos núcleos do estator e do rotor.

Nas figuras 3.2 e 3.3, são mostrados os circuitos térmicos do estator e do rotor.

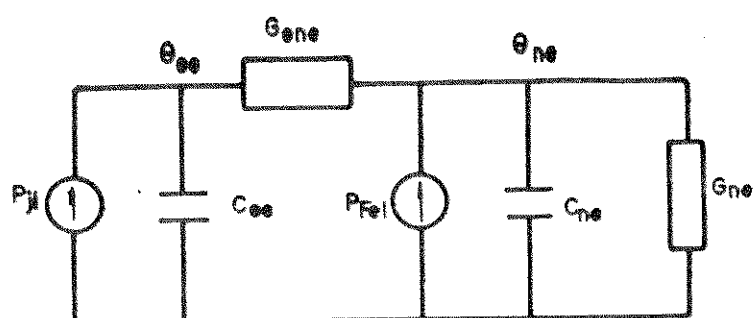


figura 3.2 - Circuito térmico do estator

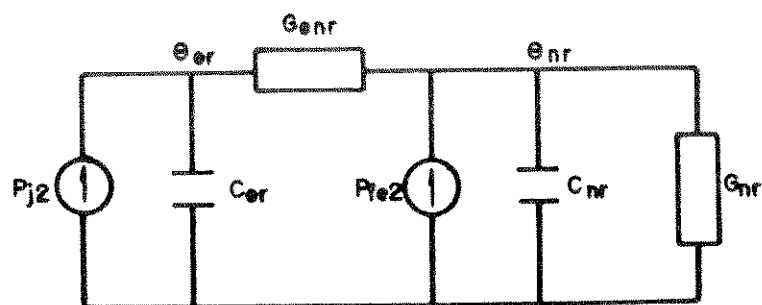


figura 3.3 - Circuito térmico do rotor

Nos circuitos das figuras 3.2 e 3.3 tem-se :

- P_{j1} - potência no enrolamento do estator
- P_{j2} - potência no enrolamento do rotor
- P_{fe1} - perdas no ferro do estator
- P_{fe2} - perdas no ferro do rotor
- θ_{ee} - elevação de temperatura média no enrolamento do estator
- θ_{ne} - elevação de temperatura média no núcleo do estator
- θ_{er} - elevação de temperatura média no enrolamento do rotor
- θ_{nr} - elevação de temperatura média no núcleo do rotor
- C_{ee} - capacidade térmica do enrolamento do estator
- C_{ne} - capacidade térmica do núcleo do estator
- C_{er} - capacidade térmica do enrolamento do rotor
- C_{nr} - capacidade térmica do núcleo do rotor
- G_{ene} - condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o enrolamento e o núcleo do estator
- G_{ne} - condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o núcleo do estator e o meio ambiente
- G_{enr} - condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o enrolamento e o núcleo do rotor
- G_{nr} - condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o núcleo do rotor e o meio ambiente

Os circuitos térmicos do estator e do rotor são considerados desacoplados supondo que o entreferro da máquina funciona como um isolante térmico, impedindo a troca de calor entre o rotor e o estator [1] e [2]. Para considerar o entreferro como um meio

transmissor de calor seria necessário realizar medições de temperatura sobre as superfícies do rotor e do estator o que foge à finalidade deste trabalho.

Através dos circuitos térmicos das figuras 3.2 e 3.3 pode-se escrever :

$$P_{j1} = C_{ee} \frac{d\theta_{ee}}{dt} + G_{ene} (\theta_{ee} - \theta_{ne}) \quad (\text{III.14})$$

$$P_{fe1} + G_{ene} (\theta_{ee} - \theta_{ne}) = C_{ne} \frac{d\theta_{ne}}{dt} + G_{ne} \theta_{ne} \quad (\text{III.15})$$

$$P_{j2} = C_{er} \frac{d\theta_{er}}{dt} + G_{enr} (\theta_{er} - \theta_{nr}) \quad (\text{III.16})$$

$$P_{fe2} + G_{enr} (\theta_{er} - \theta_{nr}) = C_{nr} \frac{d\theta_{nr}}{dt} + G_{nr} \theta_{nr} \quad (\text{III.17})$$

Este conjunto de equações define o modelo térmico do motor de indução. Os parâmetros serão determinados nos próximos itens e as potências dissipadas são obtidas através do circuito elétrico equivalente do motor.

III.3 - CÁLCULO DAS CAPACIDADES TÉRMICAS

As capacidades térmicas dos circuitos térmicos do estator e do rotor, podem ser calculadas através do calor específico do material e das respectivas massas de cada corpo.

Para o circuito do estator, tem-se :

$$C_{ee} = c_{ee} m_{ee} \quad (\text{III.18})$$

$$C_{ne} = c_{ne} m_{ne} \quad (\text{III.19})$$

onde:

c_{ee} - calor específico do material que constitui o enrolamento do estator (W/°C s kg)

c_{ne} - calor específico do material que constitui o núcleo do estator (W/°C s kg)

m_{ee} - massa total do enrolamento do estator (kg)

m_{ne} - massa total do núcleo do estator (kg)

Para o circuito do rotor, tem-se :

$$C_{er} = c_{er} m_{er} \quad (\text{III.20})$$

$$C_{nr} = c_{nr} m_{nr} \quad (\text{III.21})$$

onde:

c_{er} - calor específico do material que constitui o enrolamento do rotor ($W/^\circ C \text{ s kg}$)

c_{nr} - calor específico do material que constitui o núcleo do rotor ($W/^\circ C \text{ s kg}$)

m_{er} - massa total do enrolamento do rotor (kg)

m_{nr} - massa total do núcleo do rotor (kg)

A importância do conhecimento dos valores reais das massas dos corpos, reside no fato de que as capacidades térmicas, influenciam as constantes de tempo térmicas, principalmente nos regimes transitórios. Portanto, as taxas de aumento e de diminuição das temperaturas dependem da precisão com que estes valores são obtidos.

Em [1] são utilizadas tabelas que permitem estimar os valores das massas das diversas partes do motor, em função de sua potência nominal. Neste trabalho, os valores utilizados foram fornecidos pelo fabricante (apêndice B) pois os apresentados em [1] são aplicáveis a motores de alta tensão. Tenta-se, atualmente, conseguir com fabricantes de motores de baixa tensão, tabela semelhante que facilmente poderá ser elaborada.

III.4 - CÁLCULO DAS CONDUTÂNCIAS DO CIRCUITO TÉRMICO DO ESTATOR

Para se calcular com certa precisão os valores das condutâncias térmicas, deve-se conhecer além das características físicas, as características geométricas dos corpos. Como neste trabalho, procura-se utilizar somente dados que possam ser obtidos com facilidade, os valores das condutâncias são calculados através de uma forma alternativa, utilizando-se dados de catálogos, normas e informações técnicas fornecidas pelos fabricantes.

III.4.1 - Condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o enrolamento e o núcleo do estator

Da equação (III.14), em regime térmico permanente, tem-se :

$$G_{ene} = \frac{P_{j1}}{\theta_{ee} - \theta_{ne}} \quad (\text{III.22})$$

A potência dissipada pelo enrolamento do estator, é calculada com base nos dados nominais do motor.

$$P_{j1} = P_{j1n} = 3 R_1 \left[I_{fn} \right]^2 \quad (\text{III.23})$$

onde :

P_{j1n} - potência dissipada pelo enrolamento do estator na condição nominal

R_1 - resistência do enrolamento do estator na temperatura

de referência de funcionamento

I_{fn} - corrente de fase nominal

A diferença de temperatura entre o enrolamento e o núcleo do estator, considerando a hipótese do motor, funcionar na condição nominal, em regime permanente, é igual à diferença entre a temperatura do ponto mais quente do enrolamento e a temperatura média do enrolamento [3]. Esta diferença de temperatura depende da classe de isolamento do enrolamento. Então a condutância G_{ene} pode ser calculada por :

$$G_{ene} = \frac{P_{j1n}}{\Delta\theta_e} \quad (III.24)$$

onde :

$\Delta\theta_e$ - diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a temperatura média do enrolamento do estator

O valor de $\Delta\theta_e$ pode ser obtido através da tabela 3.1 [4] e [8].

Tabela 3.1 - temperaturas admissíveis para os enrolamentos do estator em função da classe de isolamento [4] e [8] .

classe de isolamento	A	E	B	F	H
Elevação de temperatura média admissível, calculada pelo método da resistência (°C)	60	75	80	100	125
diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a temperatura média (°C)	5	5	10	15	15
temperatura ambiente (°C)	40	40	40	40	40
temperatura admissível do ponto mais quente (°C)	105	120	130	155	180

III.4.2 - Condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o núcleo do estator e o meio ambiente

O cálculo da condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o núcleo do estator e o meio ambiente, pode ser feito utilizando-se as equações (III.14) e (III.15) em regime térmico permanente.

$$G_{ne} = \frac{P_{j1} + P_{fe1}}{\theta_{ne}} \quad (\text{III.25})$$

Na condição nominal tem-se :

$$P_{j1} = P_{j1n} \quad (\text{III.26})$$

As perdas no ferro, calculadas através do circuito elétrico equivalente podem ser dadas por :

$$P_{fen} = 3 R_{fe} \left(I_{fen} \right)^2 \quad (\text{III.27})$$

A separação das perdas no ferro do estator e do rotor pode ser feita utilizando-se um fator de separação de perdas [5] .

$$P_{fe1} = k_1 P_{fen} \quad (\text{III.28})$$

$$P_{fe2} = k_2 P_{fen} \quad (\text{III.29})$$

com :

$k_1 = k_2 = 0.5$, para alimentação senoidal

$k_1 = 0.4$ e $k_2 = 0.6$, para alimentação não senoidal

Dessa maneira :

$$P_{fe1} = P_{fe2} = 0.5 P_{fen} \quad (\text{III.30})$$

A temperatura do núcleo do estator para a condição de regime térmico permanente é determinada através de :

$$\theta_{ne} = \theta_{isol} - \Delta\theta_e \quad (\text{III.31})$$

onde :

θ_{isol} - elevação de temperatura média admissível do enrolamento do estator

Este valor é definido para cada classe de isolamento, conforme a tabela 3.1 .

III.5 - CÁLCULO DAS CONDUTÂNCIAS DO CIRCUITO TÉRMICO DO ROTOR

Da mesma forma que para as condutâncias do circuito térmico do estator, o cálculo das condutâncias do circuito térmico do rotor, é feito a partir de dados de catálogos, normas e de informações técnicas do fabricante. No caso específico para a determinação dos parâmetros do rotor os dados utilizados são mais restritos, uma vez

que poucos trabalhos foram publicados enfatizando o comportamento térmico do rotor e mesmo os fabricantes tem dificuldades em fornecer dados para este fim.

III.5.1 - Condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o enrolamento e o núcleo do rotor

O cálculo da condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o enrolamento e o núcleo do rotor, pode ser feito através da equação (III.16) em regime térmico permanente.

$$G_{er} = \frac{P_{j2}}{\theta_{er} - \theta_{nr}} \quad (\text{III.32})$$

A potência dissipada no enrolamento do rotor é calculada com base nos valores nominais do motor.

$$P_{j2} = P_{j2n} = 3 R_{2n} \left(I_{2n} \right)^2 \quad (\text{III.33})$$

onde :

P_{j2n} - potência dissipada no enrolamento do rotor na condição nominal

R_{2n} - resistência do enrolamento do rotor na condição nominal

I_{2n} - corrente no rotor na condição nominal

A diferença de temperaturas entre o enrolamento e o núcleo do rotor, é tomada como a diferença entre os valores admissíveis de

elevação de temperatura para o enrolamento do rotor definidos em [6] , tabela 3.2 (θ_{adm1}) e os valores admissíveis de elevação de temperatura para o núcleo do rotor, definidos em [4] , tabela 3.3 (θ_{adm2}) .

$$\Delta\theta_r = \theta_{adm1} - \theta_{adm2} \quad (\text{III.34})$$

onde :

θ_{adm1} - elevação de temperatura admissível para o enrolamento do rotor

θ_{adm2} - elevação de temperatura admissível para o núcleo do rotor

Tabela 3.2 - Valores admissíveis de elevações de temperatura para o enrolamento do rotor em gaiola, em função da classe de isolamento, medidos pelo método da resistência [6]

Classe de isolamento	A	B
Elevação de temperatura no enrolamento do rotor em gaiola de máquinas de indução ($^{\circ}\text{C}$)	65	90

Tabela 3.3. - Valores admissíveis de elevações de temperatura de núcleo magnético do rotor e outras partes em contato com o enrolamento, em função da classe de isolamento, medidos pelo método do termômetro [4]

Classe de isolamento	A	E	B	F	H
Núcleo magnético e outras partes em contato com os enrolamentos (°C)	60	75	80	100	125

A condutância entre o enrolamento e núcleo do rotor pode ser determinada por :

$$G_{er} = \frac{P_{j2n}}{\Delta\theta_r} \quad (\text{III.35})$$

III.5.2 - Condutância necessária para representar a transmissão de calor entre o núcleo do rotor e o meio ambiente

De acordo com [1] e [3], a troca de calor entre o núcleo do rotor e o meio ambiente se processa da mesma forma que a troca de calor entre o núcleo do estator e o meio ambiente. Estes autores, admitiram que as condutâncias que representam as transmissões de calor para o meio ambiente são iguais. Os ensaios realizados em

laboratório, onde foram registradas as temperaturas dos núcleos do estator e do rotor, mostram que as constantes de tempo de térmicas destes núcleos tem a mesma ordem de grandeza e portanto, como suas capacidades térmicas são diferentes, suas condutâncias não podem ser iguais.

Utilizando-se os valores admissíveis das elevações de temperatura do núcleo do rotor (tabela 3.3) e, através das equações (III.16) e (III.17) em regime térmico permanente, pode-se determinar a condutância entre o núcleo do rotor e o meio ambiente.

$$G_{nr} = \frac{P_{j2} + P_{fe2}}{\theta_{nr}} \quad (\text{III.36})$$

Na condição nominal tem-se :

$$P_{j2} = P_{j2n} \quad (\text{III.37})$$

$$P_{fe2} = 0.5 P_{fen} \quad (\text{III.38})$$

A elevação de temperatura do núcleo do rotor para esta condição é admitida igual à elevação de temperatura admissível para o núcleo do rotor definida em [4] . Desta forma tem-se :

$$G_{nr} = \frac{P_{j2n} + P_{fe2}}{\theta_{adm2}} \quad (\text{III.39})$$

III.6 - INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO DO MOTOR SOBRE OS VALORES DAS CONDUTÂNCIAS ENTRE O NÚCLEO DO ESTATOR E O MEIO AMBIENTE E ENTRE O NÚCLEO DO ROTOR E O MEIO AMBIENTE

A transmissão de calor dos núcleos do estator e do rotor para o meio ambiente, dependem das condições de ventilação da máquina. Quanto melhores forem as condições de ventilação, melhores serão as condições na qual se processa a transmissão de calor dos núcleos para o meio ambiente. Com isso a constante de tempo de aquecimento tem seu valor diminuído.

Para se levar em consideração a influência da ventilação, principalmente em motores autoventilados, no cálculo das elevações de temperatura, deve-se corrigir o valor das condutâncias necessárias para representar a transmissão de calor entre os núcleos do estator e do rotor e o meio ambiente.

De acordo com [1], o fator de correção das condutâncias devido ao efeito da ventilação é dado por :

$$k_v = 0.3 + 0.7 \left[\frac{\omega_m}{\omega_n} \right]^{0.7} \quad (\text{III.40})$$

onde:

k_v - fator que corrige os valores das condutâncias devido ao efeito da ventilação

ω_m - velocidade do motor

ω_n - velocidade nominal do motor

As condutâncias que representam a transmissão de calor dos núcleos para o meio ambiente podem ser dadas por :

$$G_{ne} = k_v G_{ne} \quad (\text{III.41})$$

$$G_{nr} = k_v G_{nr} \quad (\text{III.42})$$

O fator k_v , calculado pela equação (III.40), é usado somente para corrigir o efeito da ventilação nas condutâncias para os motores autoventilados. Para os motores sem ventilação, $k_v = 0.3$ e para motores com ventilação forçada, $k_v = 1.0$, [1].

CAPÍTULO IV

MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO DESEMPENHO ELÉTRICO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA

IV.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado um modelo matemático, que é utilizado para obtenção das características de funcionamento e do comportamento térmico de um motor de indução, quando este é alimentado por tensão senoidal ou por tensão não senoidal, através de simulações em computador.

Basicamente, este modelo matemático é composto pelo sistema de equações diferenciais definido pelos circuitos térmicos propostos. A alimentação destes circuitos térmicos, que são as perdas no motor, são determinadas através do circuito elétrico equivalente do motor, cujos parâmetros são corrigidos com a temperatura e o Efeito Pelicular.

IV. 2 - RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS QUE CONSTITUI O MODELO TÉRMICO DO MOTOR

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois métodos para a resolução do sistema de equações diferenciais, o método de Runge-Kutta de 4ª ordem e o método de Euler.

Dos resultados obtidos pelos dois métodos, observou-se que apesar do método de Runge-Kutta apresentar uma precisão um pouco maior, os resultados com o método de Euler foram muito próximos do anterior, com a vantagem de se obter um tempo de computação menor. Além disto, nas simulações são utilizados passos de integração diferentes para as condições de regime transitório e de regime permanente e as constantes de tempo dos circuitos térmicos são muito maiores do que as do circuito elétrico do motor.

O conjunto de equações (III.14) a (III.17) pode ser escrito da seguinte forma :

$$\frac{d\theta_{ee}}{dt} = \frac{1}{C_{ee}} \left[P_{j1} - G_{ene}(\theta_{ee} - \theta_{ne}) \right] \quad (\text{IV.1})$$

$$\frac{d\theta_{ne}}{dt} = \frac{1}{C_{ne}} \left[P_{fe1} + G_{ene}(\theta_{ee} - \theta_{ne}) - G_{ne} \theta_{ne} \right] \quad (\text{IV.2})$$

$$\frac{d\theta_{er}}{dt} = \frac{1}{C_{er}} \left[P_{j2} - G_{enr}(\theta_{er} - \theta_{nr}) \right] \quad (\text{IV.3})$$

$$\frac{d\theta_{nr}}{dt} = \frac{1}{C_{nr}} \left[P_{fe2} + G_{enr}(\theta_{er} - \theta_{nr}) - G_{nr} \theta_{nr} \right] \quad (\text{IV.4})$$

Na solução deste sistema de equações, a utilização de passos discretos implica em se admitir que as potências dissipadas no motor, permanecem constantes durante o intervalo de tempo definido

para o passo de integração.

Aplicando-se o método de Euler ao sistema de equações (IV.1) a (IV.4) tem-se :

$$\Delta\theta_{ee}[i+1] = \frac{\Delta t}{C_{ee}} \left[P_{j1}[i] - G_{ene} \left(\theta_{ee}[i] - \theta_{ne}[i] \right) \right] \quad (IV.5)$$

$$\Delta\theta_{ne}[i+1] = \frac{\Delta t}{C_{ne}} \left[P_{fe1}[i] + G_{ene} \left(\theta_{ee}[i] - \theta_{ne}[i] \right) - G_{ne} \theta_{ne}[i] \right] \quad (IV.6)$$

$$\Delta\theta_{er}[i+1] = \frac{\Delta t}{C_{er}} \left[P_{j2}[i] - G_{en2} \left(\theta_{e2}[i] - \theta_{n2}[i] \right) \right] \quad (IV.7)$$

$$\Delta\theta_{nr}[i+1] = \frac{\Delta t}{C_{nr}} \left[P_{fe2}[i] + G_{enr} \left(\theta_{er}[i] - \theta_{nr}[i] \right) - G_{nr} \theta_{nr}[i] \right] \quad (IV.8)$$

A solução é dada por :

$$\theta_{ee}[i+1] = \theta_{ee}[i] + \Delta\theta_{ee}[i+1] \quad (IV.9)$$

$$\theta_{ne}[i+1] = \theta_{ne}[i] + \Delta\theta_{ne}[i+1] \quad (IV.10)$$

$$\theta_{er}[i+1] = \theta_{er}[i] + \Delta\theta_{er}[i+1] \quad (\text{IV.11})$$

$$\theta_{nr}[i+1] = \theta_{nr}[i] + \Delta\theta_{nr}[i+1] \quad (\text{IV.12})$$

onde :

Δt - passo de integração (seg.)

$i = 0, 1, 2, 3, \dots$

Os valores iniciais para a resolução do sistema são nulos, uma vez que a solução dará os valores das elevações de temperatura em relação à temperatura ambiente. Supõe-se que, em $t=0$, as temperaturas dos corpos sejam iguais à do meio ambiente pois a máquina está parada.

$$\theta_{ee}[0] = 0$$

$$\theta_{ne}[0] = 0$$

$$\theta_{er}[0] = 0$$

$$\theta_{nr}[0] = 0$$

Os valores dos parâmetros dos circuitos térmicos que variam com a ventilação do motor e as potências dissipadas no circuito equivalente são determinados em função da velocidade do motor.

Em cada passo de integração das equações diferenciais, as perdas P_{j1} , P_{j2} , P_{fe1} e P_{fe2} são recalculadas para cada elevação de temperatura até que haja convergência das elevações.

IV.3 - DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO COM ALIMENTAÇÃO SENOIDAL

Para a resolução do sistema de equações diferenciais que representam os circuitos térmicos, torna-se necessária a determinação das potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor e das perdas no ferro.

Estas potências são determinadas através da resolução do circuito elétrico equivalente do motor, em função do escorregamento.

A seguir apresentam-se as formas para se calcular o valor do escorregamento para os diversos modos de operação do motor.

IV.3.1 - Determinação do escorregamento em função do tempo para os regimes transitórios

Nas condições de funcionamento do motor em regime transitório, ou seja, partidas e frenações, pode-se determinar o escorregamento do motor em função do tempo, através da equação que relaciona as grandezas elétricas e mecânicas do motor.

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = C \mp C_c \quad (\text{IV.13})$$

mas,

$$\omega = \omega_s (1 - s) \quad (\text{IV.14})$$

onde :

ω - velocidade angular do eixo do motor (rad/seg)

então,

$$-J_t \omega_s \frac{ds}{dt} = C + C_c \quad (\text{IV.15})$$

$$ds = - dt \frac{(C + C_c)}{J_t \omega_s} \quad (\text{IV.16})$$

Utilizando-se o método de Euler, tem-se :

$$\Delta s[i+1] = - \Delta t \frac{(C[i] + C_c[i])}{J_t \omega_s} \quad (\text{IV.17})$$

$$s[i+1] = s[i] + \Delta s[i+1] \quad (\text{IV.18})$$

Na partida, o escorregamento inicial é dado por :

$$s(0) = 1.0 \quad (\text{IV.19})$$

Na frenação, o escorregamento inicial é dado por :

$$s(0) = 2 - s_{op} \quad (\text{IV.20})$$

onde :

s_{op} - escorregamento do motor no instante em que é iniciado o processo de frenação

IV.3.2 - Determinação do escorregamento em regime permanente

Em regime permanente o escorregamento do motor deveria permanecer constante porém, devido à variação dos parâmetros do motor com a temperatura, o conjugado desenvolvido pelo motor varia mudando o ponto de operação em regime permanente. O novo ponto de operação é definido pela intersecção das curvas do conjugado desenvolvido com a do conjugado de carga.

O conjugado desenvolvido pelo motor pode ser calculado, aproximadamente, pela equação [6] :

$$C = \frac{3 (V_1)^2 R_2/s}{\omega_s [(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2]} \quad (\text{IV.21})$$

O conjugado de carga pode ser calculado por :

$$C_c = k_c (\omega)^x \quad (\text{IV.22})$$

onde :

x - expoente que define a variação do conjugado de carga com a velocidade

k_c - constante de proporcionalidade

Substituindo-se a equação da velocidade (IV.14) e igualando-se as equações (IV.21) e (IV.22) pode-se determinar o valor do escorregamento para a condição de regime permanente.

$$\frac{3 (V_1)^2 (R_2/s)}{\omega_s \left[(R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]} = k_c \left[\omega_s (1 - s) \right]^x \quad (\text{IV.23})$$

Pode-se observar que a obtenção do escorregamento, principalmente para valores de x diferentes de zero, é uma tarefa que requer a aplicação de um método numérico para a solução de (IV.23) em cada passo de integração.

Neste trabalho utiliza-se conjugado de carga constante ($x = 0$) na equação (IV.23) e determina-se o valor do escorregamento, resolvendo-se a equação (IV.24) sem perda de generalidade tendo em vista que em torno do ponto de operação nominal o conjugado de carga é praticamente constante.

$$\left[R_1^2 + (X_1 + X_2)^2 \right] s^2 + \left[2 R_1 R_2 - \frac{3 V_1^2}{\omega_s C_{c0}} \right] s + R_2^2 = 0 \quad (\text{IV.24})$$

Antes de cada mudança de passo de integração, para o motor operando em regime permanente, corrigem-se os valores das resistências com a temperatura e calcula-se o novo valor do escorregamento que será utilizado para a determinação das potências dissipadas através da resolução do circuito elétrico equivalente.

IV.3.3 - Determinação das potências dissipadas no circuito elétrico equivalente

Resolvendo-se o circuito equivalente da figura 2.1, obtém-se as correntes do estator e do rotor. A potência dissipada nos enrolamentos em função do escorregamento são dadas por :

$$P_{j1} = 3 R_1 \left(I_1 \right)^2 \quad (\text{IV.25})$$

$$P_{j2} = 3 R_2 \left(I_2 \right)^2 \quad (\text{IV.26})$$

onde :

$$R_1 = R_{1(\theta_r)} \left[1 + \alpha_e \theta_{ee} \right] \quad (\text{IV.27})$$

$$R_2 = R_{2(\theta_r)} \left[1 + \alpha_r \theta_{er} \right] \exp \left[g_r \sqrt{s} \right] \quad (\text{IV.28})$$

onde α_e e α_r valem :

Para o cobre - $0.00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Para o alumínio - $0.00408 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

As perdas no ferro do estator e do rotor são determinadas pelas equações (III.27), (III.28) e (III.29).

IV.3.4 - Determinação das grandezas elétricas e mecânicas do motor

Conhecidos os valores das correntes no circuito elétrico equivalente pode-se determinar o conjugado desenvolvido, as potências de entrada e mecânica, o fator de potência e o rendimento do motor em função do escorregamento.

O conjugado desenvolvido pode ser dado por :

$$C = \frac{3 R_2 \left(I_2 \right)^2}{s \omega_s} \quad (\text{IV.29})$$

A potência mecânica pode ser dada por :

$$P_{\text{mec}} = C \omega \quad (\text{IV.30})$$

O fator de potência pode ser calculado através do ângulo de fase da corrente do estator, determinada na resolução do circuito elétrico equivalente.

A potência de entrada pode ser dada por :

$$P_{\text{ent}} = 3 V_1 I_1 \text{fp} \quad (\text{IV.31})$$

O rendimento pode ser dado por :

$$\eta = \frac{P_{\text{mec}}}{P_{\text{ent}}} \quad (\text{IV.32})$$

IV.4 - DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS DO MOTOR COM ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL

Quando o motor de indução é alimentado por uma tensão não senoidal, como é no caso dos inversores, os efeitos das componentes harmônicas de tensão presentes na saída deles, podem ser verificados através da utilização do circuito elétrico equivalente do motor e do princípio da superposição.

A análise do desempenho do motor pode ser obtida através da resolução de uma série de circuitos elétricos equivalentes independentes, alimentados pelas componentes harmônicas da tensão de saída do inversor, com suas respectivas frequências [7], [9] e [10].

Na figura 4.1, é mostrado o circuito equivalente que será utilizado para cada uma das componentes harmônicas de tensão.

No capítulo II, os parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor foram determinados para uma alimentação senoidal com frequência nominal.

Para o motor alimentado por um inversor deve-se incluir o efeito da frequência das componentes de tensão, além do Efeito Pelicular e da variação dos parâmetros com a temperatura. De modo geral, a forma de onda da tensão de saída dos inversores de tensão tem um conteúdo harmônico cuja as ordens das componentes pode ser dada por (IV.33) :

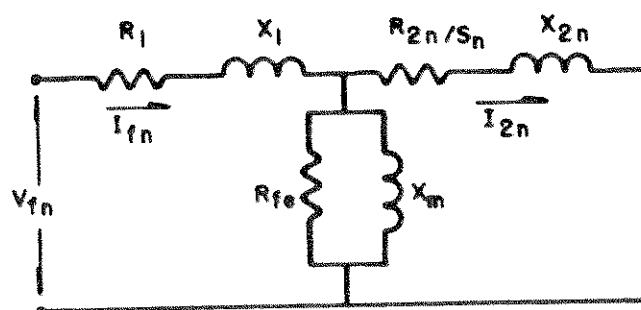


figura 4.1 - Circuito elétrico equivalente do motor para alimentação não senoidal

$$h = 3n \pm 1 \quad (\text{IV.33})$$

onde :

h - ordem da componente

$n = 2, 4, 6, \dots$

Os sinais (+/-) definem a sequência de fases da componente harmônica de tensão em relação a da componente fundamental, sendo que o sinal (+) representa que a componente tem a mesma sequência de fases da fundamental.

Devido à simetria da forma de onda da tensão de saída do inversor, h assume somente valores ímpares diferentes dos múltiplos de três.

A frequência de cada componente harmônica de tensão a ser

aplicada ao motor pode ser dada por :

$$f_1(h) = h f_1(1) \quad (\text{IV.34})$$

onde :

$f_1(1)$ - frequência da componente fundamental da tensão de alimentação

A velocidade síncrona para cada componente de campo girante pode ser dada por :

$$\omega_s(h) = \frac{4 \pi f_1(h)}{p} \quad (\text{IV.35})$$

onde:

$\omega_s(h)$ - velocidade síncrona do componente h

p - número de pólos

Na determinação do escorregamento, para cada uma das componentes, deve-se levar em consideração o fato de que o campo girante de algumas componentes gira em sentido oposto ao da fundamental, devido à oposição da sequência de fases.

Na tabela 4.1, são indicados os sentidos de rotação dos campos girantes das componentes em relação a da fundamental, sendo que (+) representa sentido de rotação oposto ao da fundamental.

Tabela 4.1 - Sentido de rotação dos campos girantes das componentes em relação ao da fundamental

Ordem da harmônica	Sentido de rotação
5	+
7	-
11	+
13	-
17	+
19	-

O escorregamento para cada componente pode ser dado por :

$$s(h) = \frac{\omega_s(h) - \omega}{\omega_s(h)} \quad (\text{IV.36})$$

onde:

$s(h)$ - escorregamento da componente h

ω - velocidade do motor

(+) - campo girante em sentido oposto ao da fundamental

(-) - campo girante no mesmo sentido do da fundamental

$$\omega_s(h) = h \omega_s(1) \quad (\text{IV.37})$$

$$\omega = \omega_s(1) \left[1 - s(1) \right] \quad (\text{IV.38})$$

Substituindo-se (IV.37) e (IV.38) em (IV.36) pode-se escrever o escorregamento para cada componente em função do escorregamento e da componente fundamental.

$$s(h) = 1 \pm \frac{\left[1 - s(1) \right]}{h} \quad (\text{IV.39})$$

Na resolução do circuito equivalente elétrico, o escorregamento devido à componente fundamental de campo girante é determinado da mesma forma que no item IV.3 .

Através da resolução do circuito elétrico equivalente para cada uma das componentes harmônicas pode-se determinar as potências dissipadas totais a serem utilizadas no circuito térmico. As potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, em função do escorregamento podem ser dadas por :

$$P_{j1t} = 3 R_1 \sum_{h=1}^n \left(I_1(h) \right)^2 \quad (\text{IV.40})$$

$$P_{j2t} = 3 R_2(h) \sum_{h=1}^n \left(I_2(h) \right)^2 \quad (\text{IV.41})$$

onde :

$$R_1 = R_{1(\theta_r)} \left[1 + \alpha_e \theta_{ee} \right] \quad (\text{IV.42})$$

$$R_2(h) = R_{20(\theta_r)} \left[1 + \alpha_r \theta_{er} \right] e^{gr \sqrt{s(h)}} \quad (\text{IV.43})$$

As perdas no ferro totais do motor podem ser determinadas através de :

$$P_{fet} = 3 R_{fe} \sum_{h=1}^n \left[I_{fe}(h) \right]^2 \quad (\text{IV.44})$$

A separação das perdas totais pode ser feita utilizando-se o fator de separação de perdas definido anteriormente.

$$P_{fe1t} = 0.4 P_{fet} \quad (\text{IV.45})$$

$$P_{fe2t} = 0.6 P_{fet} \quad (\text{IV.46})$$

As correntes totais nos enrolamentos do estator e do rotor podem ser dadas por :

$$I_{1t} = \sqrt{\sum_{h=1}^n \left[I_1(h) \right]^2} \quad (\text{IV.47})$$

$$I_{2t} = \sqrt{\sum_{h=1}^n [I_2(h)]^2} \quad (\text{IV.48})$$

Devido ao fato de que algumas componentes de campo girante giram em sentido oposto ao da fundamental, o conjugado desenvolvido pelo motor pode ser dado por :

$$C(h) = \frac{3 R_2(h) [I_2(h)]^2}{s(h) \omega_s(h)} \quad (\text{IV.49})$$

O conjugado total pode ser dado por :

$$C_t = C(1) + \sum_{h=5}^n \pm C(h) \quad (\text{IV.50})$$

com :

(-) - componentes que giram em sentido oposto ao da fundamental

(+) - componentes que giram no mesmo sentido do da fundamental

A potência de entrada no motor é calculada por :

$$P_{et} = P_{mec} + P_{j1t} + P_{j2t} + P_{fet} + P_{rot} \quad (\text{IV.51})$$

com :

$$P_{mec} = C_t \omega \quad (\text{IV.52})$$

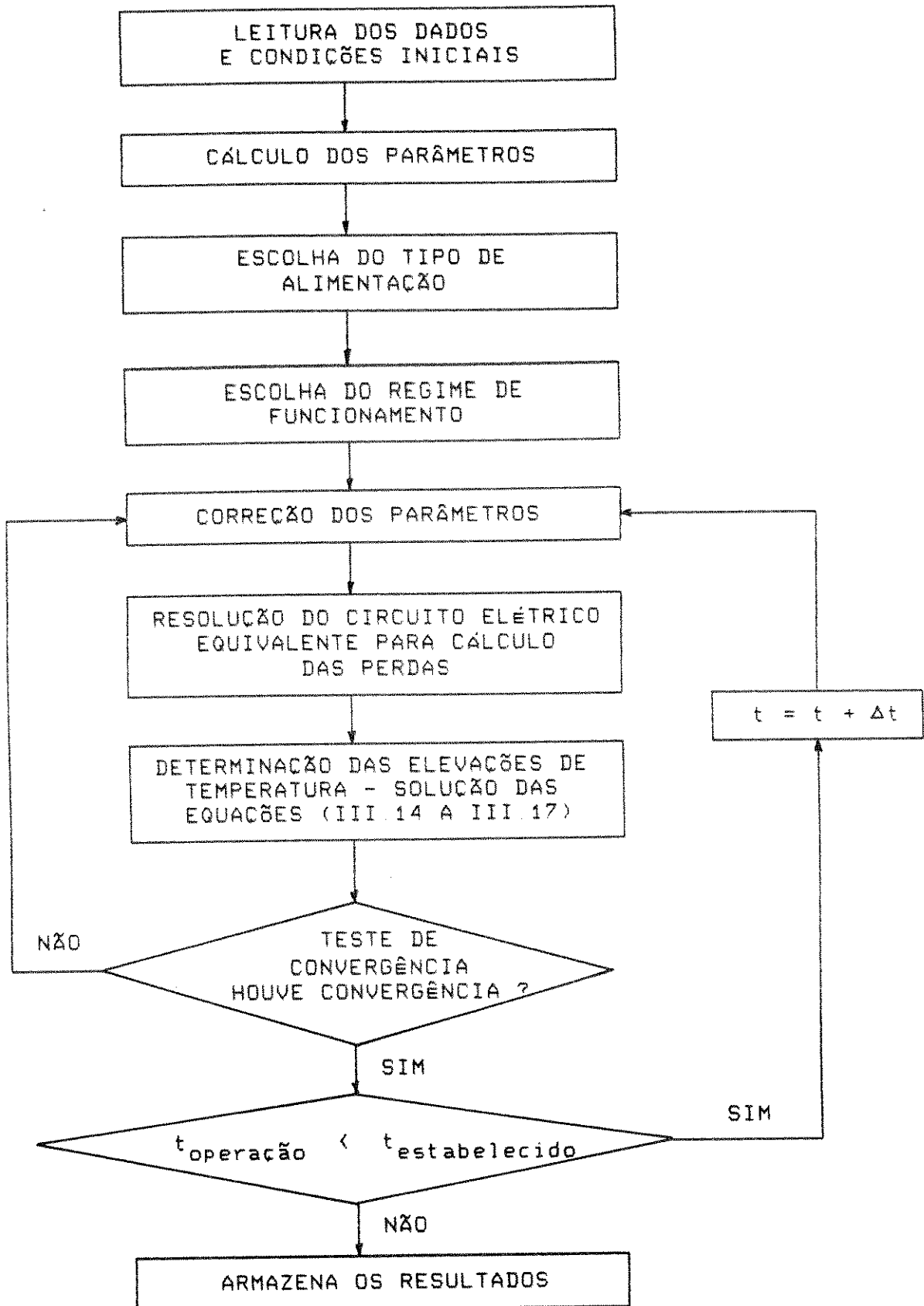
O fator de potência pode ser calculado por :

$$f_p = \frac{P_{et}}{3 V_1(1) I_{1t}} \quad (IV.53)$$

As elevações de temperatura nos enrolamentos do motor, quando este é alimentado por um inversor podem ser determinadas resolvendo-se o sistema de equações apresentado anteriormente, utilizando-se as potências dissipadas totais.

IV.5 - DIAGRAMA DE BLOCOS SIMPLIFICADO DO PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO DESEMPENHO ELÉTRICO DO MOTOR DE INDUÇÃO

A resolução das equações do modelo matemático é obtida através de um programa computacional, utilizando-se a linguagem Pascal. As subrotinas (procedures) utilizadas foram desenvolvidas de forma que o programa fosse o mais funcional possível. Estas subrotinas são apresentadas no próximo item e as listagens das principais são apresentadas no apêndice A.



IV.6. - APRESENTAÇÃO DAS SUBROTINAS UTILIZADAS NO PROGRAMA

IV.6.1 - Subrotina LE_DADOS

Armazena os dados de entrada a serem utilizados para a determinação dos parâmetros dos circuitos térmicos e do circuito elétrico equivalente do motor. Esses dados são :

- P_{cv} - potência mecânica (CV)
- V_n - tensão de linha nominal (V)
- I_n - corrente de linha nominal (A)
- n_n - velocidade nominal (rpm)
- C_p - conjugado de partida (pu)
- C_m - conjugado máximo (pu)
- I_p - corrente de partida (pu)
- η_n - rendimento nominal
- F_{pn} - fator de potência nominal
- f - frequência nominal (Hz)
- J_t - momento de inércia total (kgm^2)
- p - número de polos
- Lig - tipo de ligação (Δ/Y)
- y - relação das reatância de dispersão do enrolamento do estator e do rotor
- P_{rot} - perdas rotacionais (W)
- $R_{1(\theta_r)}$ - resistência do enrolamento do estator à temperatura de referência de 20°C (Ω)

- α_e - fator que define a variação da resistência do enrolamento do estator com a temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 α_r - fator que define a variação da resistência do enrolamento do rotor com a temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 m_{ee} - massa do condutor do enrolamento do estator (kg)
 m_{ne} - massa do núcleo do estator (kg)
 m_{er} - massa do condutor do enrolamento do rotor (kg)
 m_{nr} - massa do núcleo do rotor (kg)
 C_{ee} - calor específico do condutor enrolamento do estator
 C_{ne} - calor específico do núcleo do estator ($\text{W}/^{\circ}\text{C s kg}$)
 C_{er} - calor específico do condutor do enrolamento do rotor
 C_{nr} - calor específico do núcleo do rotor ($\text{W}/^{\circ}\text{C s kg}$)
 θ_{isol} - elevação média de temperatura do enrolamento do estator ($^{\circ}\text{C}$)
 θ_{adm1} - elevação de temperatura admissível para o enrolamento do rotor
 θ_{adm2} - elevação de temperatura admissível para o núcleo do rotor ($^{\circ}\text{C}$)
 $\Delta\theta_e$ - diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a elevação média de temperatura do enrolamento do estator

IV.6.2 - Subrotina DET_PARAMETROS

Determina os parâmetros dos circuitos térmicos e do circuito elétrico equivalente do motor, utilizando as equações dos capítulos II e III .

IV.6.3 - Subrotina REG_FUNCIONAMENTO

Escolhe o regime de funcionamento do motor, conforme os regimes tipos definidos em [4]. Neste trabalho utiliza-se os seguintes regimes de funcionamento :

S1 - regime contínuo

S2 - regime de tempo limitado

S4 - regime intermitente periódico com partidas

S5 - regime intermitente periódico com freamento elétrico

S6 - regime de funcionamento contínuo com carga intermitente

S7 - regime de funcionamento contínuo com freamento elétrico

Além destes regimes, utiliza-se ainda, outros regimes de funcionamento para permitir uma análise mais detalhada do comportamento do motor. Estes regimes não são especificados em [4] e são descritos a seguir :

- regime de funcionamento com variação de velocidade a conjugado constante (inversor)
- partidas sucessivas em carga com ou sem tempo de repouso
- rotor bloqueado

IV.6.4 - Subrotina TIPO_ALIMENTACAO

Escolhe o tipo de alimentação do motor, senoidal ou não senoidal. No caso de alimentação por tensão senoidal, o circuito

elétrico equivalente é resolvido de forma normal. Para alimentação não senoidal, necessita-se dos valores das componentes harmônicas da tensão de entrada. O circuito elétrico equivalente é resolvido para cada uma das componentes harmônicas com a determinação dos parâmetros que variam com a frequência e com o escorregamento. O princípio da superposição para a determinação das grandezas do motor é utilizado.

IV.6.5 - Subrotina PARTIDA

Determina as grandezas elétricas e mecânicas do motor através da resolução do circuito elétrico equivalente, durante o processo de partida.

Definido o valor do intervalo de tempo Δt , resolve-se o circuito elétrico equivalente obtendo-se as potências dissipadas para a condição inicial ou seja $s = 1$. Com os valores das potências dissipadas, calcula-se as elevações de temperatura. Após a determinação das elevações de temperatura, compara-se estes valores com os valores do passo anterior. Este teste é feito para se verificar a convergência dos resultados. Se houver convergência, calcula-se o novo valor do escorregamento para o próximo passo de integração e repete-se o procedimento até que a diferença entre o conjugado desenvolvido pelo motor e o conjugado de carga seja menor do que uma tolerância especificada, indicando que o motor está em regime permanente. Se não houver convergência, resolve-se novamente o circuito elétrico equivalente e determina-se os novos valores das elevações de temperatura até que as diferenças entre os novos

valores de temperatura e os do passo anterior sejam menores que a tolerância especificada.

IV.6.6 - Subrotina RES_CIRC_EQUIV

Resolve o circuito elétrico equivalente para um determinado escorregamento, calculando as correntes no circuito. Com estes valores, calcula-se as potências dissipadas que são utilizadas para a determinação das elevações de temperatura. São calculados também, a potência de entrada, o conjugado desenvolvido, a velocidade, a potência mecânica, o rendimento e o fator de potência.

Nesta subrotina também são corrigidos os parâmetros do motor devido ao Efeito Pelicular e à temperatura.

Na resolução do circuito elétrico equivalente utiliza-se outras subrotinas, desenvolvidas para possibilitar as operações com números complexos.

IV.6.7 - Subrotina DET_TEMPERATURA

Calcula as elevações de temperatura através das equações (IV.1) a (IV.4) para cada intervalo de tempo de integração Δt . Com os valores das elevações de temperatura nos enrolamentos do estator e do rotor corrige-se os valores de suas resistências na subrotina RES_CIRC_EQUIV. Esta subrotina também corrige os parâmetros do circuito térmico que variam com a ventilação do motor, através das equações (III.41) e (III.42).

IV.6.8 - Subrotina DET_ESCORREGAMENTO

Calcula o valor do escorregamento antes de cada passo de integração. Este cálculo é necessário para se definir o novo ponto de operação em regime permanente, uma vez que com a correção dos parâmetros com a temperatura, o conjugado desenvolvido pelo motor tem seu valor alterado.

No cálculo do valor do escorregamento conforme desenvolvimento no item IV.3.2 , utiliza-se os valores das resistências dos enrolamentos do estator e do rotor já corrigidos com as elevações de temperatura.

IV.6.9 - Subrotina FRENACAO

Esta subrotina é praticamente igual à subrotina partida, diferenciando apenas no cálculo do escorregamento onde é utilizado o sinal (+) na equação (IV.17) e na indicação do término do processo. Na partida compara-se os conjugados desenvolvido e de carga para verificar se o motor chegou ao regime permanente. Na frenação verifica-se o instante em que a velocidade torna-se nula.

CAPÍTULO V

VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO TÉRMICO E ELÉTRICO DO MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA ATRAVÉS DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

V.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se resultados experimentais sobre o comportamento térmico de um motor de indução. Estes resultados foram obtidos, submetendo-se um motor aos mais diversos regimes de funcionamento, com alimentação senoidal e com alimentação não senoidal (através de um inversor de tensão de onda quadrada).

As temperaturas foram medidas com sensores de temperatura colocados em diversas partes da máquina.

Como carga foi utilizado um ventilador, com controle de ar de entrada, possibilitando desta forma a variação da carga no eixo do motor. Estes resultados são comparados com os resultados equivalentes obtidos através de simulações utilizando o modelo matemático térmico e elétrico para o motor de indução com a finalidade de validar experimentalmente esse modelo.

V.2 - SISTEMA EXPERIMENTAL

Na figura 5.1, apresenta-se um diagrama esquemático do sistema experimental utilizado para se obter os dados necessários

para análise do comportamento térmico e do desempenho do motor de indução.

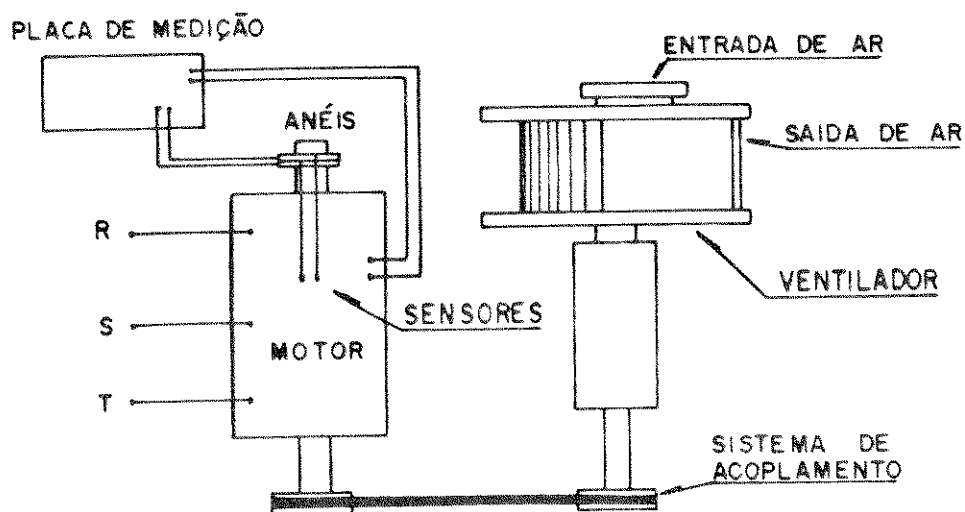


figura 5.1 - Diagrama esquemático do sistema experimental

O sistema é composto por um motor de indução trifásico com rotor em gaiola de 3 CV (apêndice B), acoplado através de polias e correia a um ventilador tubular. Na entrada de ar do ventilador foi instalado um dispositivo que permite o controle da vazão de ar, o que possibilita a variação da potência mecânica solicitada ao motor.

Inicialmente, ajustou-se a abertura da entrada de ar do ventilador, de forma que o motor, alimentado por tensão e frequência nominais, absorvesse da rede uma corrente de valor igual à sua corrente nominal. Esta abertura foi mantida constante em todos os ensaios.

Nos ensaios realizados, utilizou-se além da alimentação através da rede, um inversor de tensão de onda quadrada. Na figura 5.2, apresenta-se um diagrama simplificado do inversor.

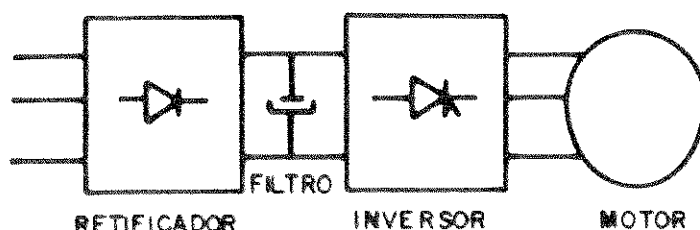


figura 5.2 - Diagrama simplificado do inversor

O inversor utilizado é um conversor da linha Altivar da Telemecanique (apêndice B). Estes conversores foram concebidos especialmente para o comando de motores de indução normalizados, fornecendo-lhes tensão e frequência variáveis a partir de uma rede normal de modo que a relação V/f seja constante. Este inversor opera segundo o princípio da modulação de tensão por modulação de largura de pulso.

A medição de temperatura foi feita utilizando um método desenvolvido exclusivamente para este fim, no qual as temperaturas nos núcleos do estator e no rotor da máquina são obtidas através de sensores.

O sensor utilizado apresenta uma curva característica reta passando pelo ponto $(298.2 \mu A, 298.2 ^\circ K)$. O sinal de temperatura é

convertido em sinal elétrico. A obtenção das temperaturas é feita através da medição da corrente, conforme esquema mostrado na figura 5.3 .

O sensor de temperatura é um circuito integrado (AD590-Intersil-GE) com encapsulamento metálico que produz uma corrente de saída proporcional à temperatura absoluta. Este sensor é adequado para situações onde a distância entre a sua localização e o circuito de leitura é considerável. Isto é possível, pois o dispositivo é insensível às quedas de tensão ao longo dos condutores, devido à sua característica de possuir uma alta impedância para a corrente de saída.

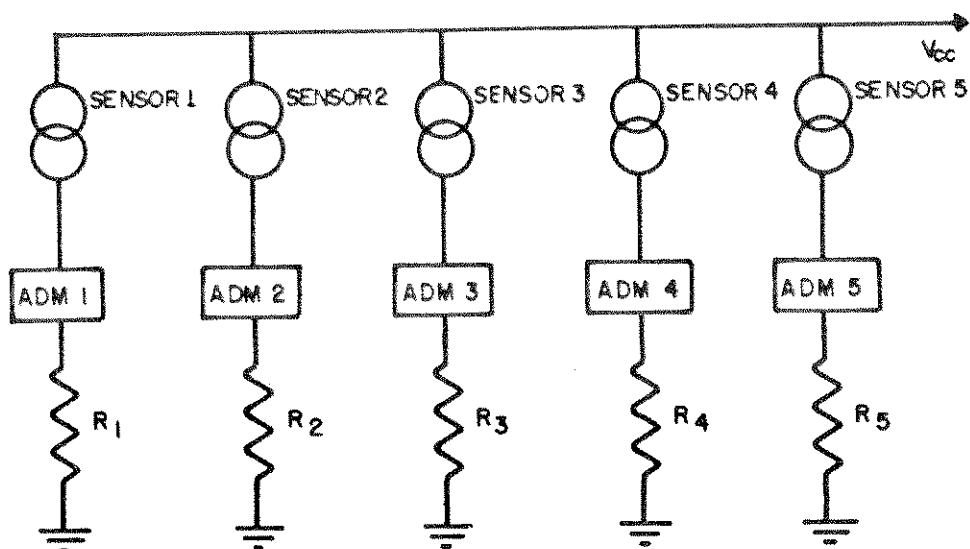


figura 5.3 - Circuito de medição de temperatura

A seguir apresenta-se a localização dos sensores no motor.

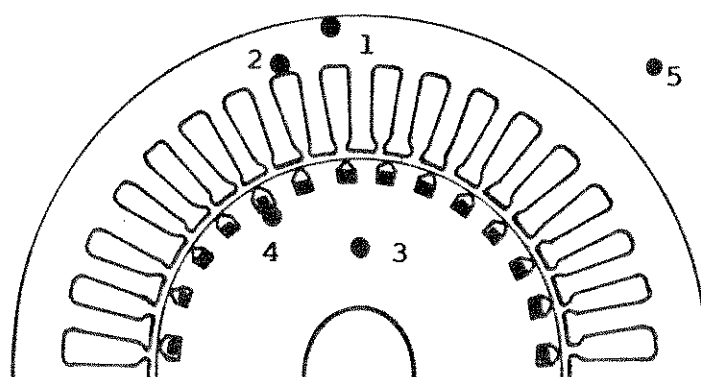


figura 5.4 - Localização dos sensores de temperatura no motor

Na figura 5.4, pode-se observar a localização dos sensores de temperatura no estator e no rotor do motor.

No estator foram colocados dois sensores, um na superfície externa do pacote de chapas (1) e um no interior do pacote (2), logo acima de uma das ranhuras. Não foi possível a colocação de um sensor dentro da ranhura devido ao fato de que o motor utilizado nos ensaios possui ranhuras estreitas e não havia espaço suficiente para a colocação.

No rotor também foram colocados dois sensores, um no interior do pacote de chapas (3) e outro também no interior do pacote porém, praticamente em contato com uma das barras do rotor (4). Estes dois sensores são ligados à anéis coletores, instalados no eixo do motor. Os sinais destes sensores são levados à placa de medição através de um conjunto de escovas. Como mencionado anteriormente este tipo de sensor é insensível às quedas de tensão assim, mesmo

que existam pequenas quedas de tensão no conjunto anel-escova, a leitura final da temperatura não será alterada.

V.3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES DO MOTOR DE INDUÇÃO COM ALIMENTAÇÃO SENOIDAL

Alimentando-se o motor através de uma fonte de tensão senoidal, foram realizados ensaios para se obter as elevações de temperatura no mesmo.

Nos ensaios o motor foi submetido aos seguintes regimes de funcionamento :

REGIME CONTÍNUO (S1) - O motor parte sob carga e tensão nominais funcionando em regime contínuo durante 2 horas.

REGIME DE TEMPO LIMITADO (S2) - O motor parte sob carga e tensão nominais funcionando em regime contínuo durante 1 hora, após o que é desligado para que as temperaturas das diversas partes da máquina retornem aos seus valores iniciais. O tempo de repouso é de 2 horas.

REGIME INTERMITENTE PERIÓDICO COM PARTIDAS (S4) - O motor foi submetido a 10 ciclos de operação com uma duração de 15 minutos cada. O fator de duração de ciclo é de 40 %. Este fator define o tempo em que o motor funciona em carga e tensão nominais, em relação ao tempo de duração do ciclo. Para este fator utilizado, o motor funciona 6 minutos em carga e permanece em repouso por 9

minutos.

REGIME DE PARTIDAS SUCESSIVAS - Utiliza-se o regime intermitente periódico com partidas (S4) porém, com um fator duração de ciclo diferente daqueles definidos em [4]. O motor é submetido a 14 ciclos de operação, sendo cada um deles composto por uma partida em carga e tensão nominais, funcionamento durante 1 minuto e repouso de 30 segundos. Este regime é utilizado para se verificar o comportamento do motor quando submetido à uma série de partidas sucessivas.

Para que se possa verificar a validade do modelo matemático proposto, foram realizadas simulações, impondo-se as mesmas condições de funcionamento, quanto aos regimes e condições de carga. Os resultados obtidos nas simulações e nos ensaios, para cada um dos regimes de funcionamento foram colocados em gráficos para que fossem feitas as devidas comparações.

Os resultados apresentados são os de variação das elevações de temperatura do núcleo do estator e do núcleo do rotor, medidas pelos sensores internos aos respectivos núcleos.

Não se apresentam as elevações de temperatura nos enrolamentos em virtude dos sensores não estarem internos aos condutores. É bom lembrar que foram instalados sensores no núcleo, muito próximos aos condutores, apenas para se ter alguma idéia da temperatura dos enrolamentos.

Os resultados experimentais são representados por (+++) e os simulados por (—).

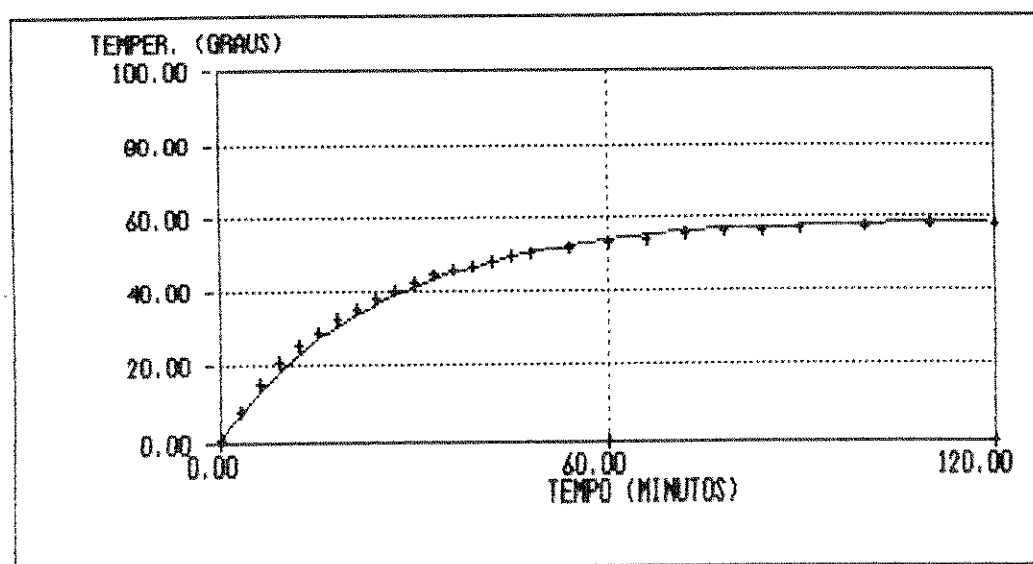


figura 5.5 - Elevação de temperatura no núcleo do estator ,
regime S1, alimentação senoidal

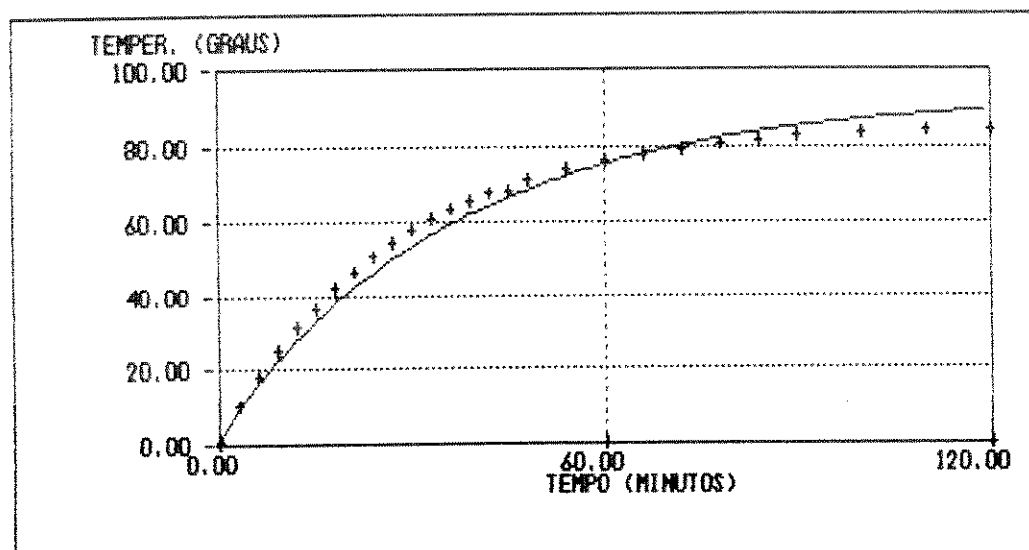


figura 5.6 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor,
regime S1, alimentação senoidal

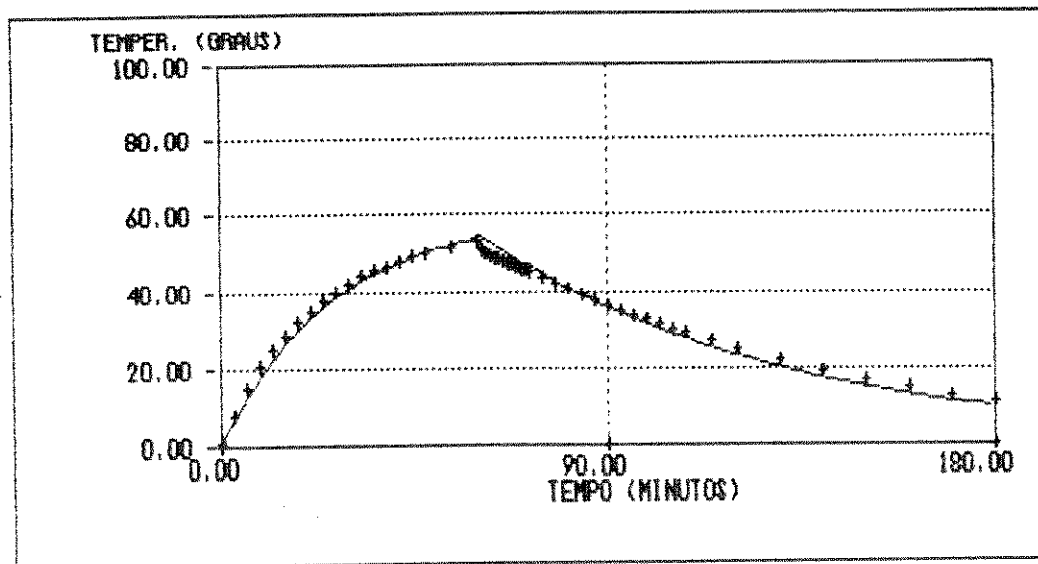


figura 5.7- Elevação de temperatura no núcleo do estator,
regime S2, alimentação senoidal

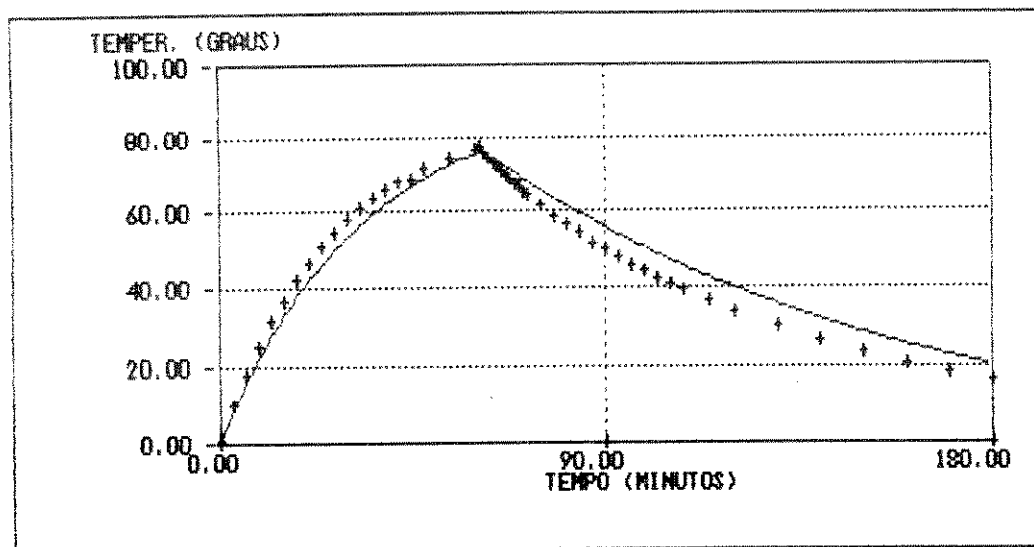


figura 5.8- Elevação de temperatura no núcleo do rotor,
regime S2, alimentação senoidal

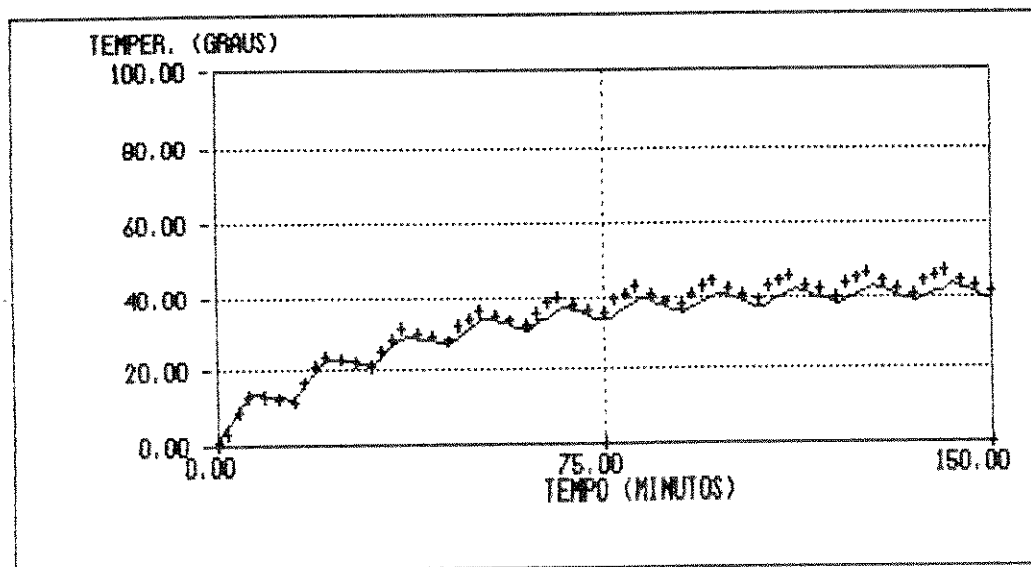


figura 5.9 - Elevação de temperatura no núcleo do estator,
regime S4, alimentação senoidal

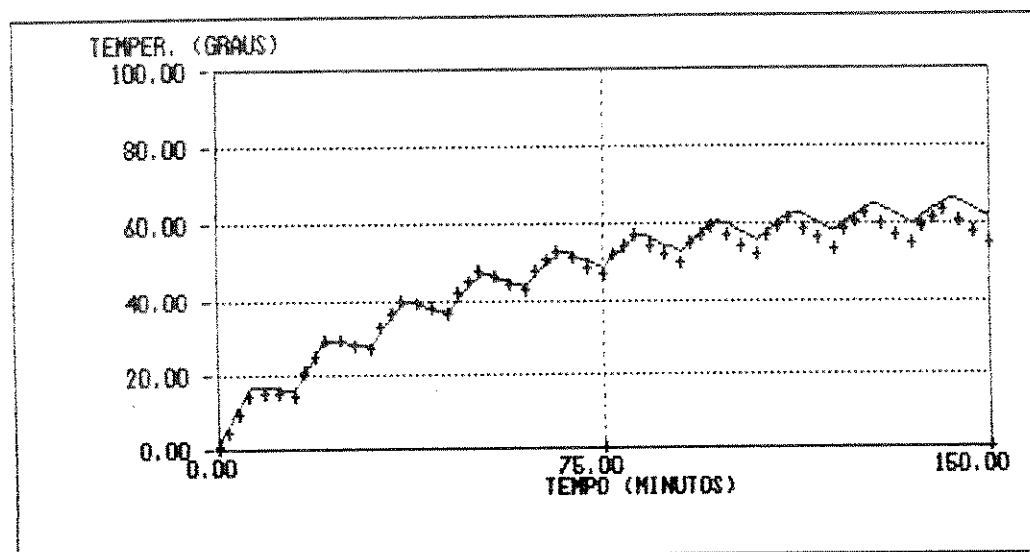


figura 5.10 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor,
regime S4, alimentação senoidal

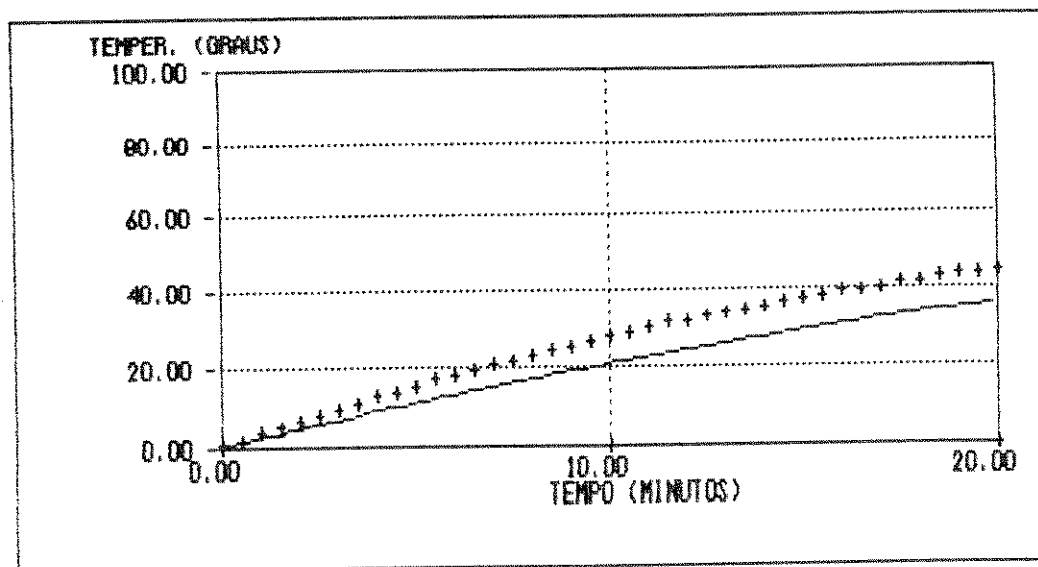


figura 5.11 - Elevação de temperatura no núcleo do estator,
regime de partidas sucessivas, alimentação
senoidal

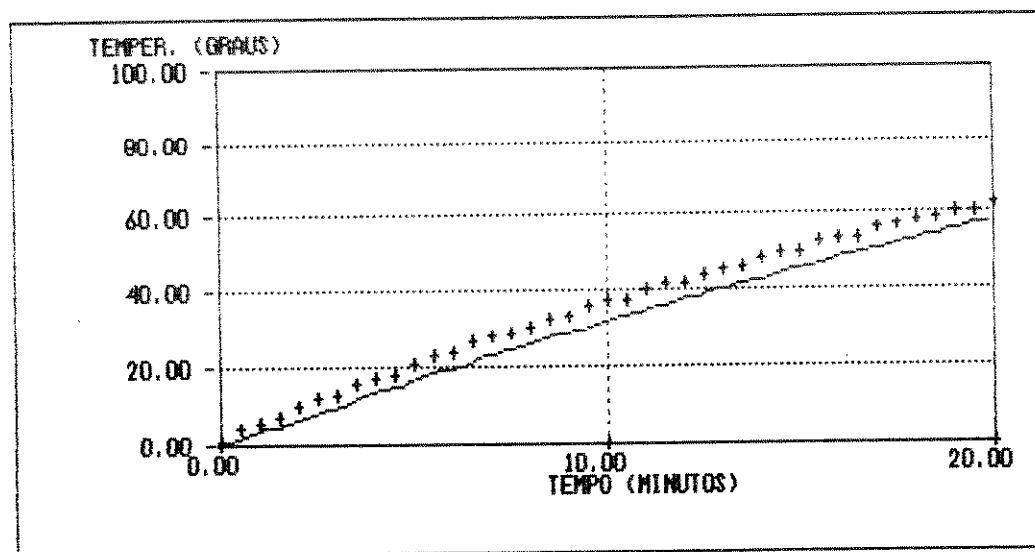


figura 5.12 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor,
regime de partidas sucessivas, alimentação
senoidal

V.4 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM OS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES DO MOTOR DE INDUÇÃO COM ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL

Alimentando-se o motor através de um inversor de tensão de onda quadrada (apêndice B) , foram realizados os ensaios para se obter as elevações de temperatura nos enrolamentos do estator e do rotor do motor. Nestes ensaios o motor foi submetido aos seguintes regimes de funcionamento :

REGIME CONTÍNUO (S1) / 60 Hz - A frequência da tensão de saída do inversor foi ajustada para 60 Hz, com uma tensão de linha de 220 V. O motor parte com carga nominal e funciona em regime contínuo durante 2 horas.

REGIME DE TEMPO LIMITADO (S2) / 60 Hz- Este ensaio foi realizado nas mesmas condições daquelas para alimentação senoidal, ou seja, partida em carga, funcionamento em carga durante 1 hora e permanecendo em repouso por 2 horas.

REGIME CONTÍNUO (S1) / 30 Hz - Ajusta-se a frequência da tensão de saída do inversor para 30 Hz, com uma tensão de linha de 130 V. O motor parte em carga e funciona em regime contínuo durante 2 horas.

REGIME DE FUNCIONAMENTO CONTÍNUO PERIÓDICO COM VARIAÇÃO DE VELOCIDADE - O motor foi submetido a 7 ciclos de operação com duração de 18 minutos cada um, sendo que em cada ciclo o mesmo funciona durante 9 minutos, alimentado por uma tensão de linha de 130 V em 30 Hz e durante 9 minutos, alimentado por uma tensão de 220 V em 60 Hz. A partida é feita em 30 Hz e esta frequência é matida constante até que o motor entre em regime permanente. A partida não foi feita com frequência variável pois o controle de frequência do inversor utilizado nos ensaios é feito manualmente através de um reostato, impossibilitando assim, uma variação contínua da frequência e da tensão.

Da mesma forma que para alimentação senoidal, os resultados das simulações são apresentados juntos com os obtidos nos ensaios.

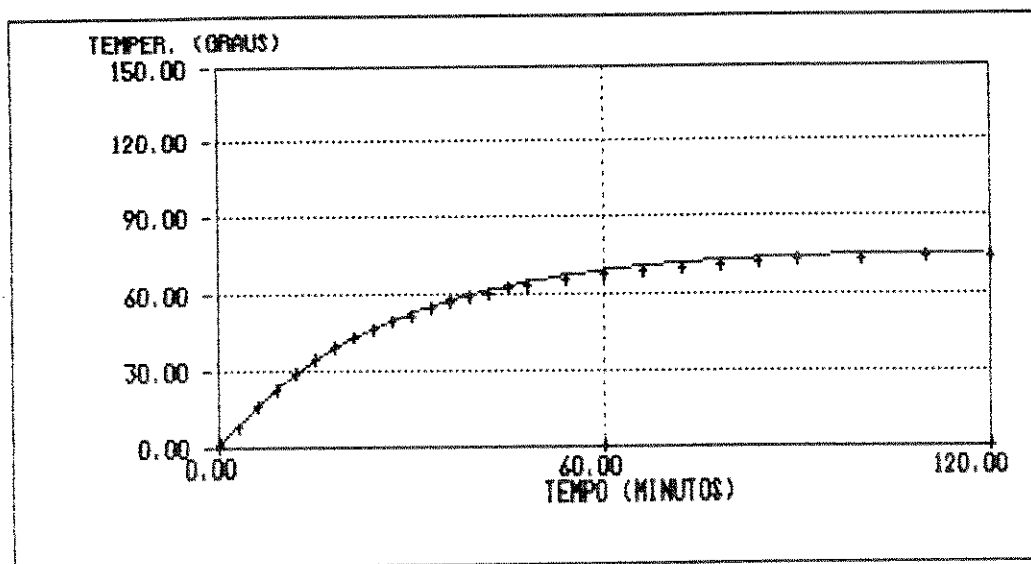


figura 5.13 - Elevação de temperatura no núcleo do estator,
regime S1/60 Hz, alimentação não senoidal

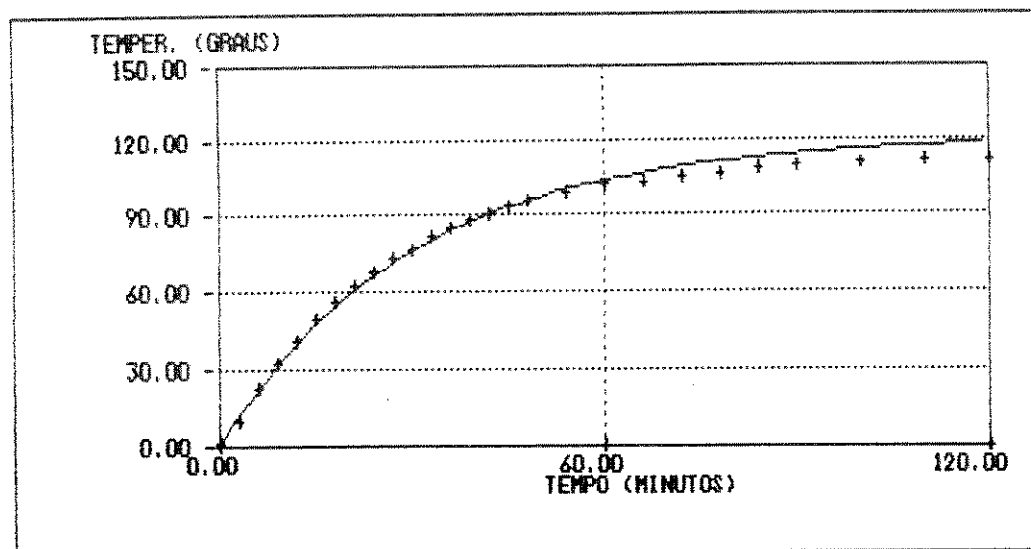


figura 5.14 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor,
regime S1/60 Hz, alimentação não senoidal

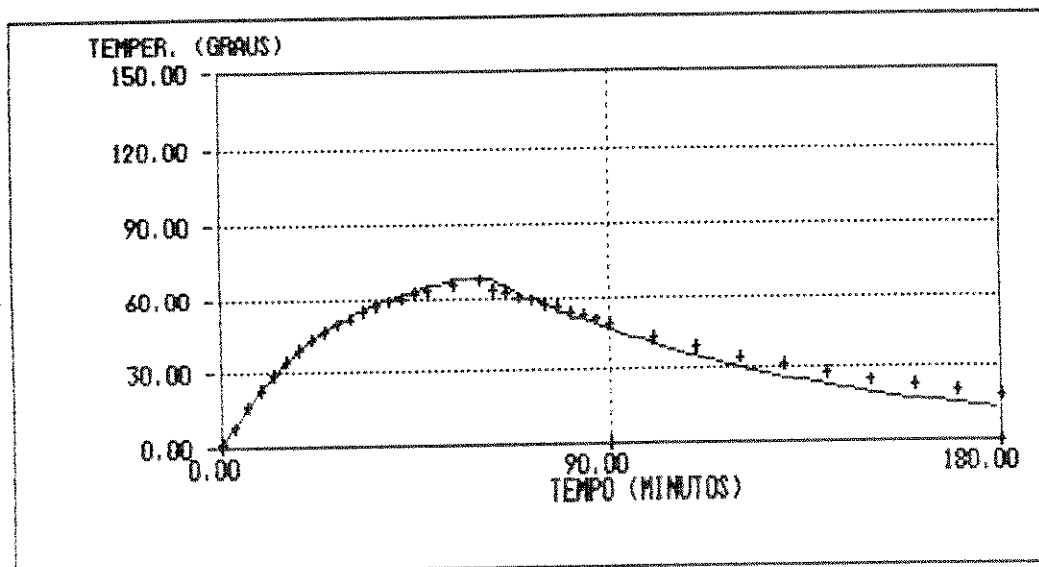


figura 5.15 - Elevação de temperatura no núcleo do estator,
regime S2/60 Hz, alimentação não senoidal

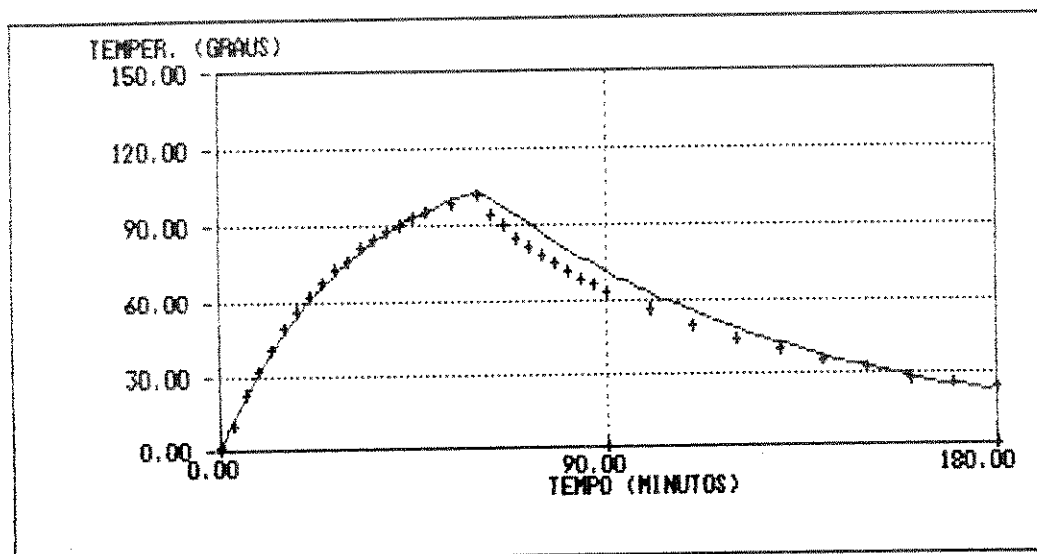


figura 5.16 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor,
regime S2/60 Hz, alimentação não senoidal

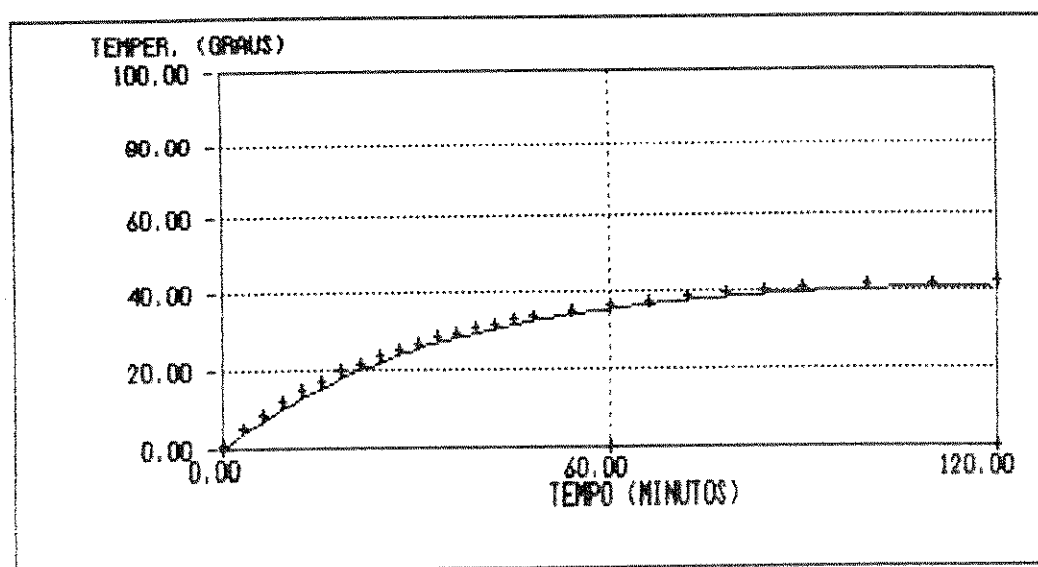


figura 5.17 - Elevação de temperatura no núcleo do estator,
regime S1/30 Hz, alimentação não senoidal

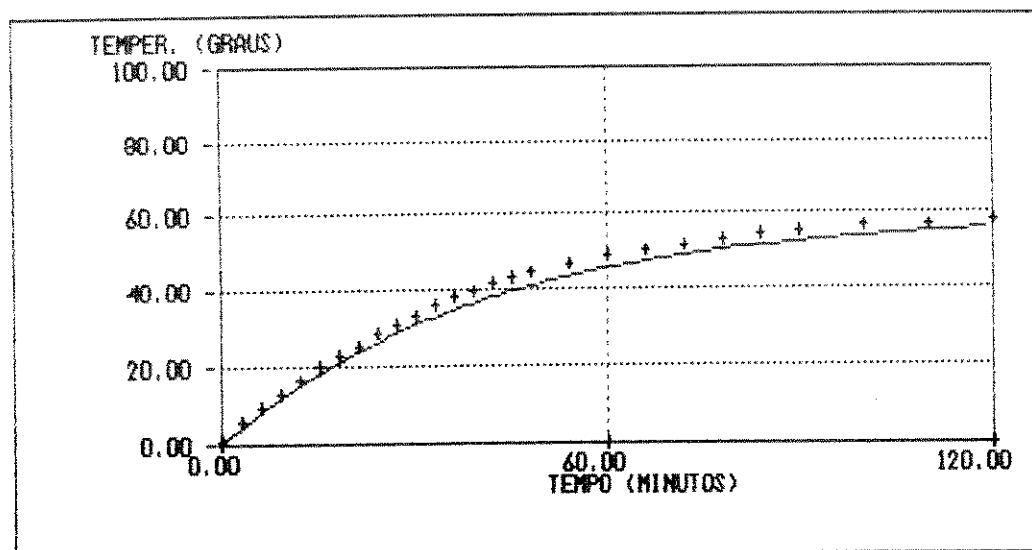


figura 5.18 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor,
regime S1/30 Hz, alimentação não senoidal

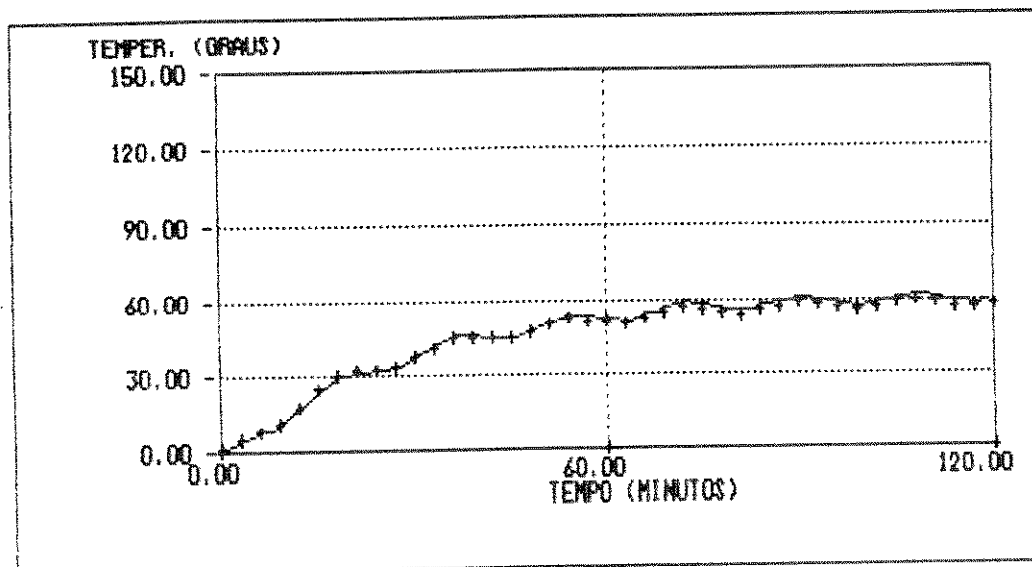


figura 5.19 - Elevação de temperatura no núcleo do estator,
regime de velocidade variável 60/30 Hz,
alimentação não senoidal

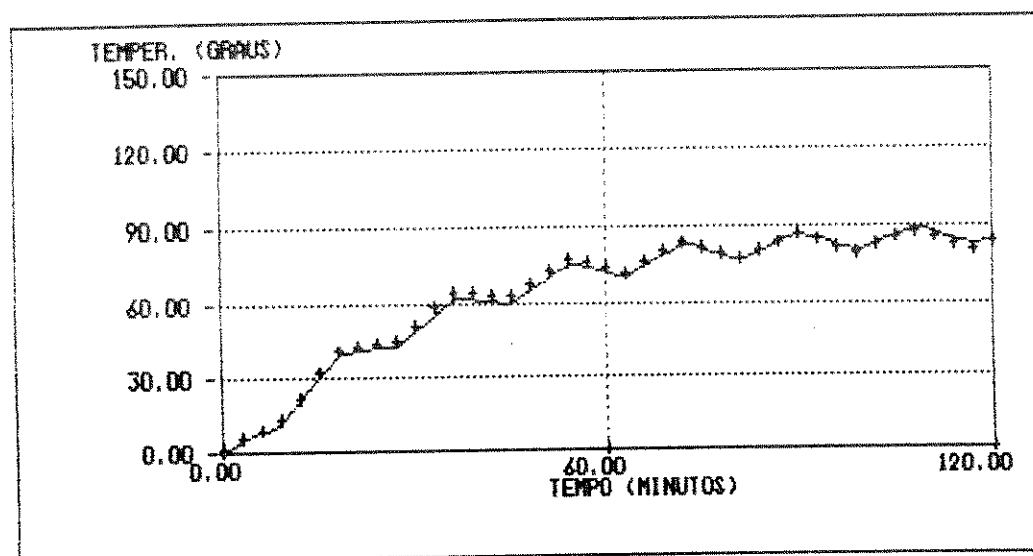
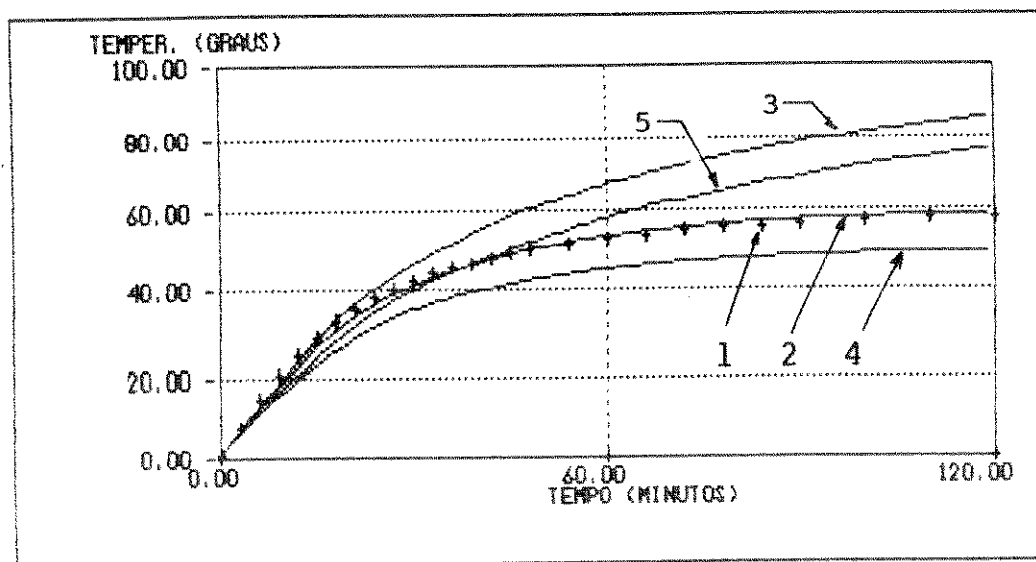
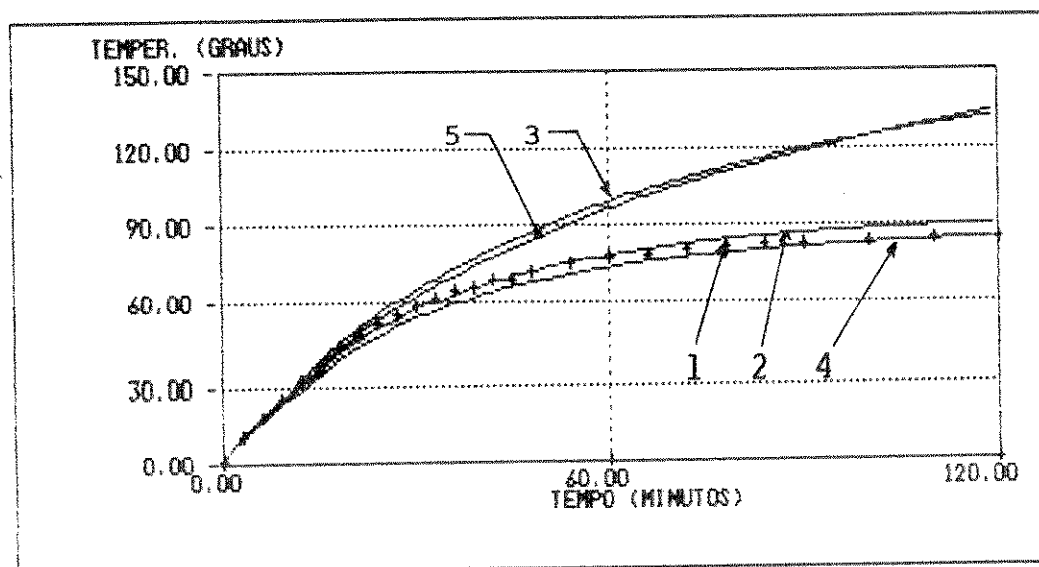


figura 5.20 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor,
regime de velocidade variável 60/30 Hz,
alimentação não senoidal



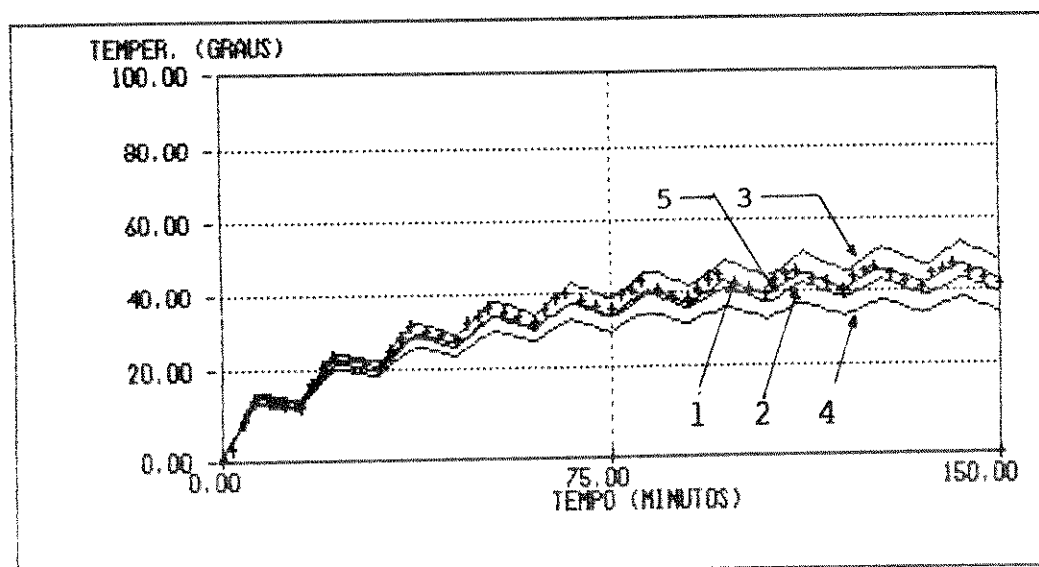
- 1 - resultados experimentais
- 2 - simulação considerando o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas
- 3 - simulação considerando apenas o Efeito Pelicular
- 4 - simulação considerando apenas a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas
- 5 - simulação sem considerar o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas

figura 5.21 - Elevação de temperatura no núcleo do estator, regime S1, alimentação senoidal



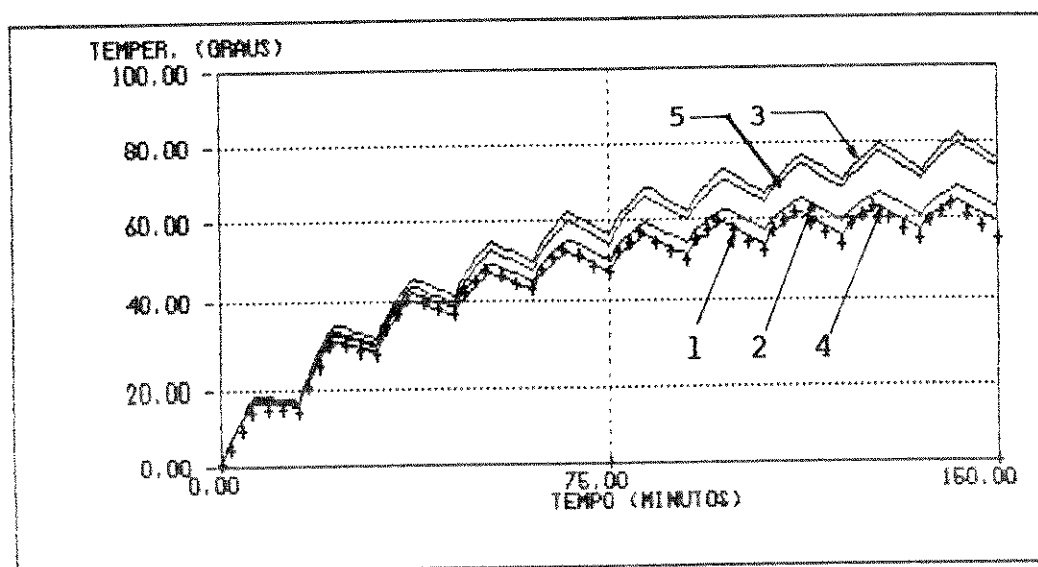
- 1 - resultados experimentais
- 2 - simulação considerando o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas
- 3 - simulação considerando apenas o Efeito Pelicular
- 4 - simulação considerando apenas a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas
- 5 - simulação sem considerar o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas

figura 5.22 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor, regime S1, alimentação senoidal



- 1 - resultados experimentais
- 2 - simulação considerando o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas
- 3 - simulação considerando apenas o Efeito Pelicular
- 4 - simulação considerando apenas a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas
- 5 - simulação sem considerar o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas

figura 5.23 - Elevação de temperatura no núcleo do estator, regime S4, alimentação senoidal



- 1 - resultados experimentais
- 2 - simulação considerando o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas
- 3 - simulação considerando apenas o Efeito Pelicular
- 4 - simulação considerando apenas a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas
- 5 - simulação sem considerar o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas

figura 5.24 - Elevação de temperatura no núcleo do rotor, regime S4, alimentação senoidal

V.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

As figuras 5.5 a 5.20 mostram o comportamento da elevação de temperatura nos núcleos do estator e do rotor, em vários regimes de funcionamento com alimentação senoidal e não senoidal, obtido em laboratório e na simulação com o modelo matemático desenvolvido.

Pode-se observar, nas curvas de elevação de temperatura apresentadas, que a precisão do modelo é boa (máximo de 10 % de erro) em todos os casos, exceto no caso de partidas sucessivas com alimentação senoidal, com intervalos de duração de tempo de funcionamento e tempo de repouso muito pequenos (da ordem de 1 minuto) em que o erro é da ordem de 20 % no estator.

Acredita-se que em casos de regimes de funcionamento intermitentes com tempos de duração de funcionamento e repouso muito pequenos (ordem de 1 minuto) não haja tempo suficiente para o calor se propagar ao longo do núcleo. Neste caso pode-se, pelos resultados obtidos, propor uma correção nas elevações de temperatura obtidas na simulação da ordem de 10% em qualquer caso.

Dessa maneira, o modelo proposto permite especificar motores normais de catálogos tanto para acionamentos com alimentação senoidal como com alimentação não senoidal (inversores).

É bom lembrar que neste trabalho foram utilizados dados de catálogos e informações técnicas de fabricantes generalizadas. Resultados melhores podem ser obtidos com informações mais precisas dos fabricantes ou modelos que considerem dados de projeto.

Como já foi mencionado anteriormente a proposta deste trabalho é a de se poder especificar um motor com uma margem de erro mínima

a partir de dados facilmente disponíveis.

Desta forma, para esses propósitos o modelo matemático térmico e elétrico apresentado para o motor fica validado experimentalmente.

V.6 - NECESSIDADE DE CONSIDERAR O EFEITO PELICULAR E A CORREÇÃO DOS PARÂMETROS DO MOTOR COM A TEMPERATURA

Pelas razões apresentadas no capítulo II tanto a resistência elétrica com a reatância de dispersão do enrolamento do rotor devem ser corrigidas ao longo do tempo, considerando-se o Efeito Pelicular.

Da mesma forma as resistências dos enrolamentos do estator e do rotor devem ser corrigidas, ao longo do tempo, com a temperatura de cada enrolamento.

Como mostrado no item anterior, as considerações matemáticas feitas para considerar ambos os fenômenos permitiram a validação experimental do modelo.

Entretanto, uma dúvida sobre a necessidade de considerar ambos os fenômenos pode surgir.

As figuras 5.21 e 5.22 mostram as elevações de temperatura dos núcleos do estator e do rotor, respectivamente, para o caso de um regime de funcionamento S1 com alimentação senoidal. As figuras 5.23 e 5.24 mostram o mesmo para o regime S4 com alimentação senoidal. Nestas figuras apresentam-se as curvas de elevação de temperatura em função do tempo para as seguintes situações : 1) resultados experimentais, 2) simulação considerando o Efeito

Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas, 3) simulação considerando apenas o Efeito Pelicular, 4) simulação considerando apenas a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas e 5) simulação sem considerar o Efeito Pelicular e a correção dos parâmetros com a variação das temperaturas.

Observa-se o seguinte : as curvas 1 e 2, já analisadas, validam o modelo que considera ambos os fenômenos. As curvas restantes 3, 4 e 5 mostram que a não consideração de um destes fenômenos, ou de ambos, faz os resultados da simulação divergirem dos resultados experimentais. Isso é evidente tendo em vista que ambos os fenômenos existem, são importantes e, quando corretamente considerados no modelo, os resultados da simulação devem estar próximos dos experimentais.

CAPÍTULO VI

SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DO DESEMPENHO ELÉTRICO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA

VI.1 - INTRODUÇÃO

Como forma de aplicação do modelo matemático proposto são feitas simulações para obtenção do comportamento térmico e do desempenho elétrico de dois motores de indução, um de 10 CV e outro de 50 CV (Apêndice B). As simulações são feitas para alimentação através de uma fonte de tensão senoidal e também através de um inversor de tensão de onda quadrada. Em ambos os casos os motores acionarão uma carga hipotética cujo conjugado tem um valor igual ao do conjugado nominal do motor e independe da velocidade.

Com alimentação senoidal são utilizados os seguintes regimes de funcionamento [4] : S1, S2, S4, S5, S7 e além destes são utilizados os regimes de partidas sucessivas e de rotor bloqueado. Com alimentação através do inversor é utilizado o regime contínuo periódico com velocidade variável.

A seguir apresenta-se as características dos regimes que serão utilizados nas simulações :

REGIME CONTÍNUO (S1) :

tempo de funcionamento em carga = 2 horas

REGIME DE TEMPO LIMITADO (S2) :

tempo de funcionamento em carga = 1 hora

tempo em repouso = 2 horas

REGIME INTERMITENTE PERIÓDICO COM PARTIDAS (S4) :

número de ciclos = 10

tempo de duração do ciclo = 10 minutos

fator de duração do ciclo = 60 %

REGIME INTERMITENTE PERIÓDICO COM FREAMENTO ELÉTRICO (S5) :

número de ciclos = 10

tempo de duração do ciclo = 10 minutos

fator de duração do ciclo = 60 %

REGIME DE FUNCIONAMENTO CONTÍNUO COM FREAMENTO ELÉTRICO (S7) :

número de ciclos = 10

tempo de funcionamento em carga = 10 minutos

REGIME DE PARTIDAS SUCESSIVAS :

número de partidas = 20

tempo de funcionamento em carga = 2 minutos

tempo em repouso = 1 minuto

REGIME DE ROTOR BLOQUEADO :

Partida realizada, com o rotor bloqueado, imediatamente após o funcionamento do motor durante 2 horas em regime contínuo com carga e tensão nominais

REGIME CONTÍNUO PERIÓDICO COM VELOCIDADE VARIÁVEL (INVERSOR) :
A partida é realizada com frequência variável até que o motor entre em regime permanente. O conjugado de carga é igual ao nominal do motor e independe da velocidade. O ciclo de operação é composto de funcionamento em carga nominal a 900 rpm e de funcionamento em carga nominal à velocidade nominal

número de ciclos = 10

tempo de funcionamento a 900 rpm = 5 minutos

tempo de funcionamento a ω_n = 5 minutos

tempo em repouso = 5 minutos

São apresentados os seguintes resultados em função do tempo :

- Elevações de temperatura nos enrolamentos e nos núcleos do estator e do rotor
- Corrente de linha
- Velocidade
- Potência dissipada nos enrolamentos do estator e do rotor
- Resistências do estator e do rotor

Para o regime (S1), apresenta-se também os resultados fornecidos pelo fabricante, que são comparados com os resultados obtidos nas simulações.

Os resultados fornecidos pelo fabricante foram obtidos em ensaio de elevação de temperatura à potência constante durante 2 horas e as comparações foram feitas com os resultados ao final

deste tempo de duração.

VI.2 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MOTOR DE 10 CV COM ALIMENTAÇÃO SENOIDAL

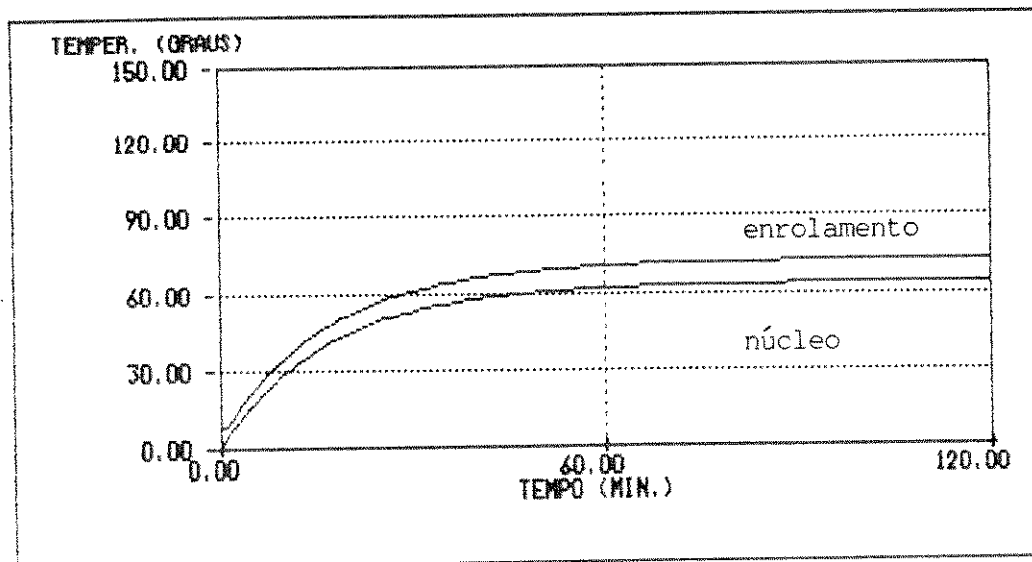


figura 6.1 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S1, motor de 10 CV, com alimentação senoidal

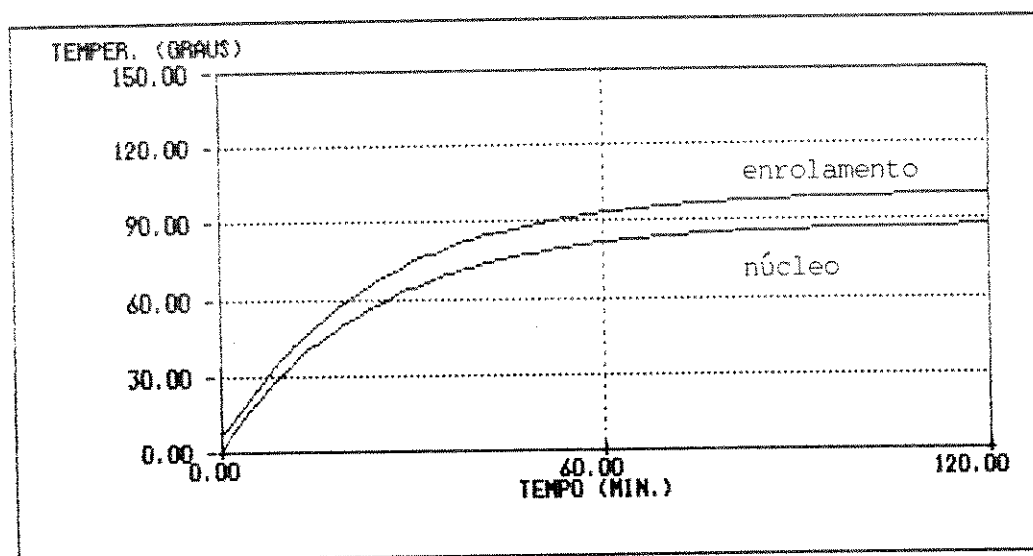


figura 6.2 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S1, motor de 10 CV, com alimentação senoidal

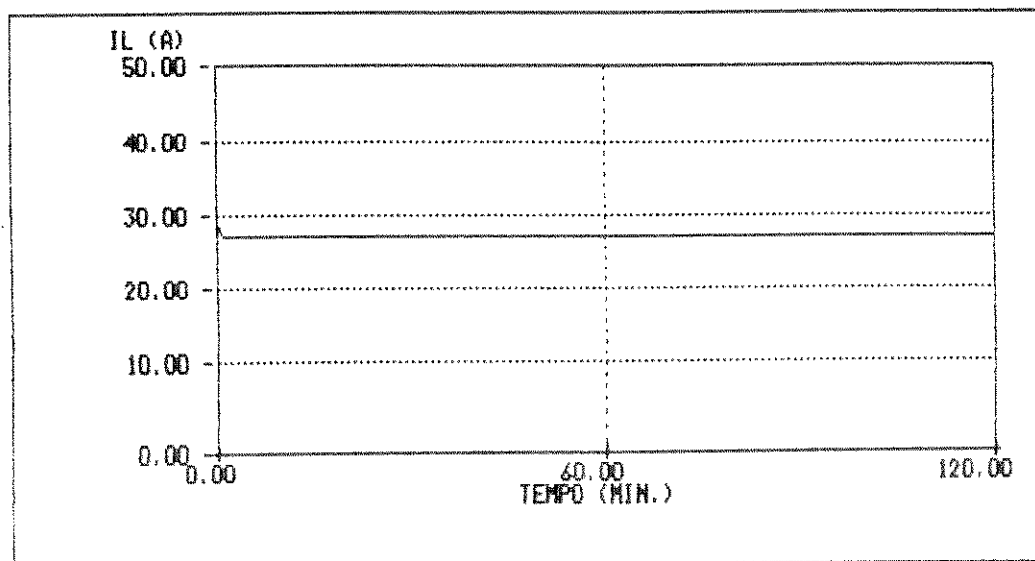


figura 6.3 - Corrente de linha , regime S1, motor de 10 CV,
alimentação senoidal

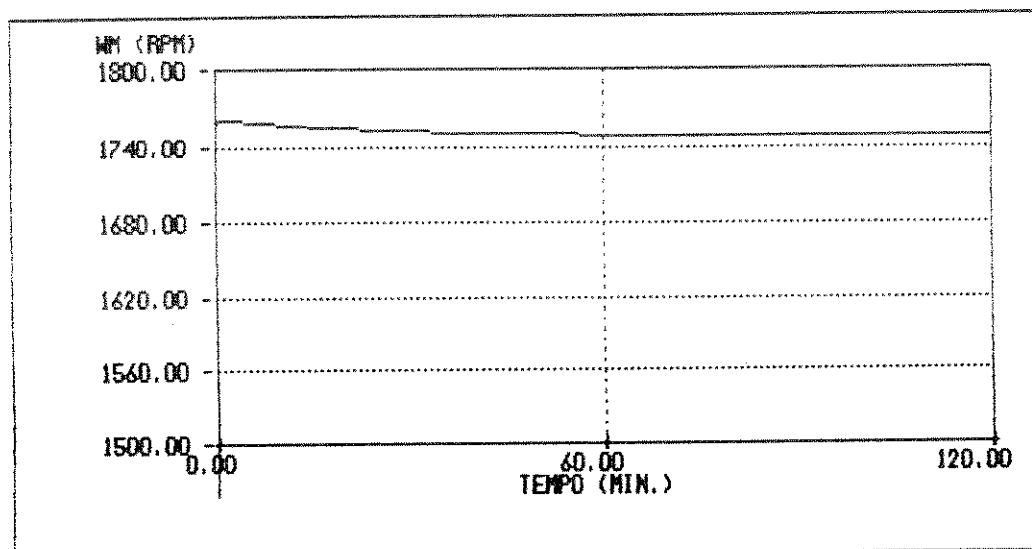


figura 6.4 - velocidade do motor, regime S1, motor de 10 CV,
alimentação senoidal

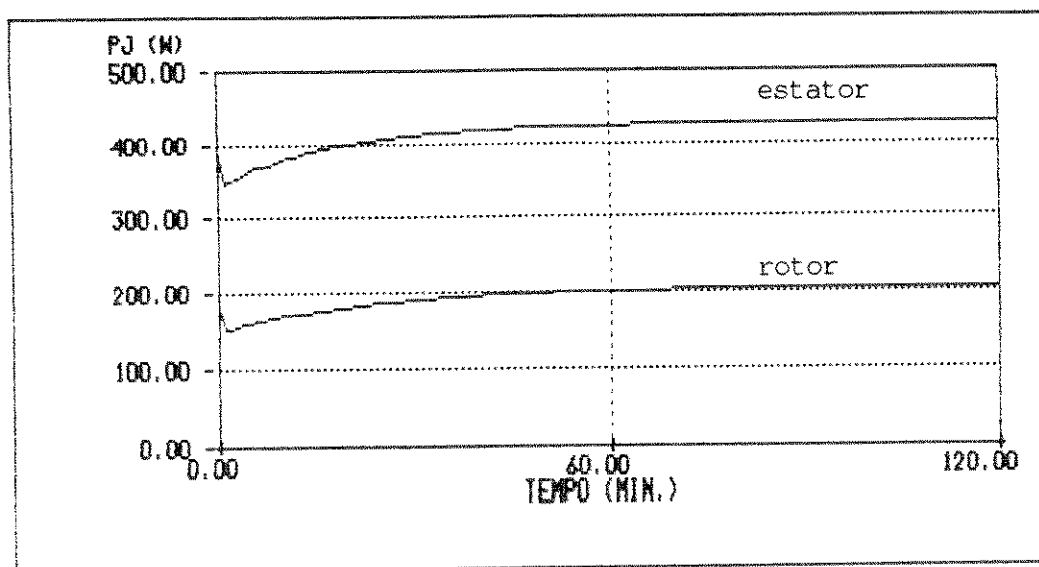


figura 6.5 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime S1, motor de 10 CV, alimentação senoidal

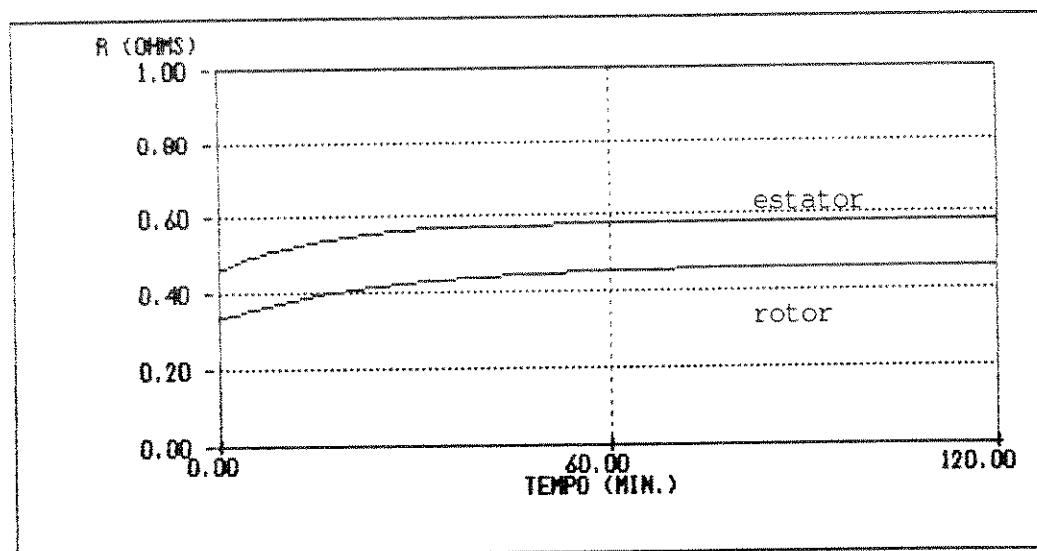


figura 6.6 - Resistências dos enrolamentos do estator e do rotor, regime S1, motor de 10 CV, alimentação senoidal

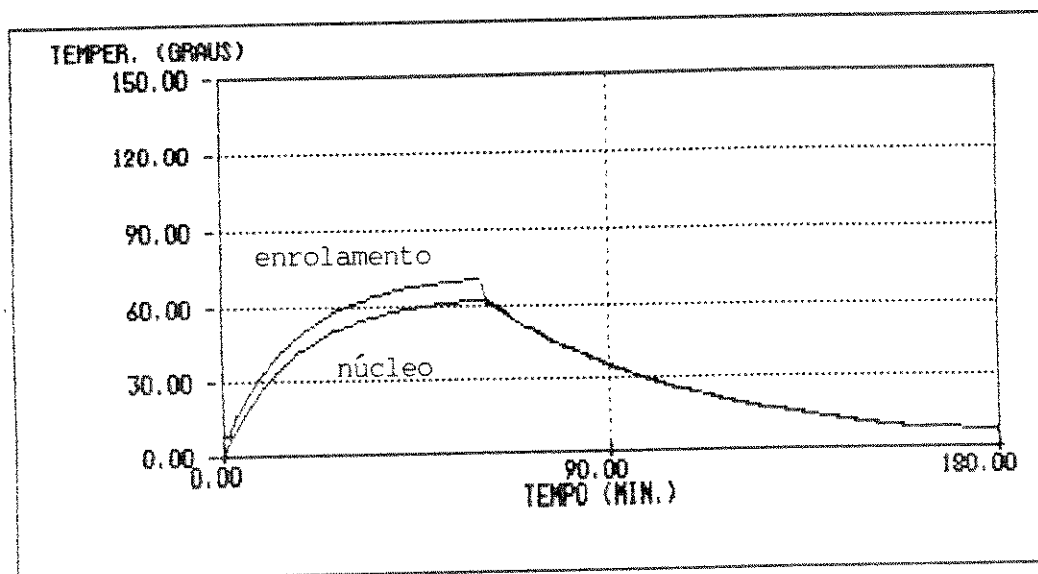


figura 6.7 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S2, motor de 10 CV, alimentação senoidal

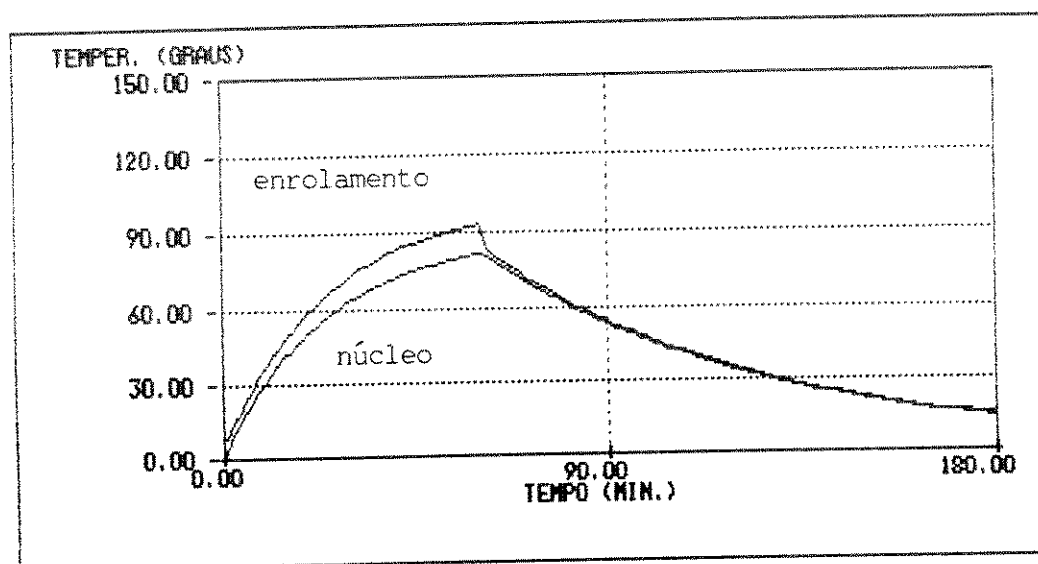


figura 6.8 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S2, motor de 10 CV, alimentação senoidal

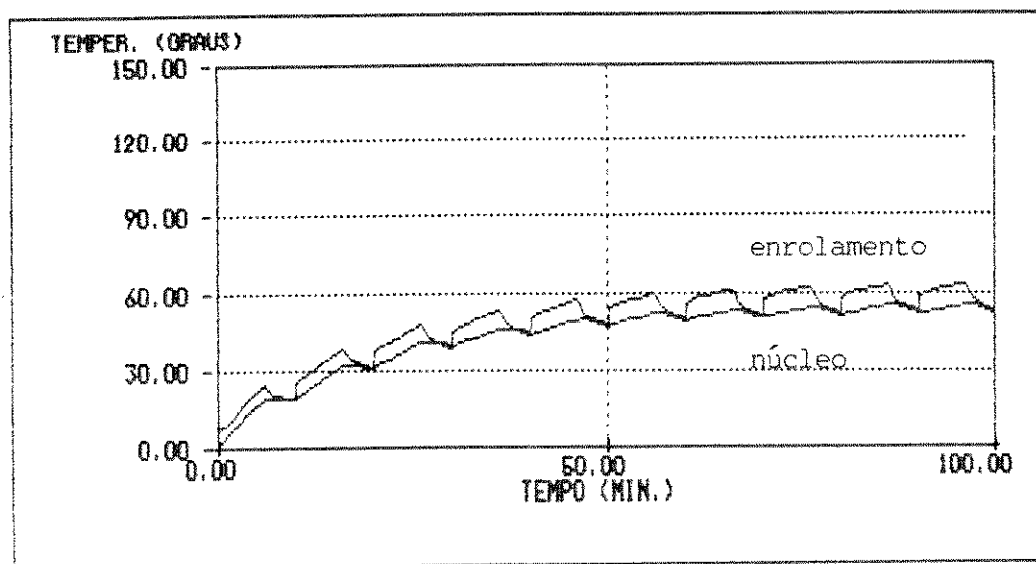


figura 6.10 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S4, motor de 10 CV, alimentação senoidal

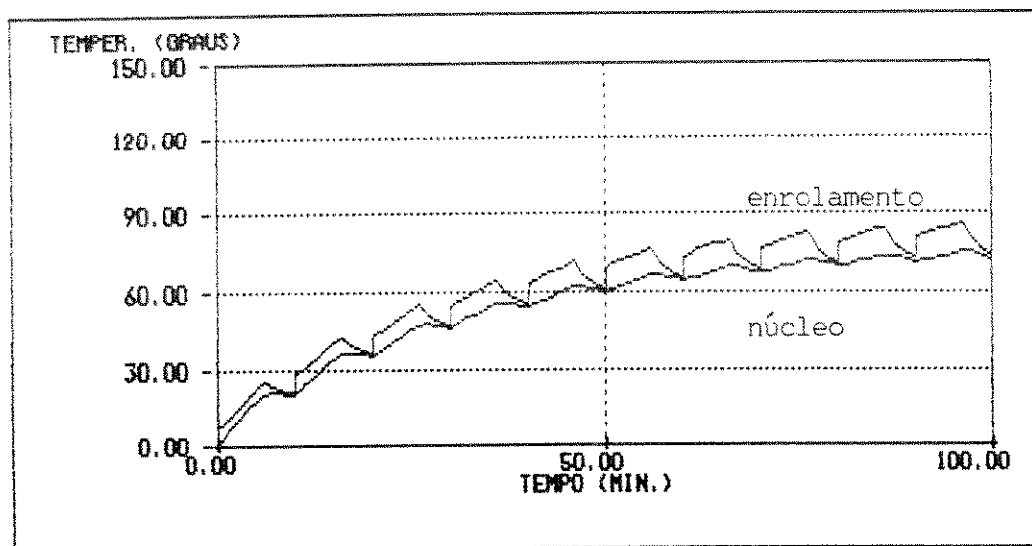


figura 6.11 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S4, motor de 10 CV, alimentação senoidal

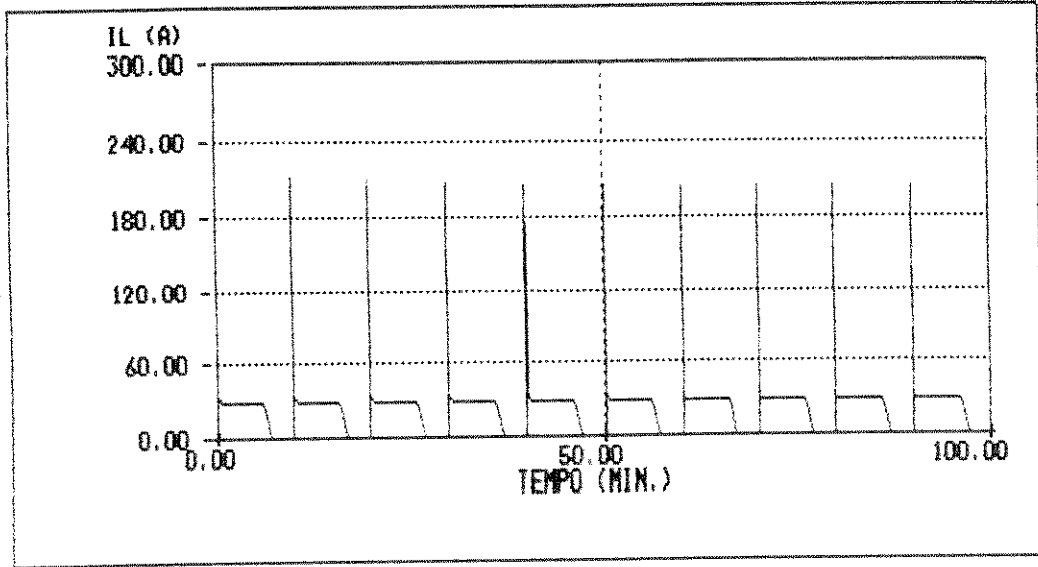


figura 6.12 - Corrente de linha, regime S4, motor de 10 CV, alimentação senoidal

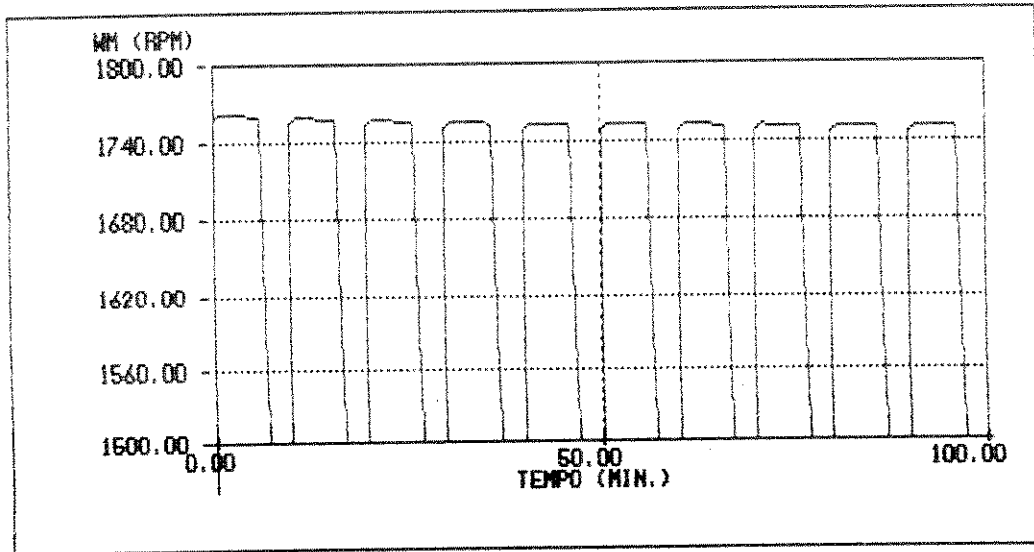


figura 6.13 - velocidade do motor, regime S4, motor de 10 CV, alimentação senoidal

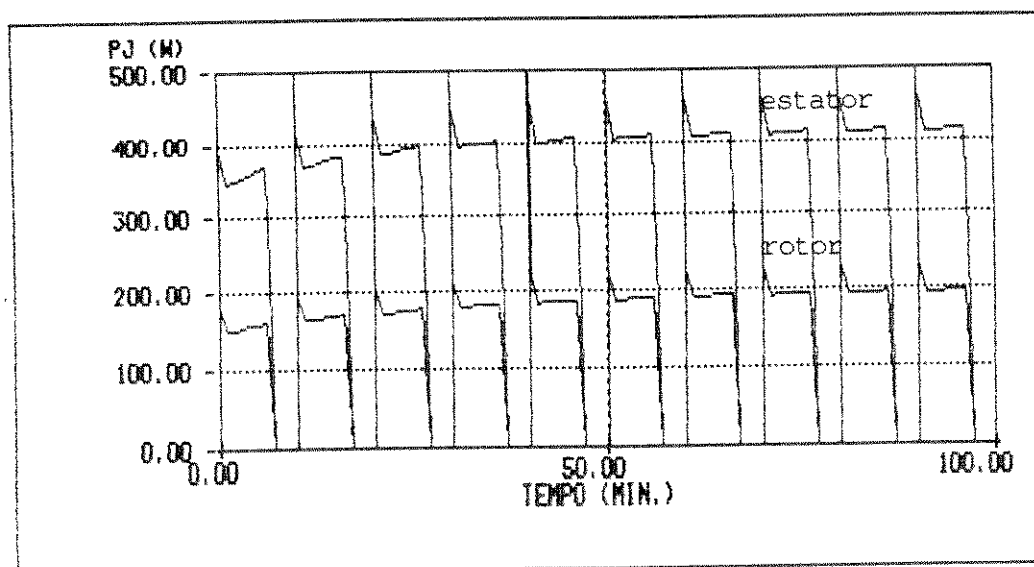


figura 6.14 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime S4, motor de 10 CV, alimentação senoidal

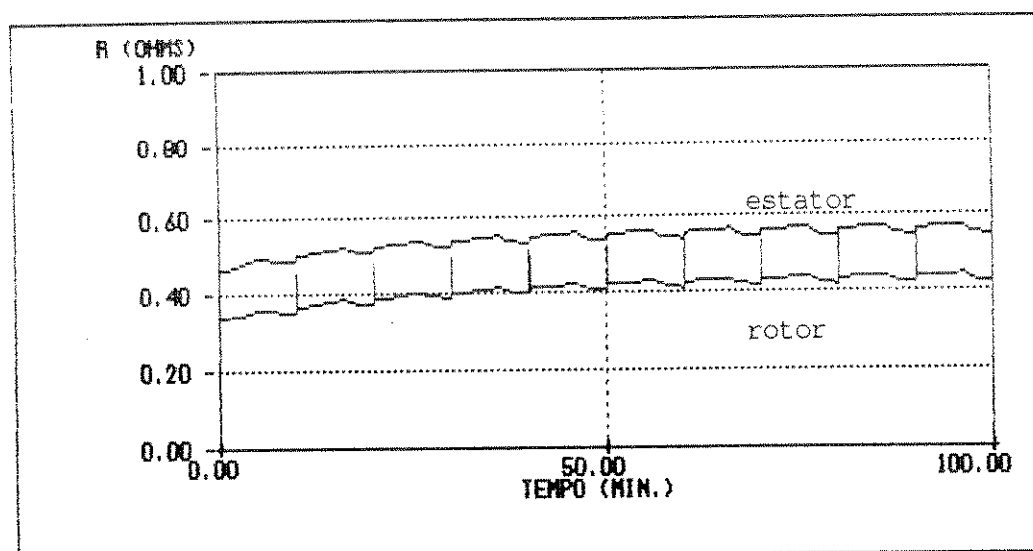


figura 6.15 - Resistências dos enrolamentos do estator e do rotor, regime S4, motor de 10 CV, alimentação senoidal

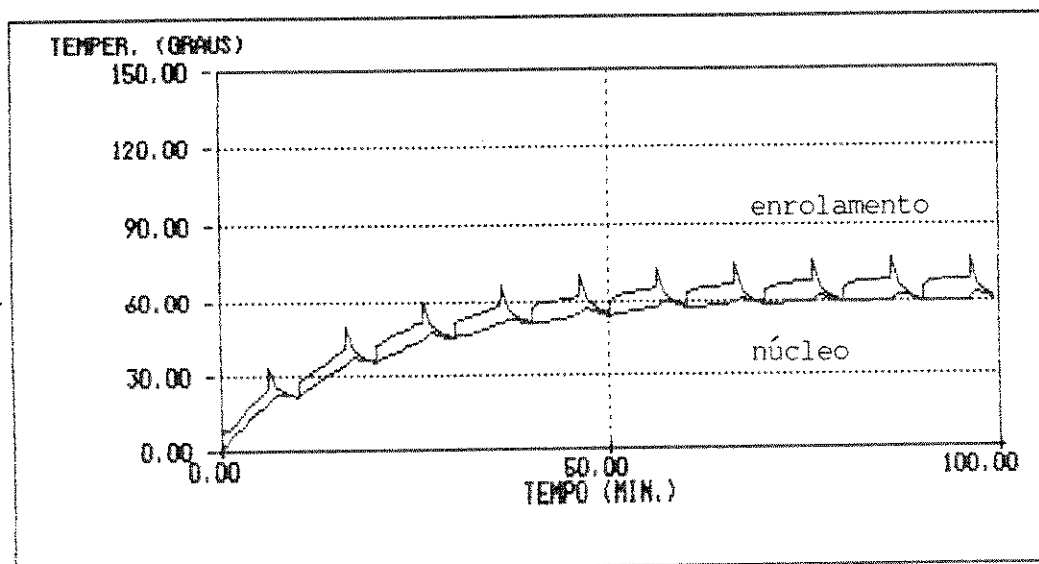


figura 6.16 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S5, motor de 10 CV, alimentação senoidal

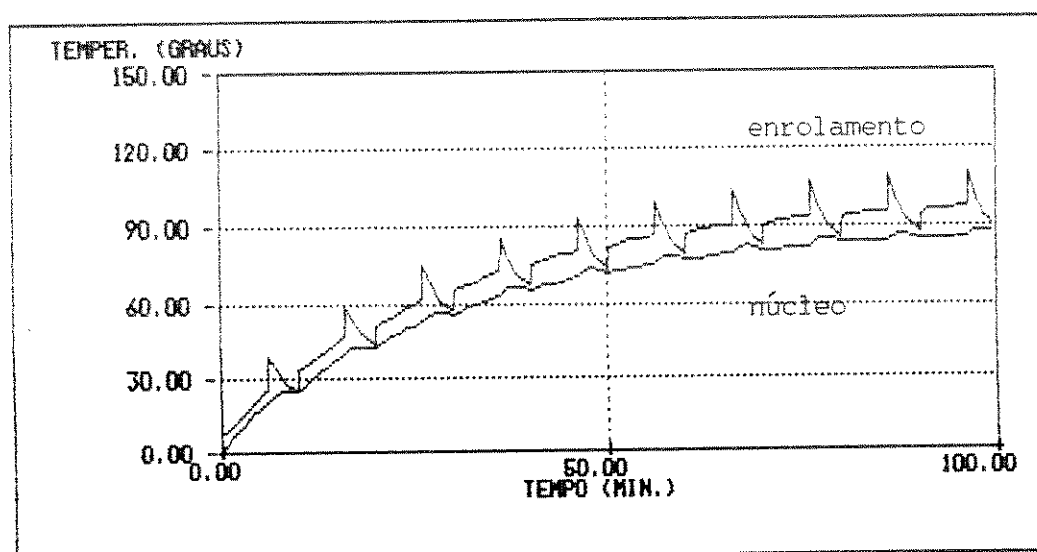


figura 6.17 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S5, motor de 10 CV, alimentação senoidal

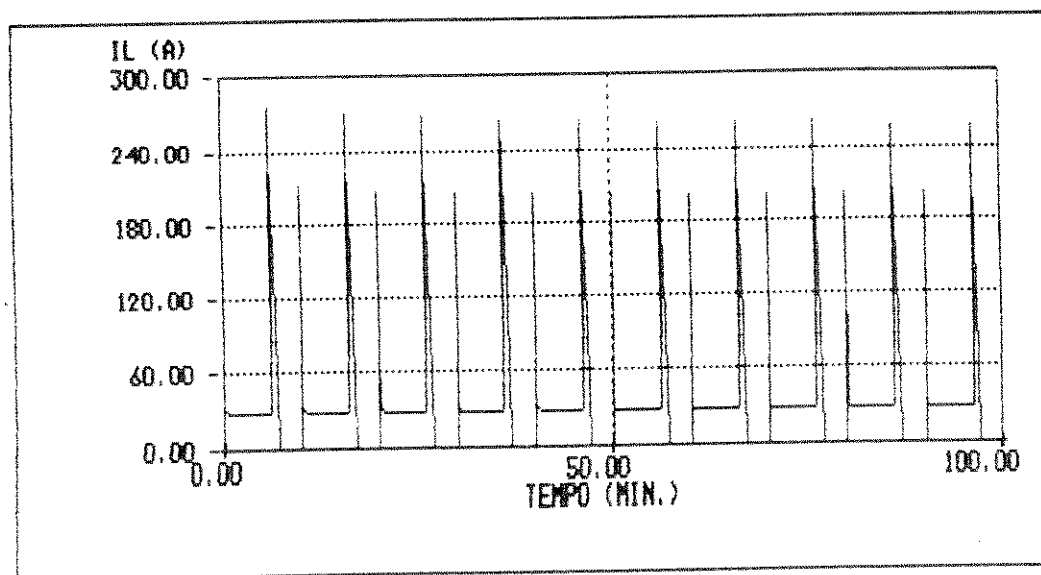


figura 6.18 - Corrente de linha, regime S5, motor de 10 CV,
alimentação senoidal

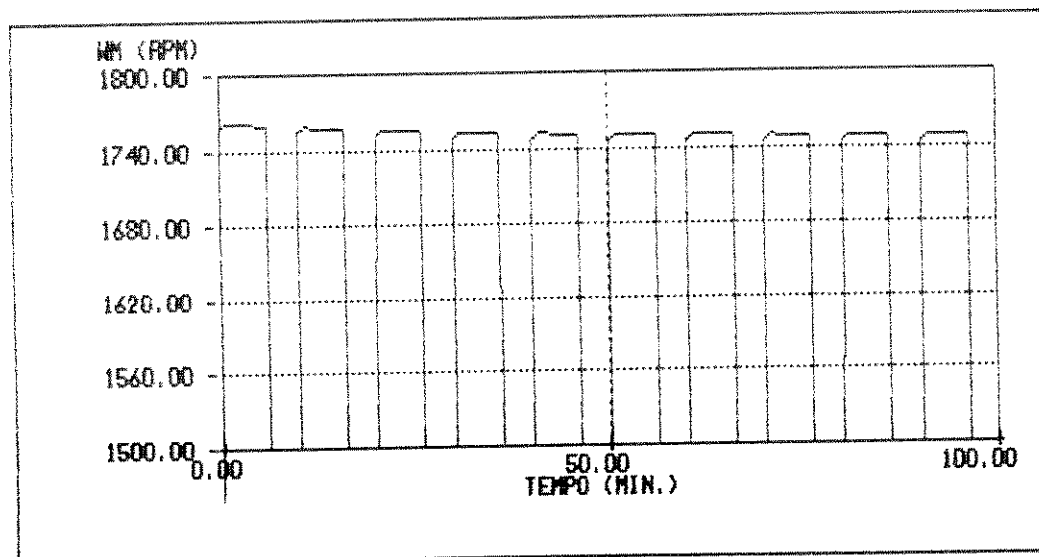


figura 6.19 - velocidade do motor, regime S5, motor de 10 CV,
alimentação senoidal

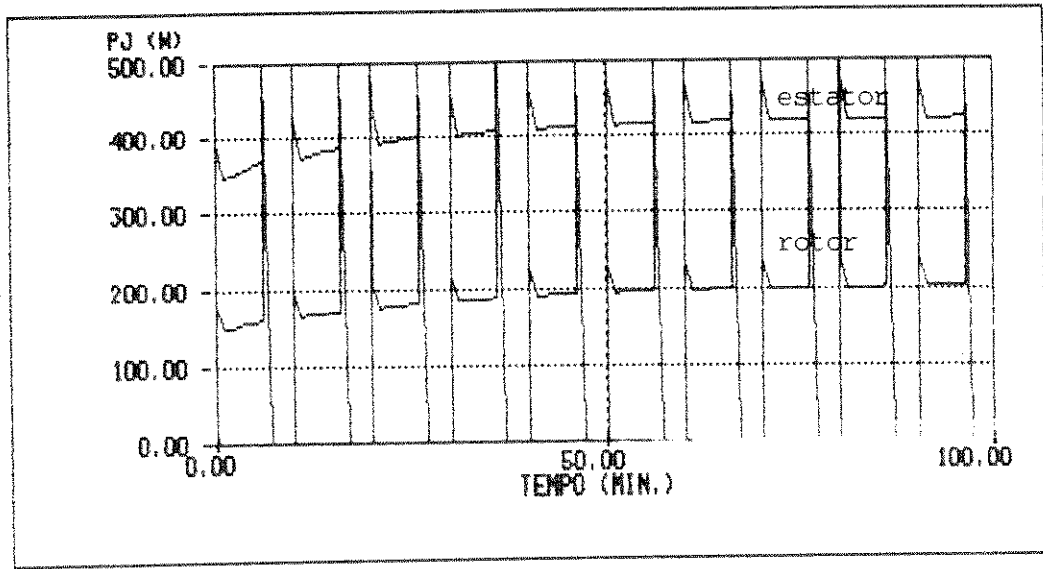


figura 6.20 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime S5, motor de 10 CV, alimentação senoidal

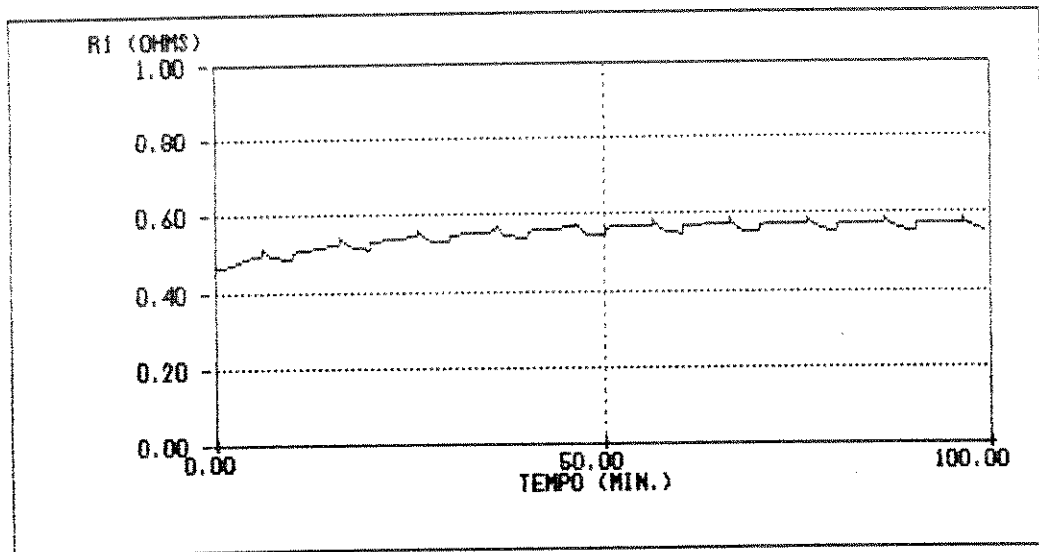


figura 6.21 - Resistência do enrolamento do estator, regime S5, motor de 10 CV, alimentação senoidal

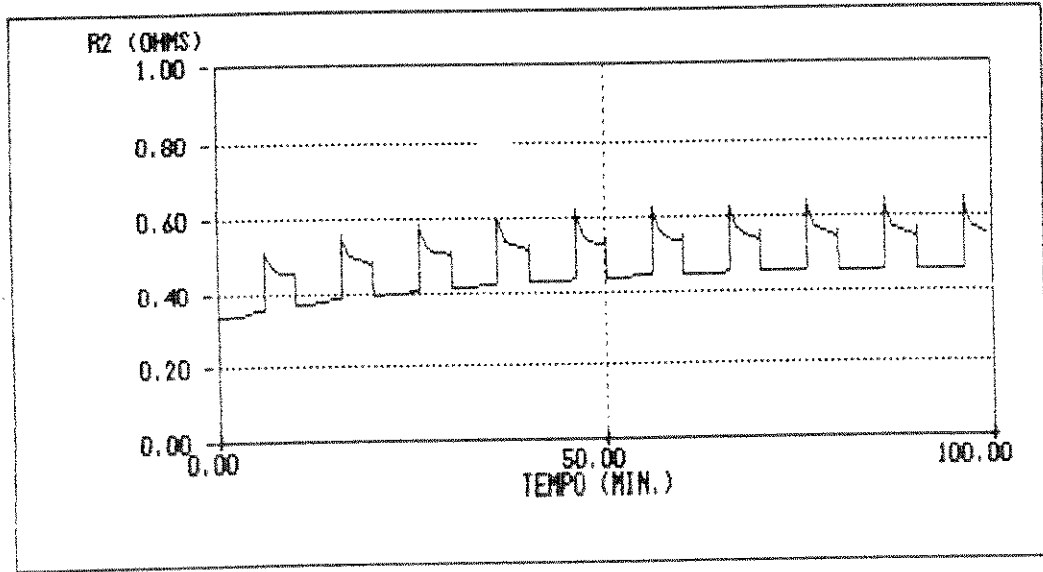


figura 6.22 - Resistência do enrolamento do rotor, regime S5, motor de 10 CV, alimentação senoidal

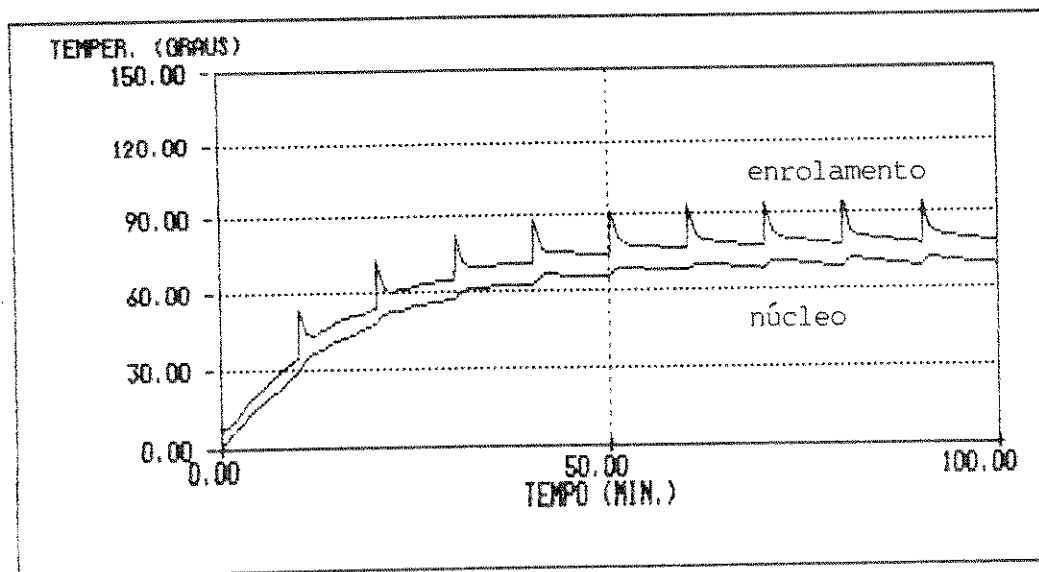


figura 6 23 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S7, motor de 10 CV, alimentação senoidal

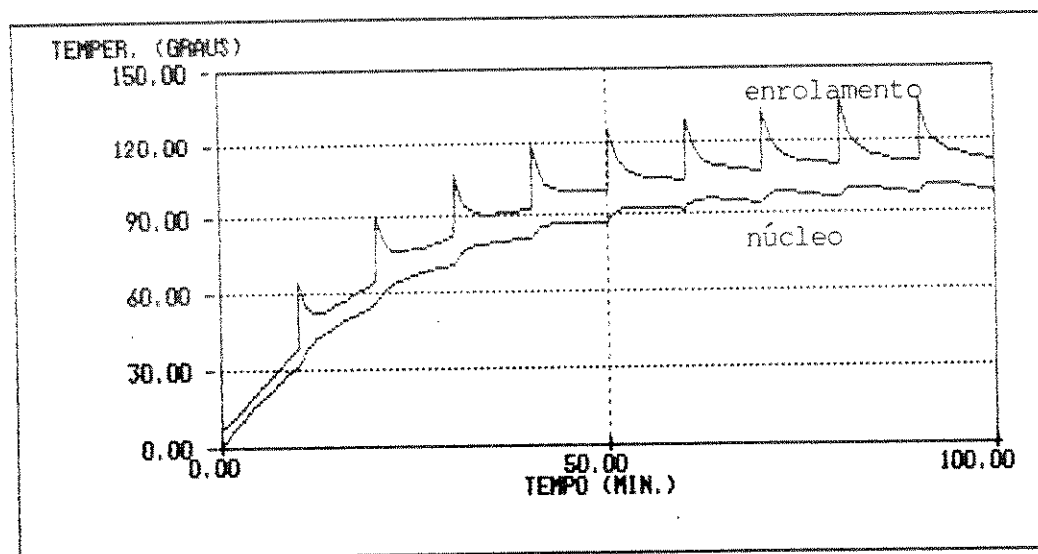


figura 6.24 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S7, motor de 10 CV, alimentação senoidal

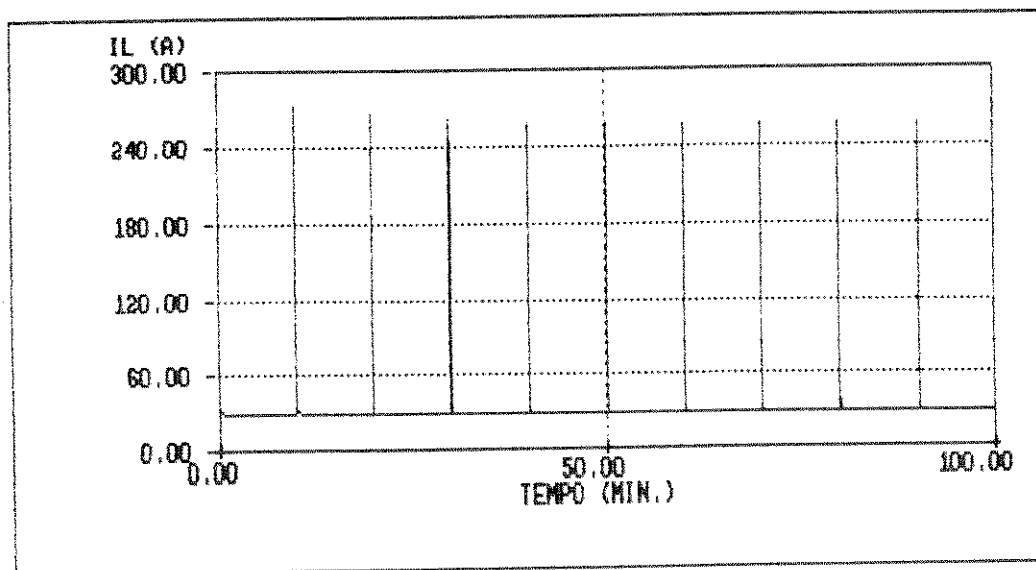


figura 6.25 - Corrente de linha, regime S7, motor de 10 CV,
alimentação senoidal

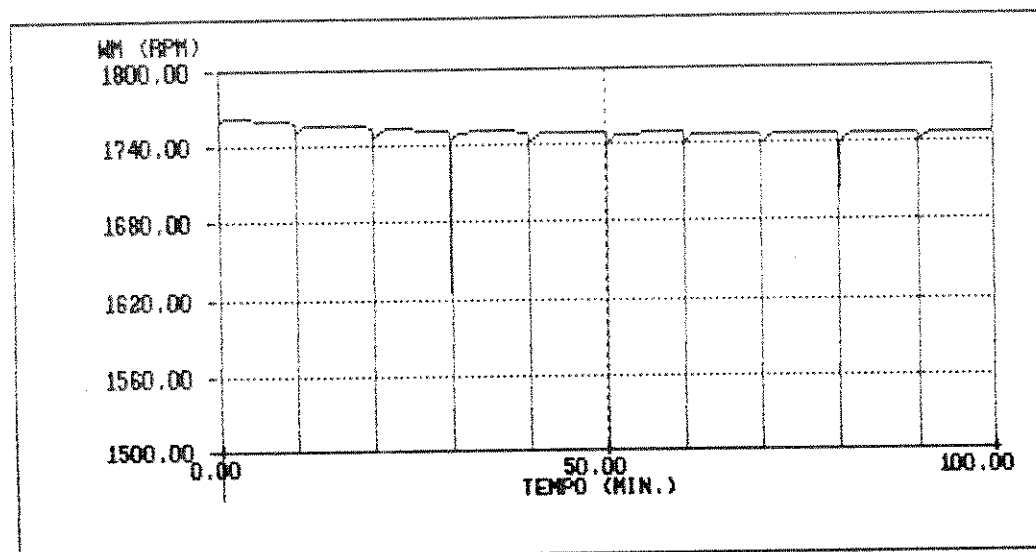


figura 6.26 - velocidade do motor, regime S7, motor de 10 CV,
alimentação senoidal

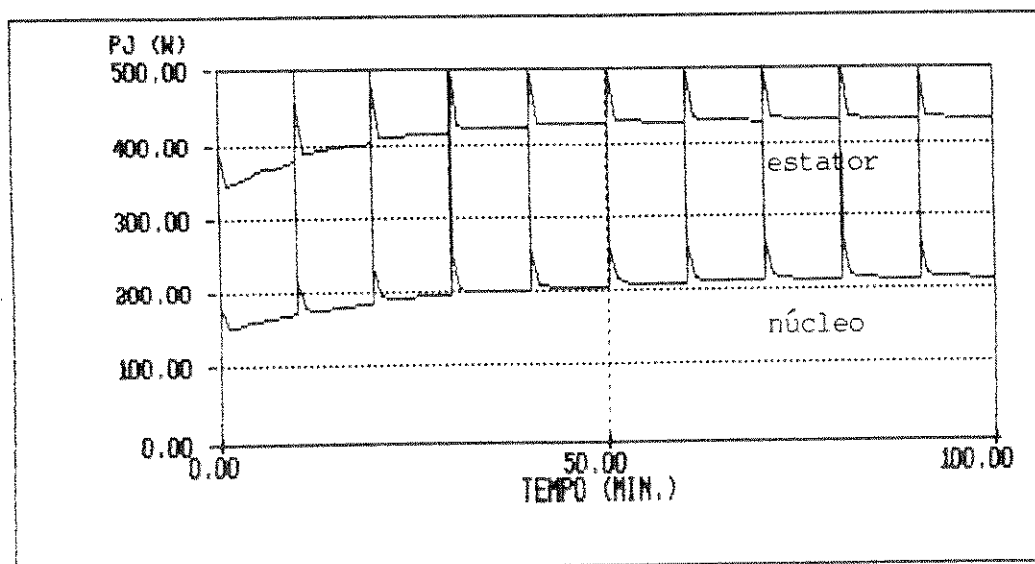


figura 6.27 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime S7, motor de 10 CV, alimentação senoidal

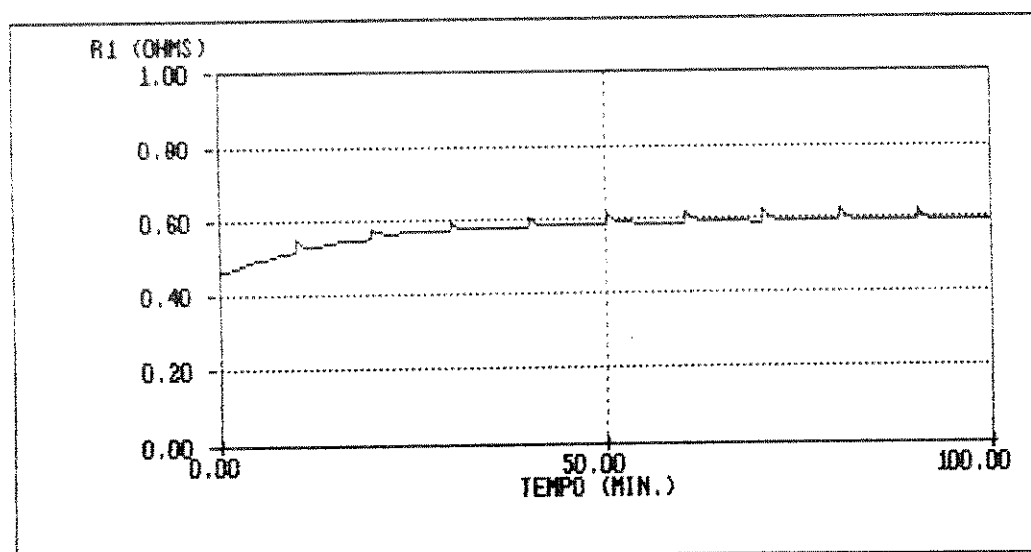


figura 6.28 - Resistência do enrolamento do estator, regime S7, motor de 10 CV, alimentação senoidal

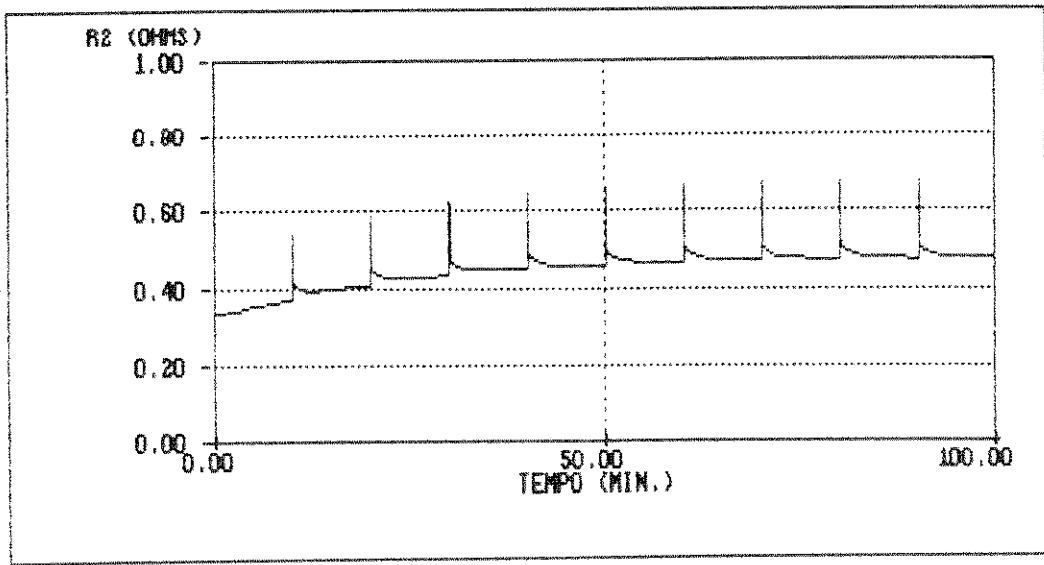


figura 6.29 - Resistência do enrolamento do rotor, regime S7,
motor de 10 Cv, alimentação senoidal

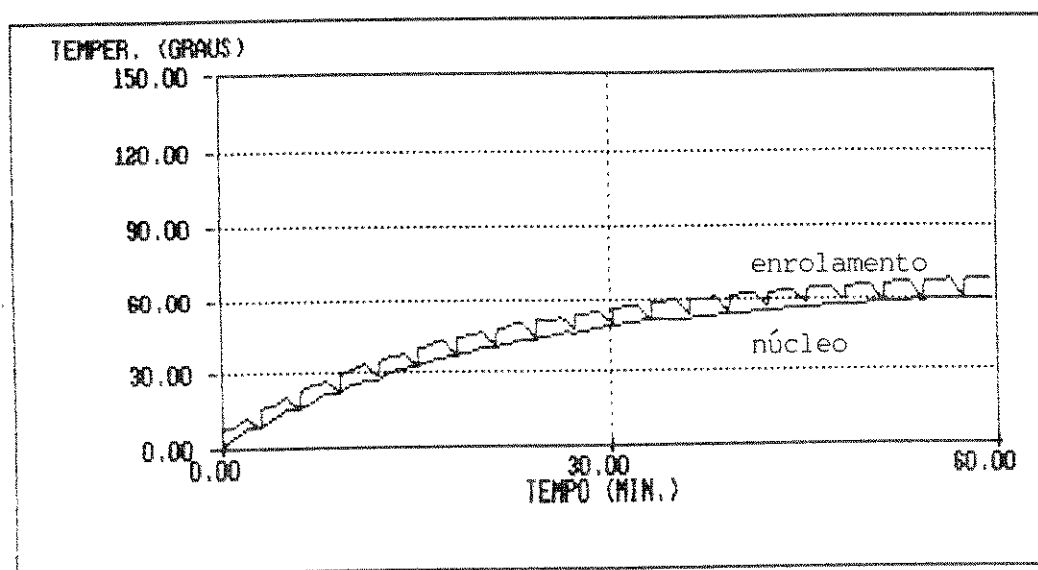


figura 6 30 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime de partidas sucessivas, motor de 10 CV, alimentação senoidal

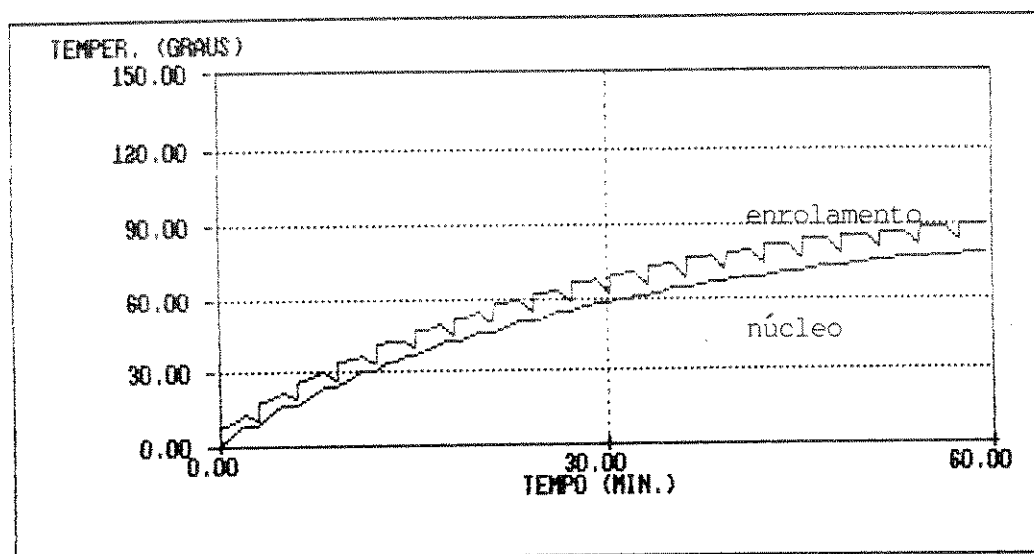


figura 6.31 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime de partidas sucessivas, motor de 10 CV, alimentação senoidal

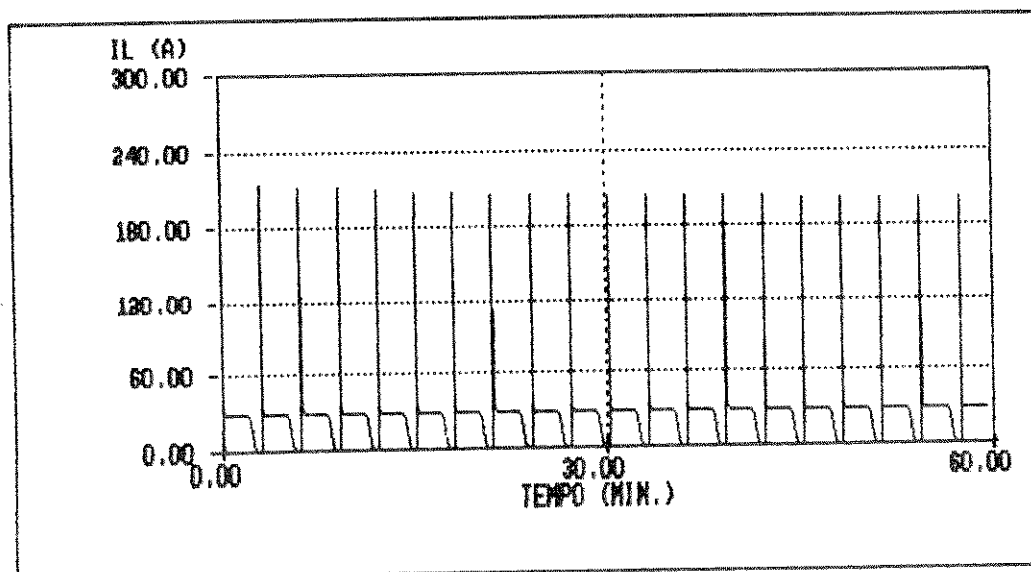


figura 6.32 - Corrente de linha, regime de partidas sucessivas, motor de 10 CV, alimentação senoidal

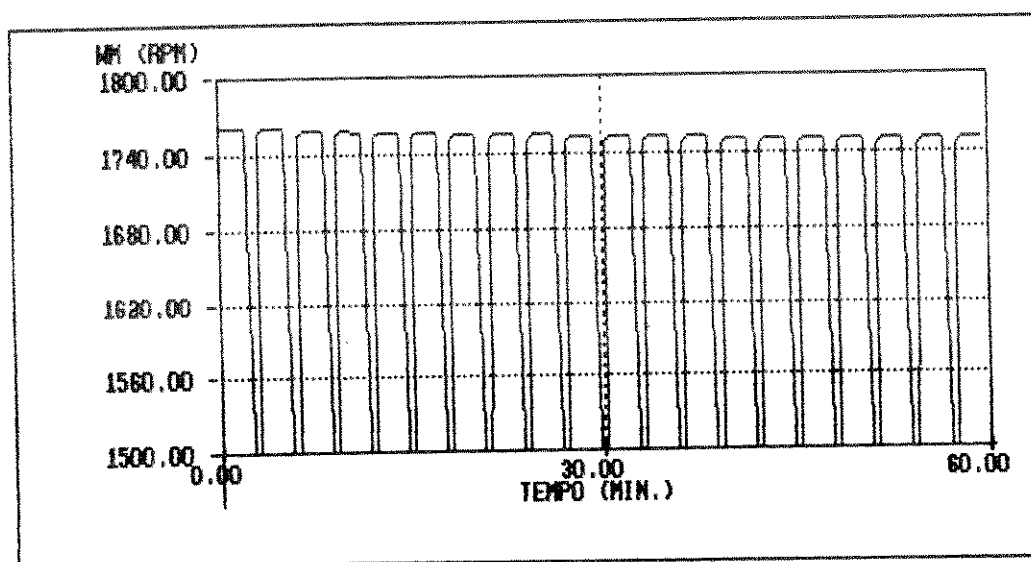


figura 6.33 - velocidade do motor, regime de partidas sucessivas, motor de 10 CV, alimentação senoidal

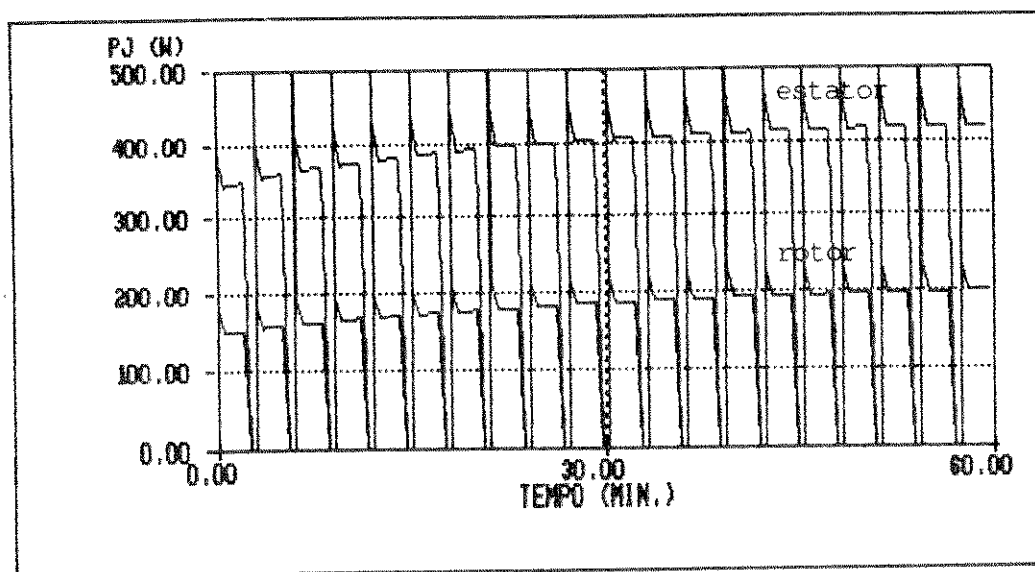


figura 6.34 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime de partidas sucessivas, motor de 10 CV, alimentação senoidal

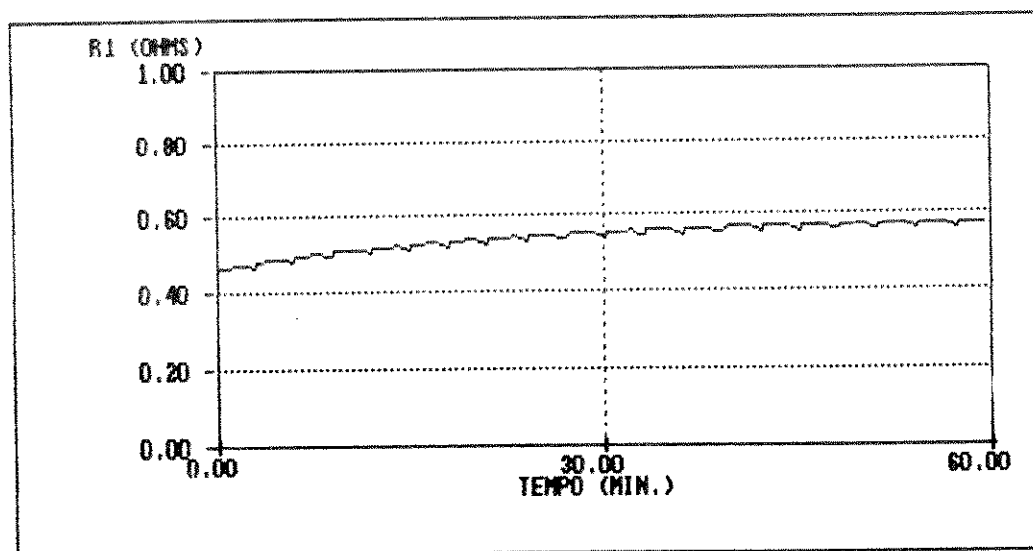


figura 6.35 - Resistência do enrolamento do estator, regime de partidas sucessivas, motor de 10 CV, alimentação senoidal

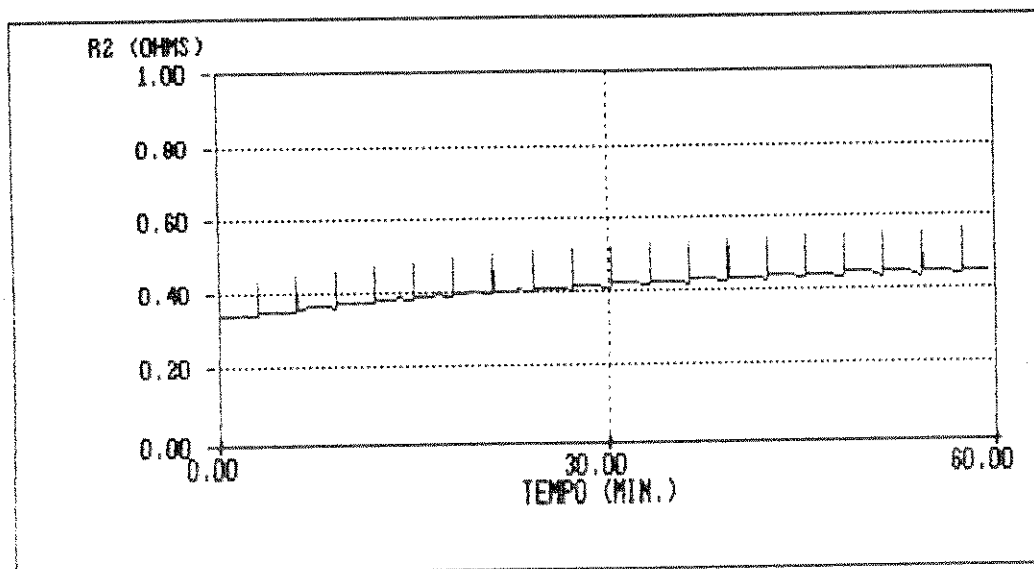


figura 6.36 - Resistência do enrolamento do rotor, regime de partidas sucessivas, motor de 10 CV, alimentação senoidal

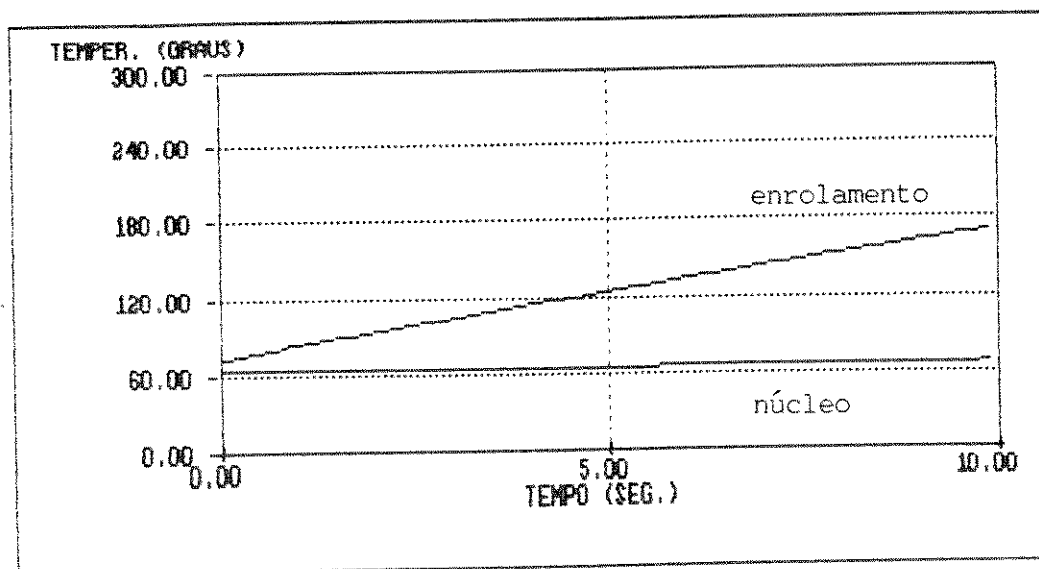


figura 6.37 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime de rotor bloqueado, motor de 10 CV, alimentação senoidal

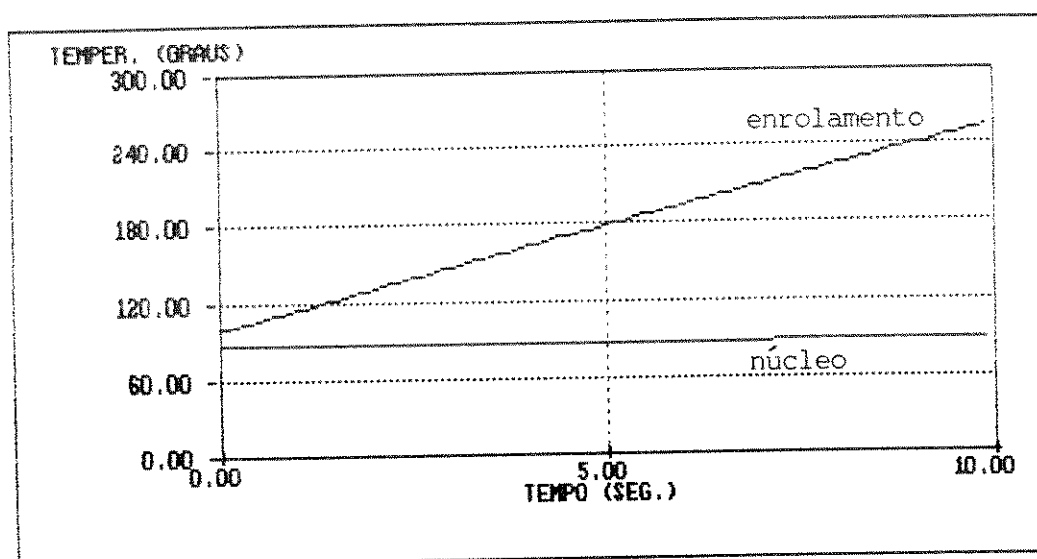


figura 6.38 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime de rotor bloqueado, motor de 10 CV, alimentação senoidal

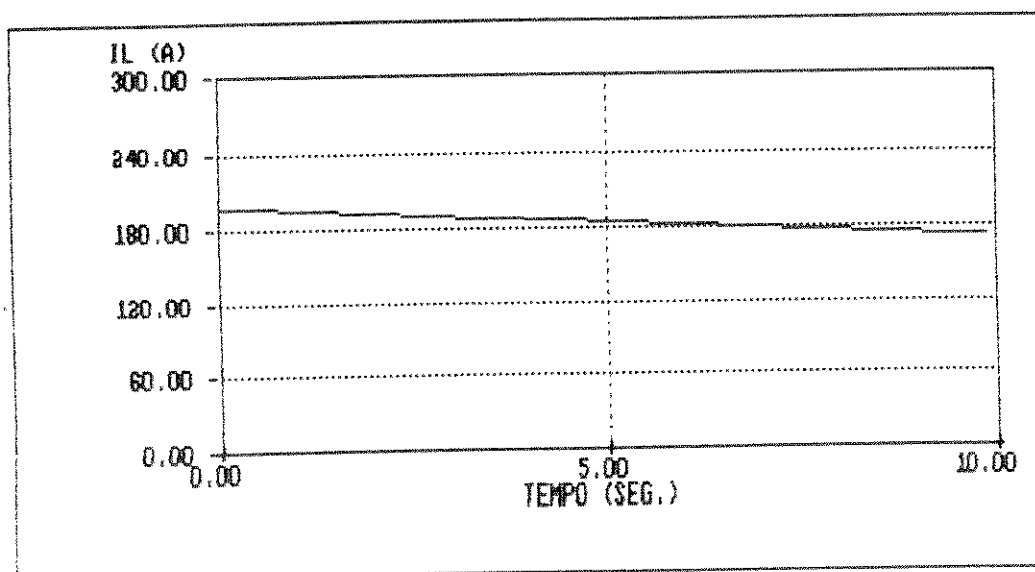


figura 6.39 - Corrente de linha, regime de rotor bloqueado, motor de 10 CV, alimentação senoidal

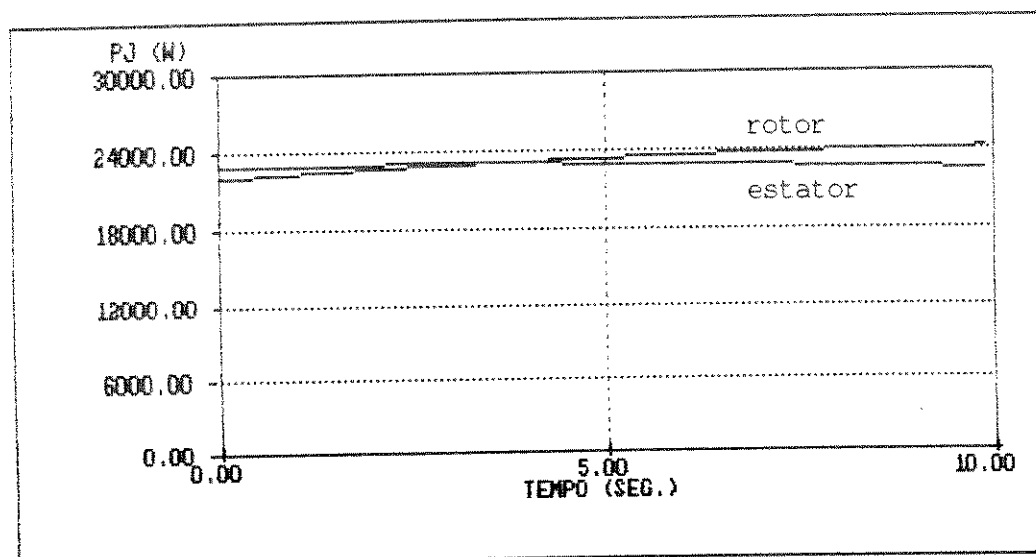


figura 6.40 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime de rotor bloqueado, motor de 10 CV, alimentação senoidal

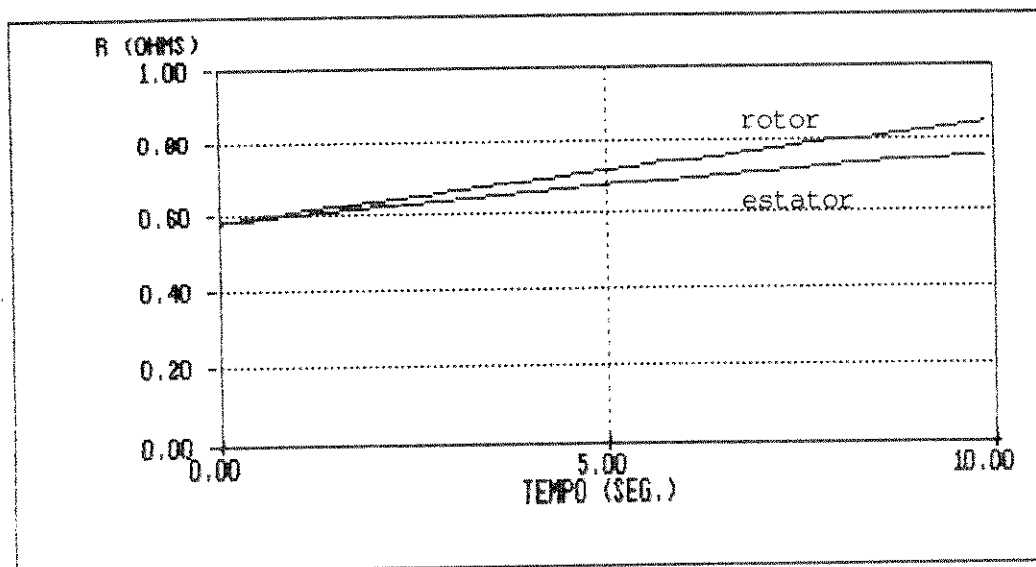


figura 6.41 - Resistências dos enrolamentos do estator e do rotor, regime de rotor bloqueado, motor de 10 CV, alimentação senoidal

VI.3 - COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES COM OS FORNECIDOS PELO FABRICANTE - MOTOR DE 10 CV

A seguir apresentam-se os resultados obtidos nas simulações para o regime S1, após o tempo de duração do funcionamento do motor e os resultados, fornecidos pelo fabricante, obtidos no ensaio de elevação de temperatura para o regime S1.

Tabela 6.1 - Resultados obtidos na simulação e no ensaio de elevação de temperatura do fabricante

MOTOR DE 10 CV		
	SIMULAÇÃO	FABRICANTE
POTÊNCIA MECÂNICA (W)	6931.33	7360.00
VELOCIDADE (rpm)	1748.45	1752.00
CONJUGADO DO MOTOR (Nm)	37.86	40.08
CORRENTE DE LINHA (A)	27.01	28.06
POTÊNCIA DE ENTRADA (W)	8078.75	8676.00
FATOR DE POTÊNCIA	0.78	0.78
RENDIMENTO	0.86	0.85
ELEV. TEMP. ENROL. ESTATOR (°C)	72.68	73.90
RESISTÊNCIA DO ESTATOR (Ω)	0.58	0.55

VI.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MOTOR DE 10 CV COM ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL

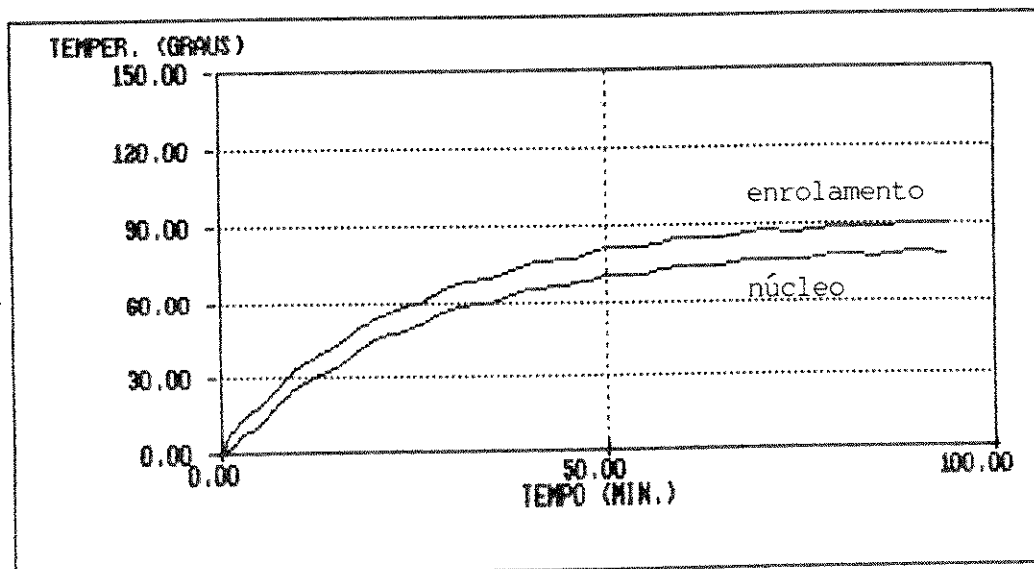


figura 6.42 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime de velocidade variável, motor de 10 CV, alimentação não senoidal

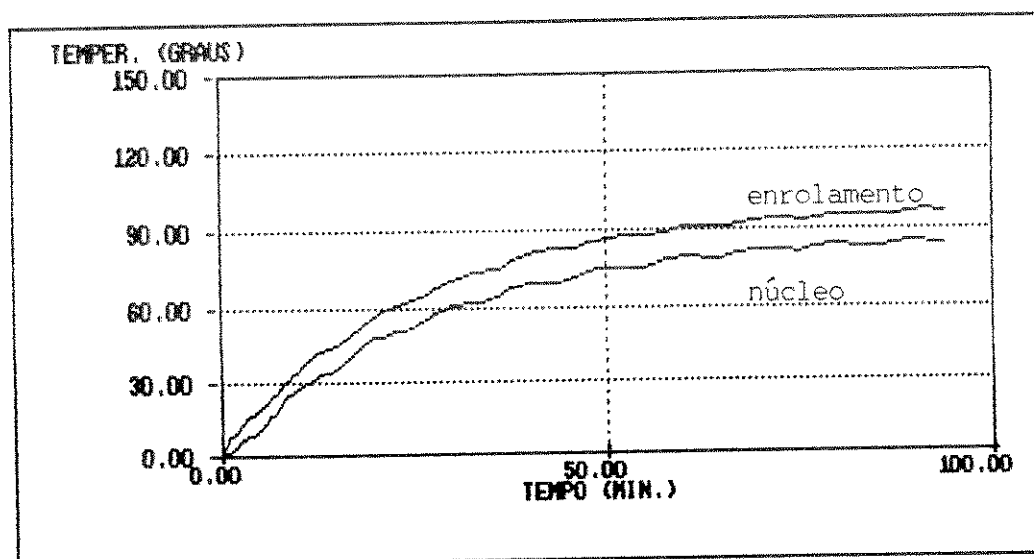


figura 6.43 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime de velocidade variável, motor de 10 CV, alimentação não senoidal

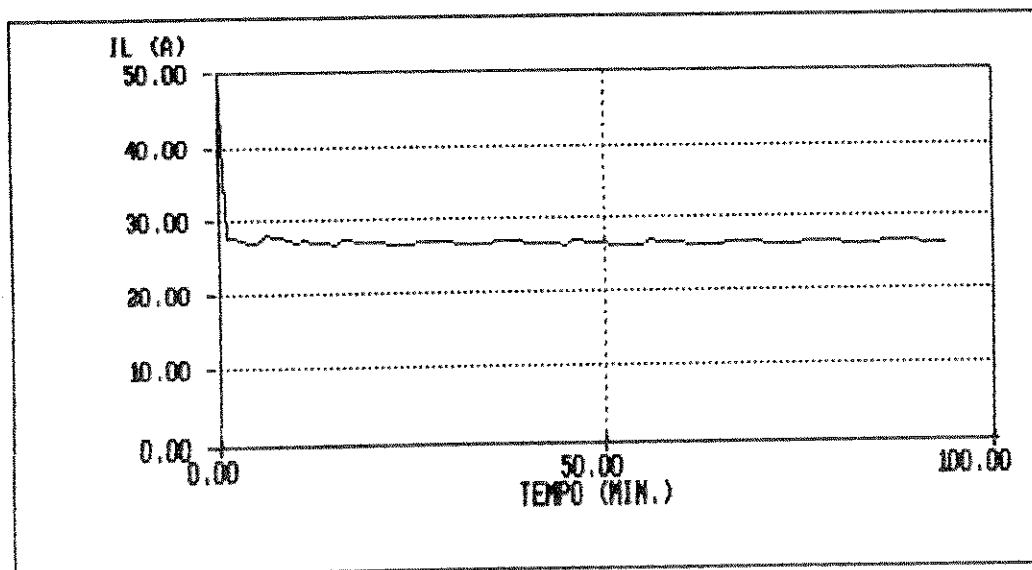


figura 6.44 - Corrente de linha, regime de velocidade variável, motor de 10 CV, alimentação não senoidal

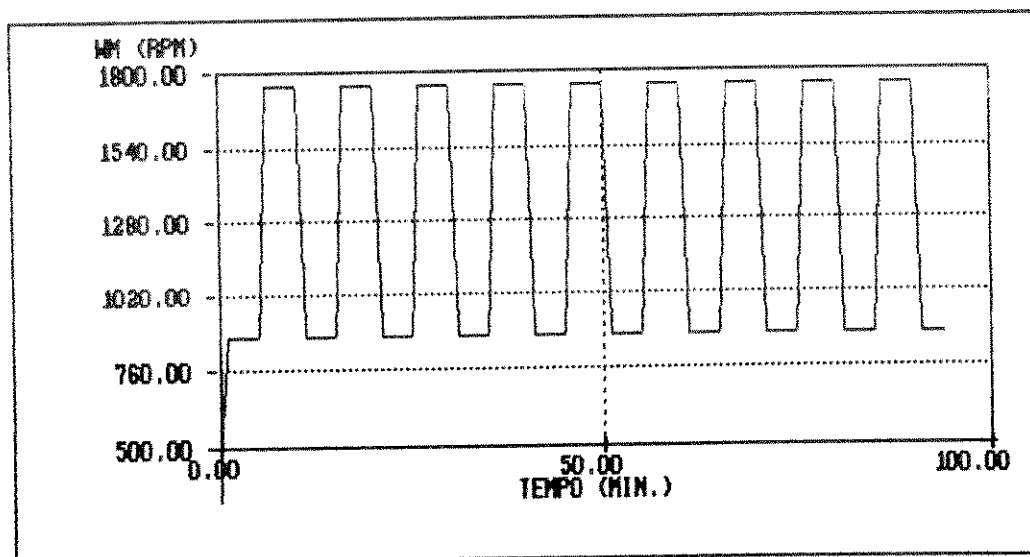


figura 6.45 - velocidade do motor, regime de velocidade variável, motor de 10 CV, alimentação não senoidal

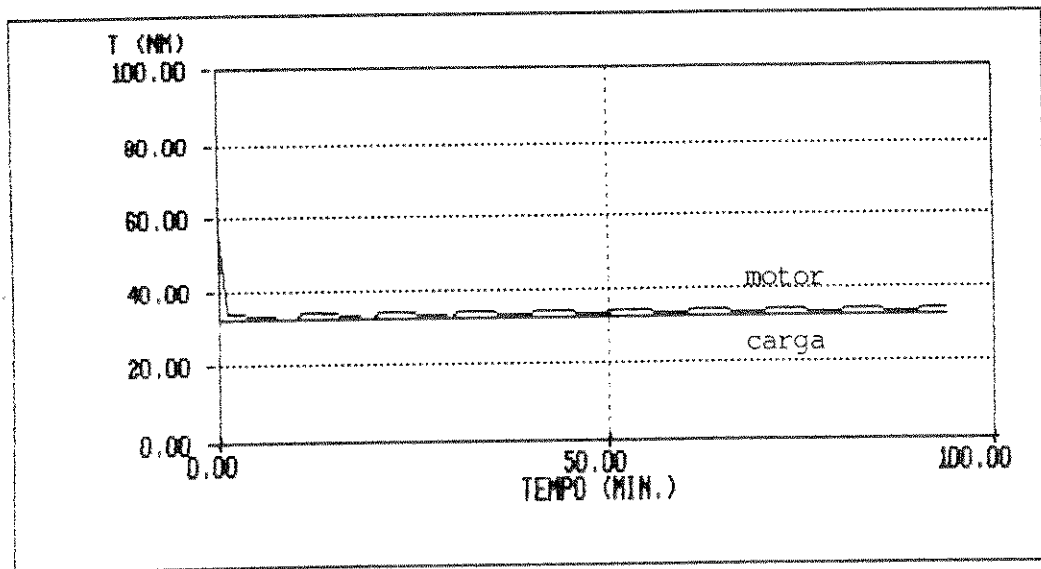


figura 6 46 - conjugados de carga e desenvolvido pelo motor, regime de velocidade variável, motor de 10 CV, alimentação não senoidal

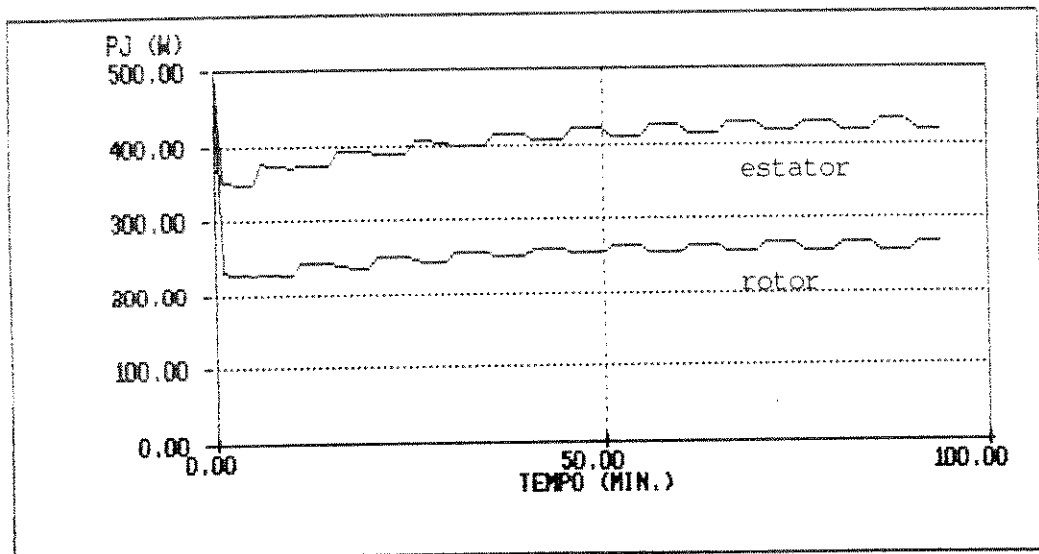


figura 6.47 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime de velocidade variável, motor de 10 CV, alimentação não senoidal

VI.5 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MOTOR DE 50 CV COM
ALIMENTAÇÃO SENOIDAL

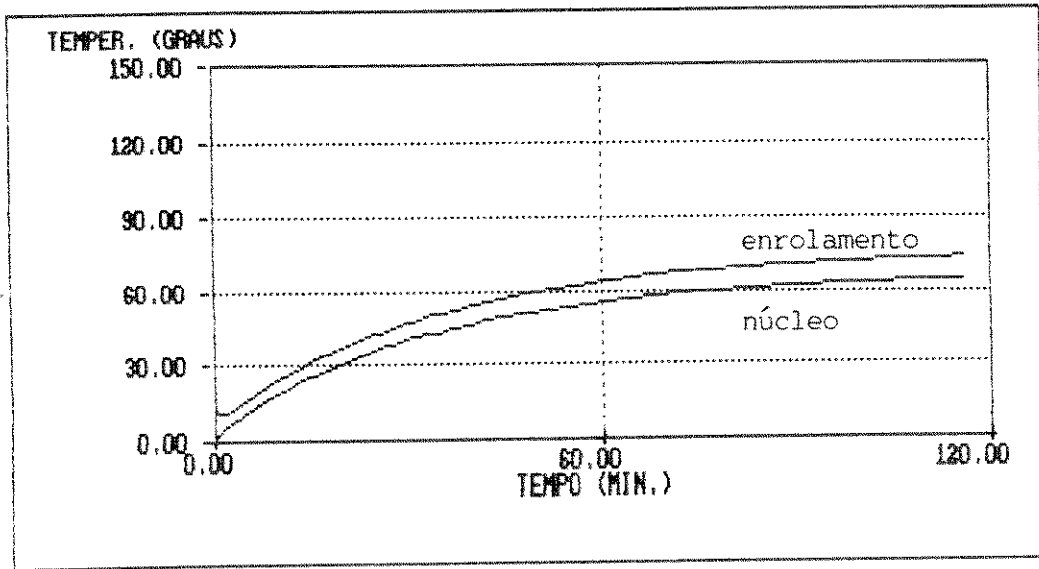


figura 6.48 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S1, motor de 50 CV, alimentação senoidal

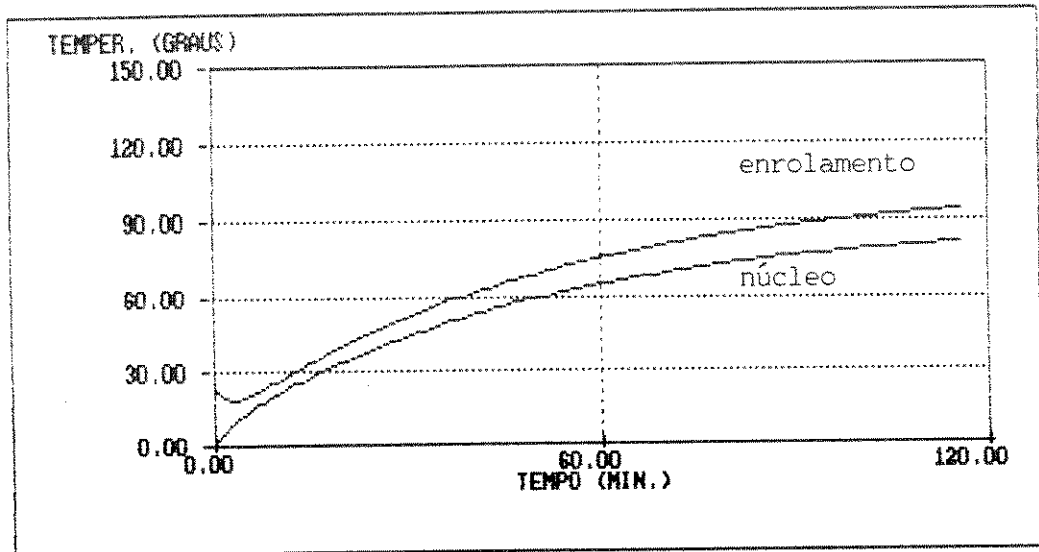


figura 6.49 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S1, motor de 50 CV, alimentação senoidal

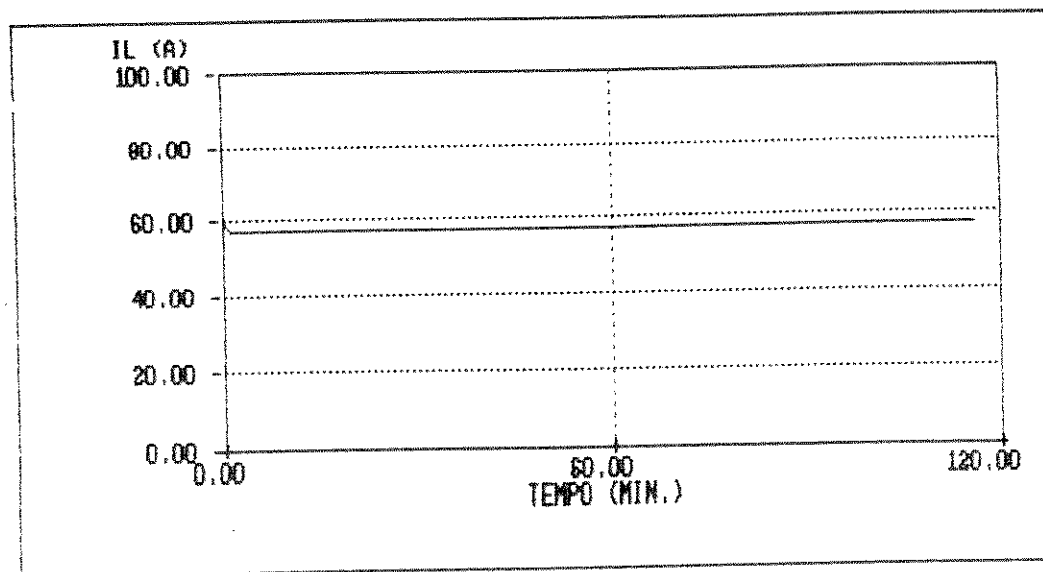


figura 6.50 - Corrente de linha, regime S1, motor de 50 CV,
alimentação senoidal

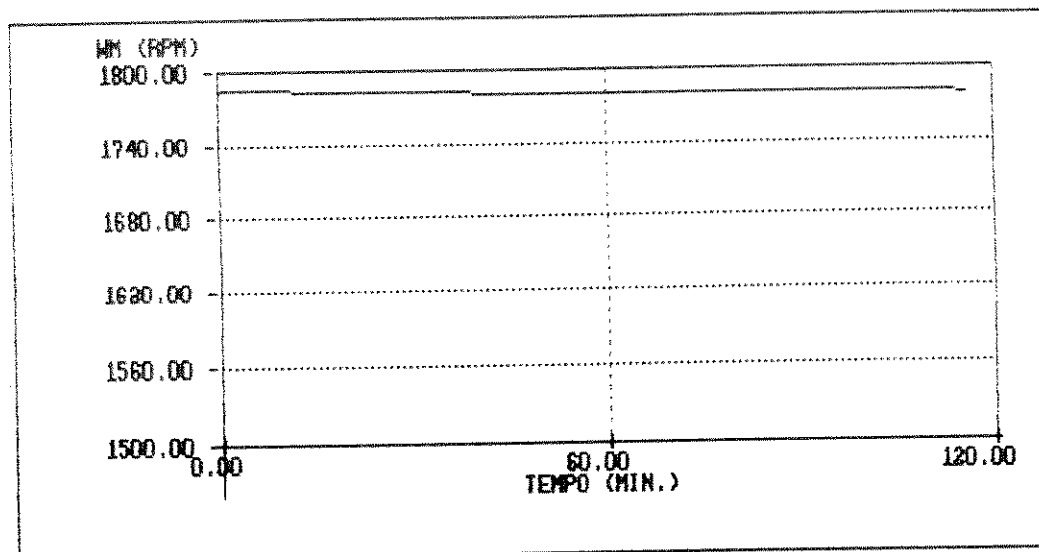


figura 6.51 - velocidade do motor, regime S1, motor de 50 CV,
alimentação senoidal

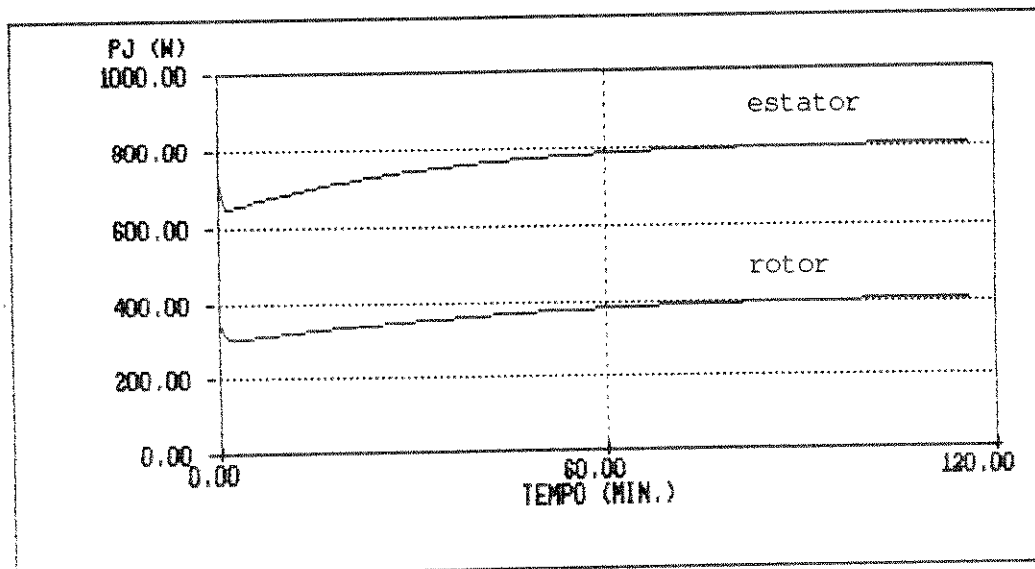


figura 6 52 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime S1, motor de 50 CV, alimentação senoidal

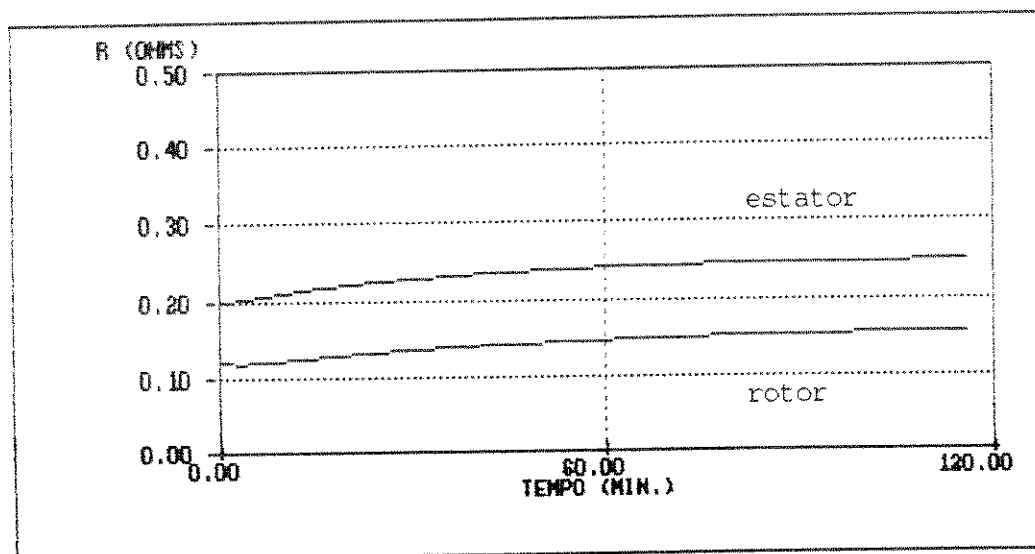


figura 6.53 - Resistências dos enrolamentos do estator e do rotor, regime S1, motor de 50 CV, alimentação senoidal

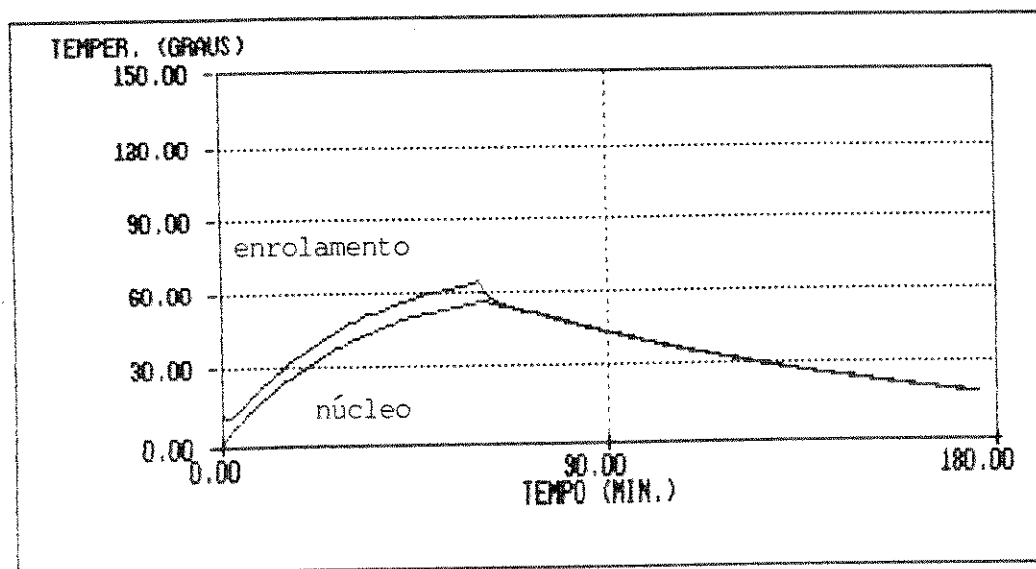


figura 6.54 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S2, motor de 50 CV, alimentação senoidal

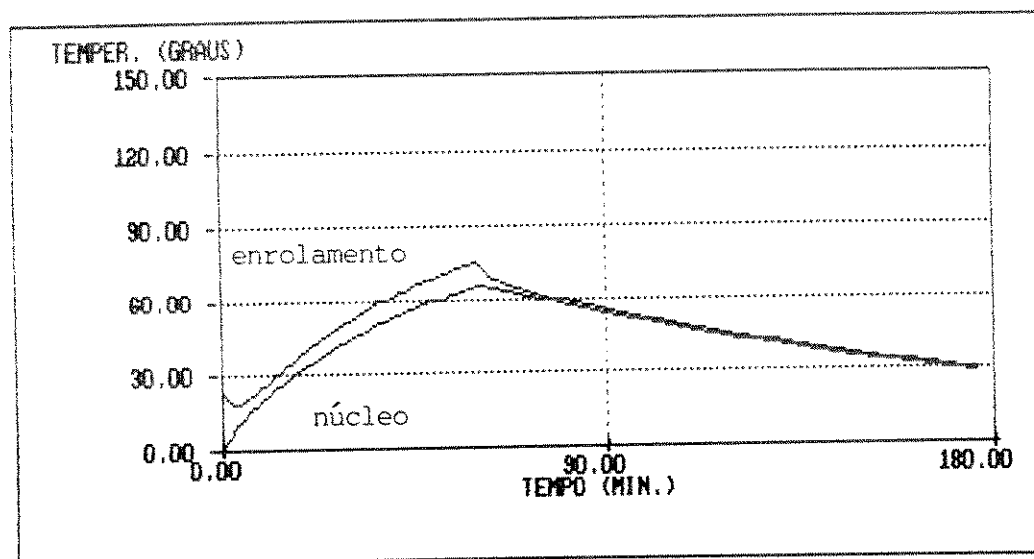


figura 6.55 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S2, motor de 50 CV, alimentação senoidal

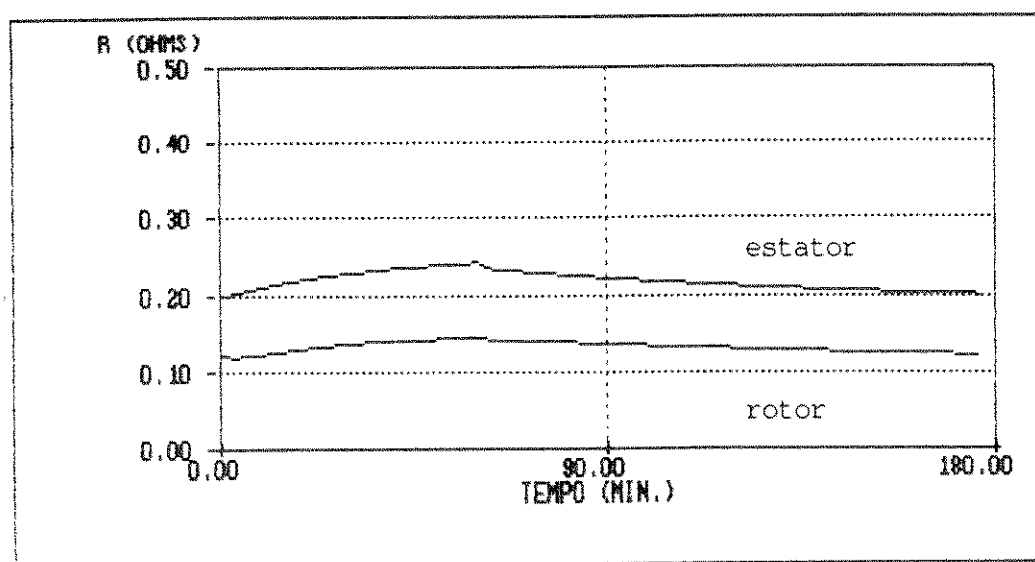


figura 6.56 - Resistências dos enrolamentos do estator e do rotor, regime S2, motor de 50 CV, alimentação senoidal

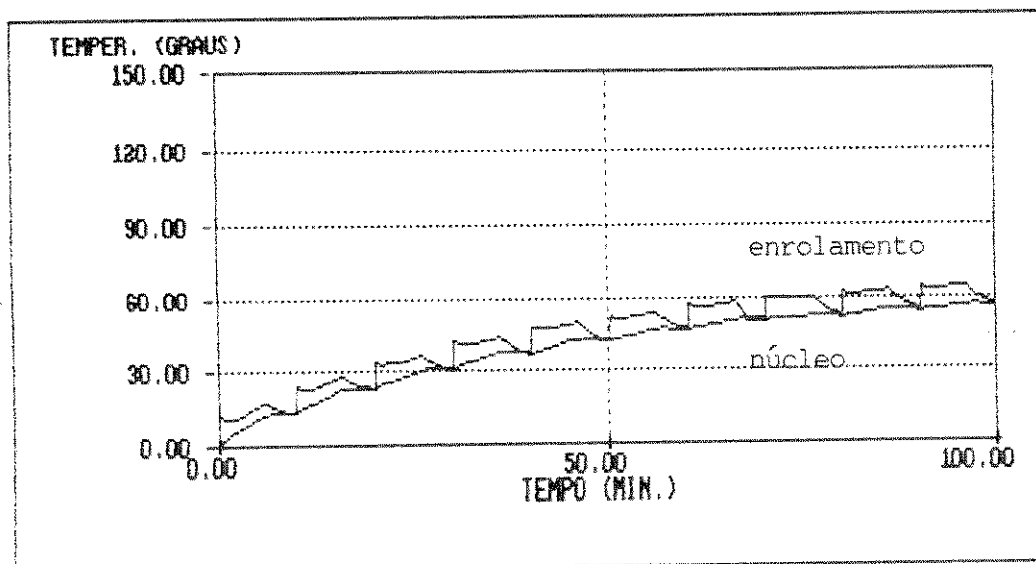


figura 6.57 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S4, motor de 50 CV, alimentação senoidal

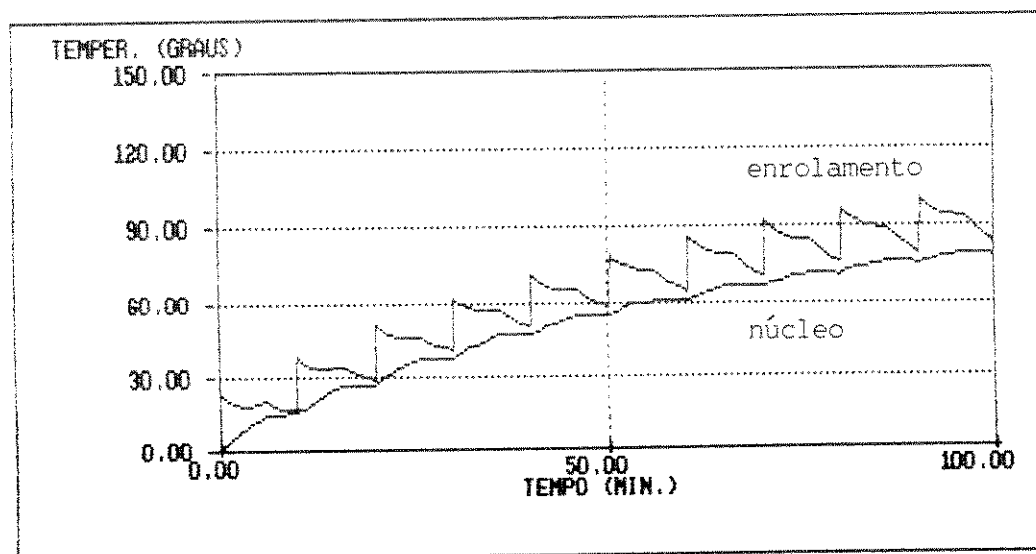


figura 6.58 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S4, motor de 50 CV, alimentação senoidal

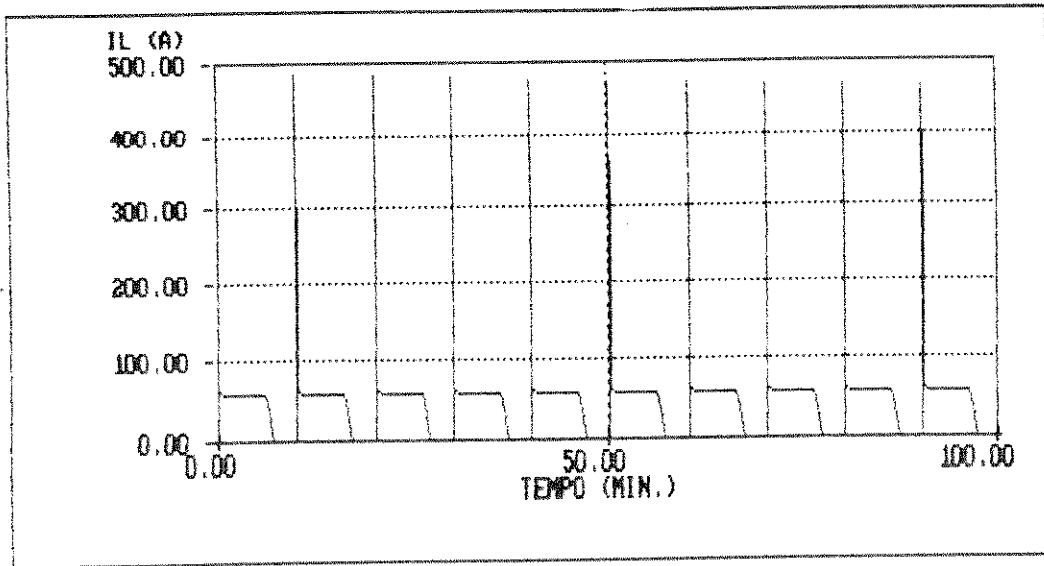


figura 6.59 - Corrente de linha, regime S4, motor de 50 CV,
alimentação senoidal

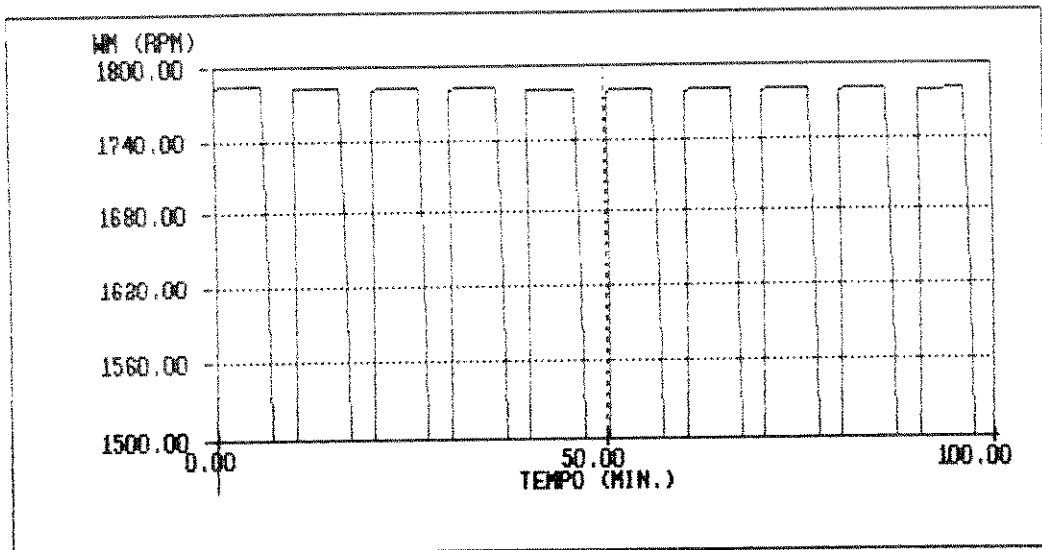


figura 6.60 - velocidade do motor, regime S4, motor de 50 CV,
alimentação senoidal

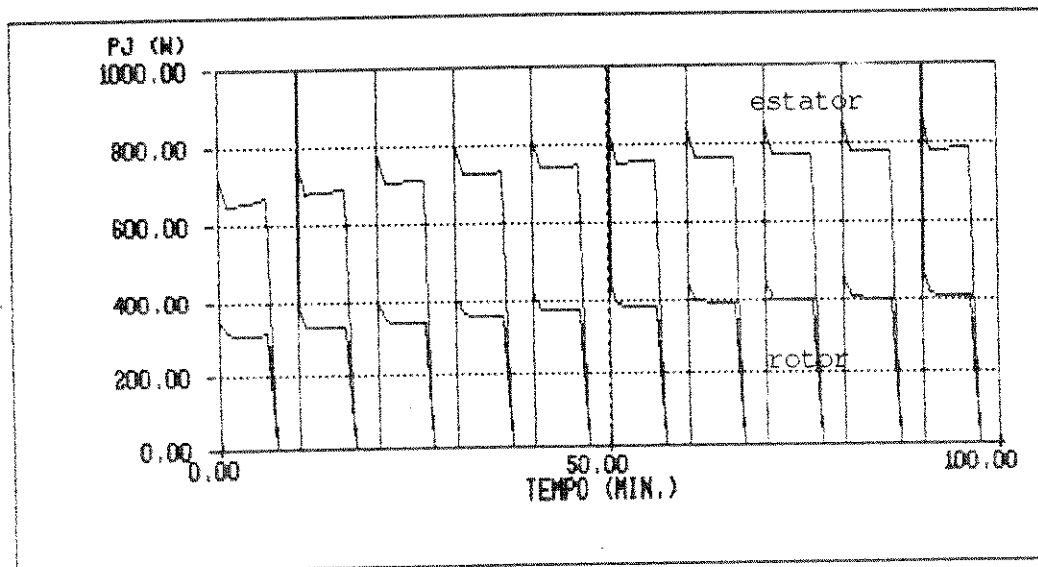


figura 6.61 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime S4, motor de 50 CV, alimentação senoidal

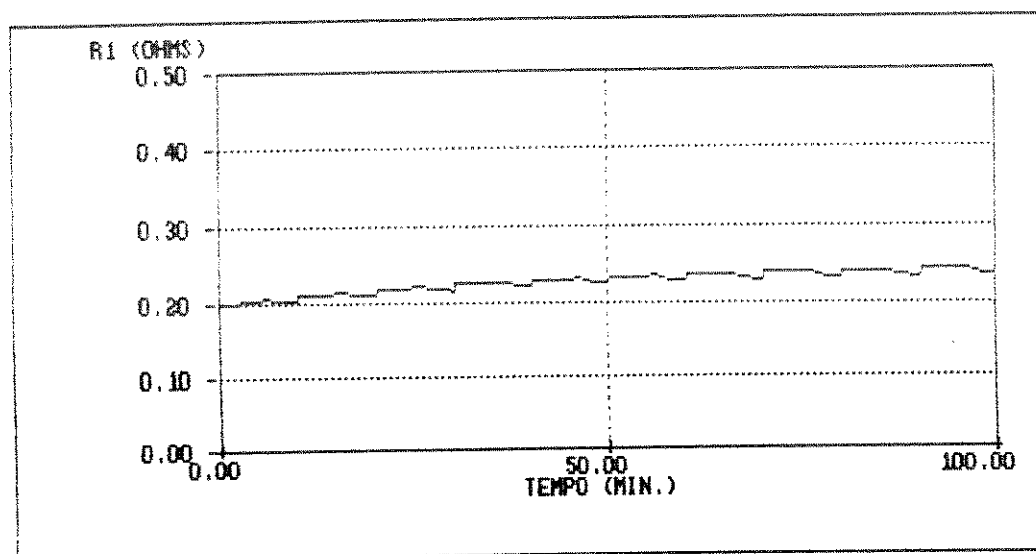


figura 6.62 - Resistência do enrolamento do estator, regime S4, motor de 50 CV, alimentação senoidal

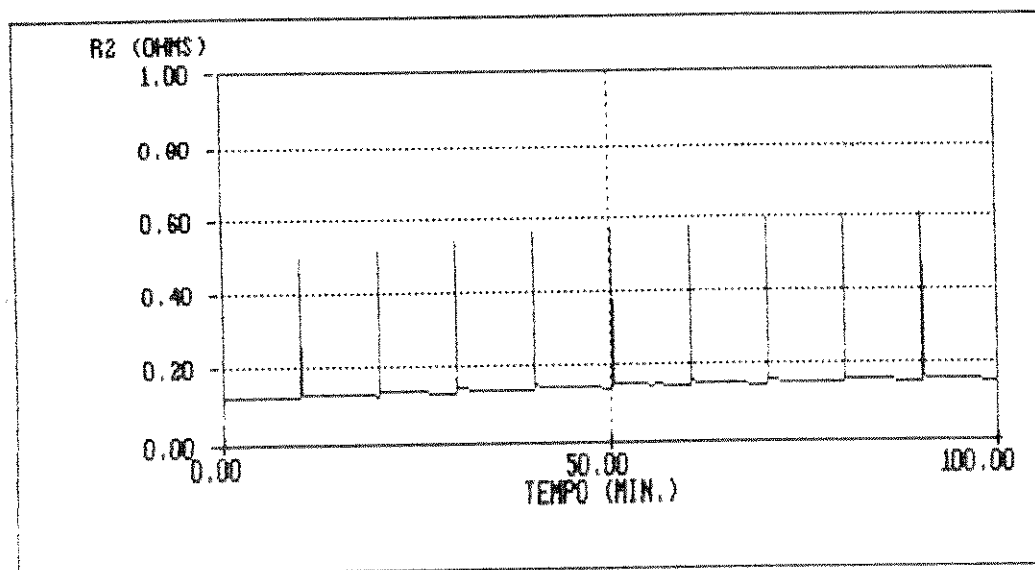


figura 6.63 - Resistência do enrolamento do rotor, regime S4, motor de 50 CV, alimentação senoidal

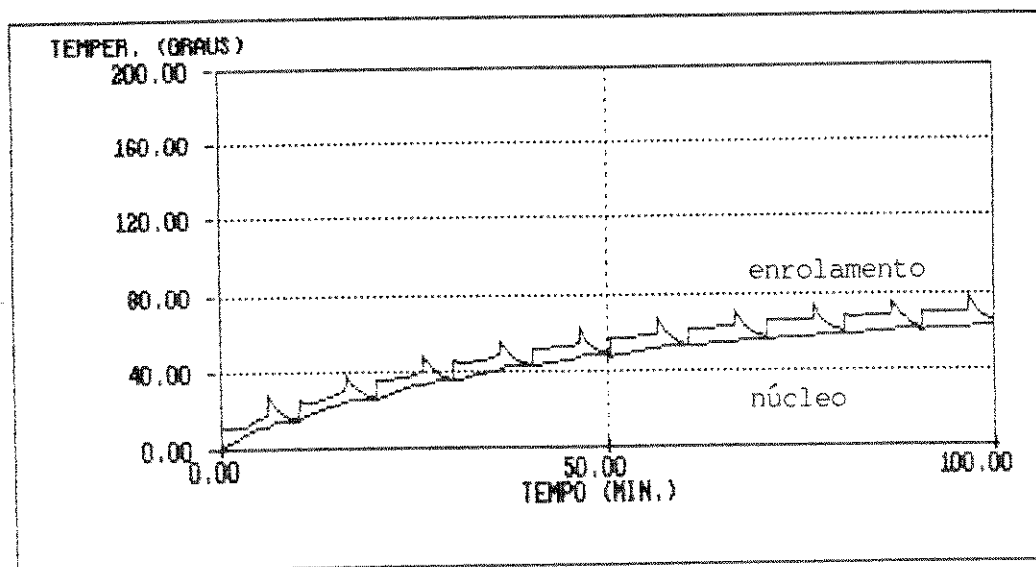


figura 6.64 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S5, motor de 50 CV, alimentação senoidal

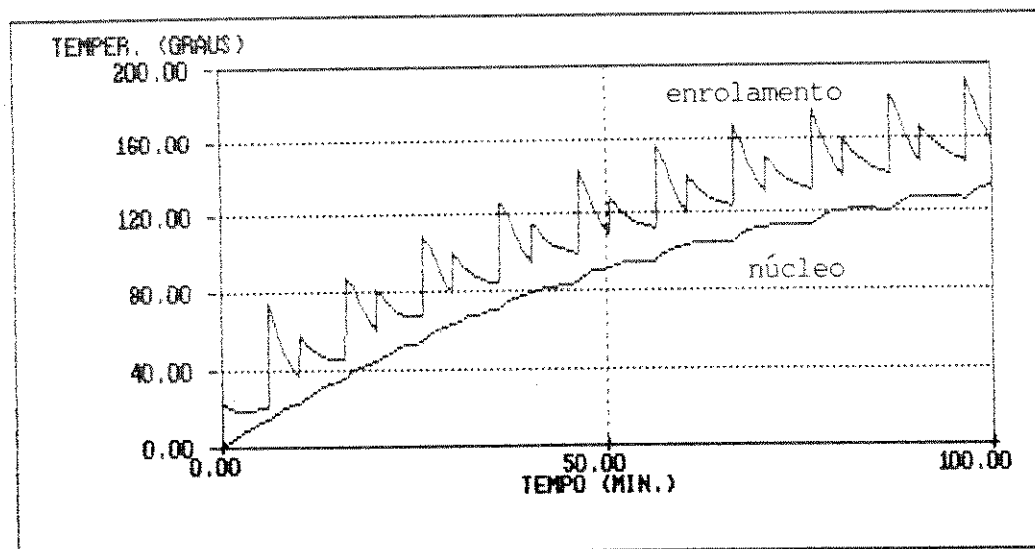


figura 6.65 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S5, motor de 50 CV, alimentação senoidal

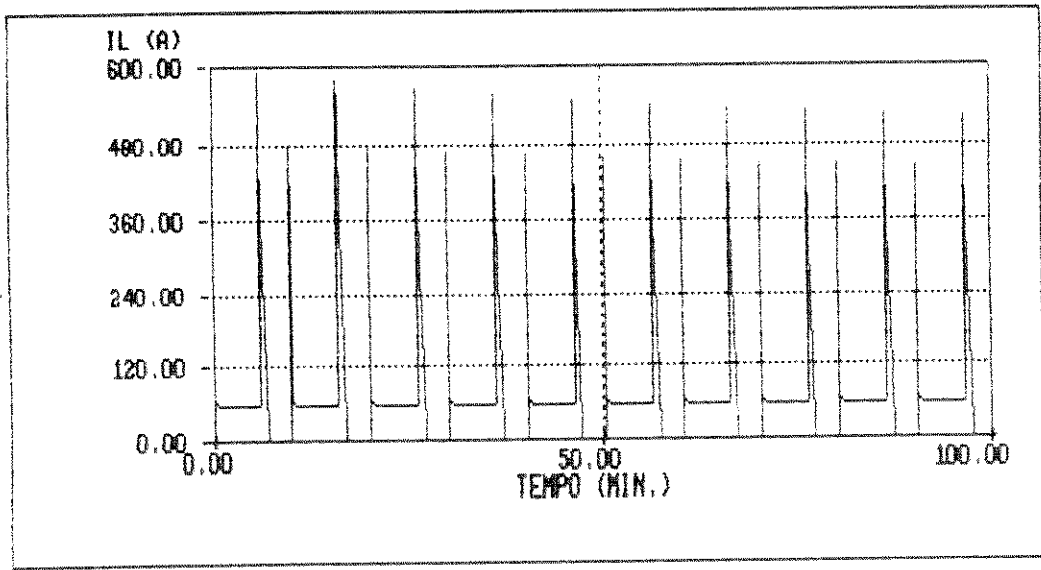


figura 6.66 - Corrente de linha, regime S5, motor de 50 CV, alimentação senoidal

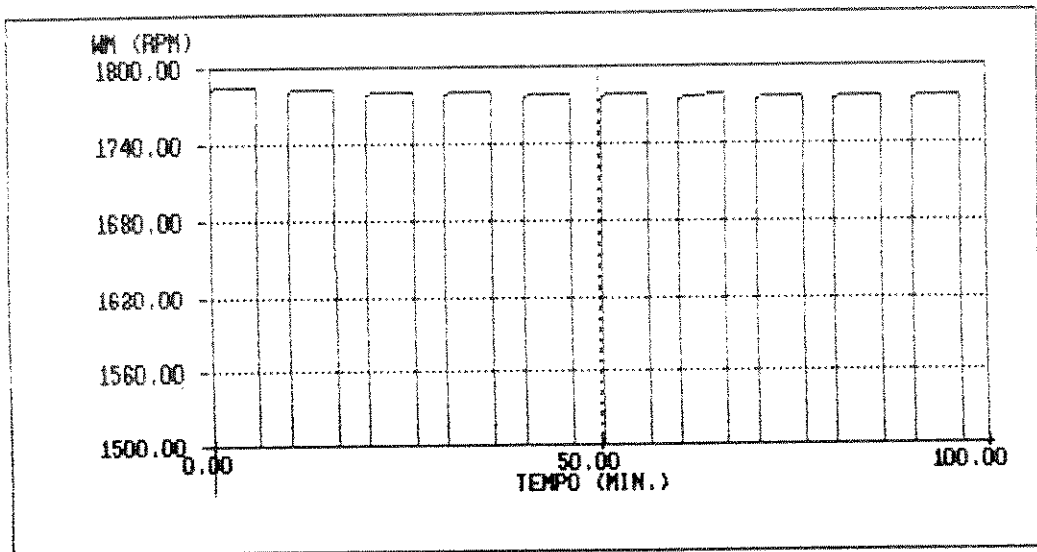


figura 6.67 - velocidade do motor, regime S5, motor de 50 CV, alimentação senoidal

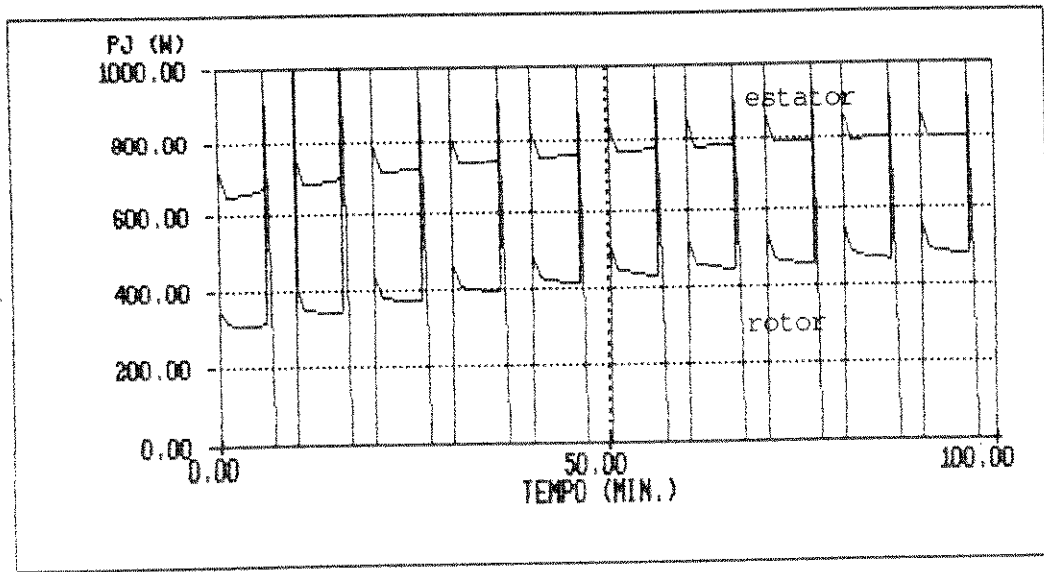


figura 6 68 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime S5, motor de 50 CV, alimentação senoidal

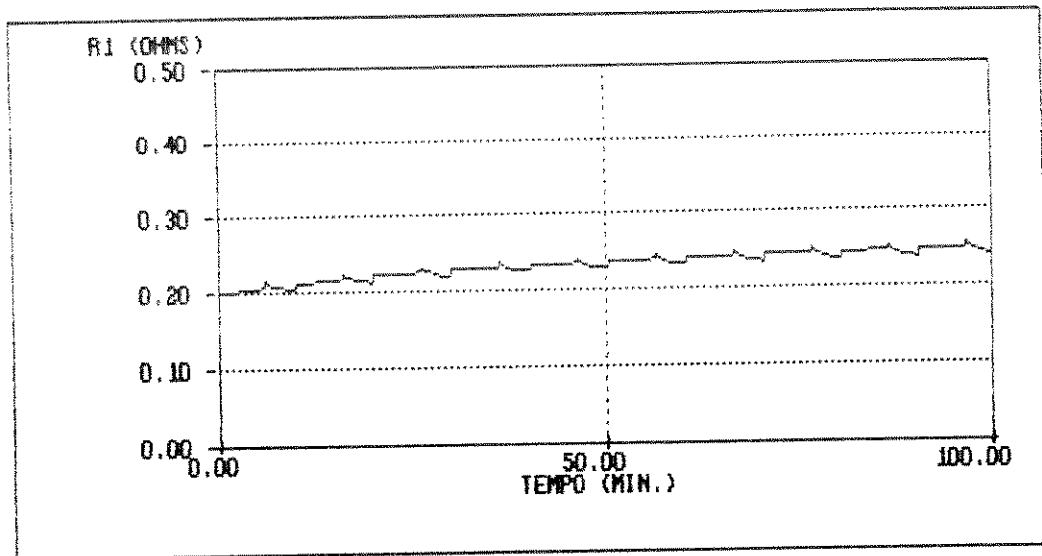


figura 6.69 - Resistência do enrolamento do estator, regime S5, motor de 50 CV, alimentação senoidal

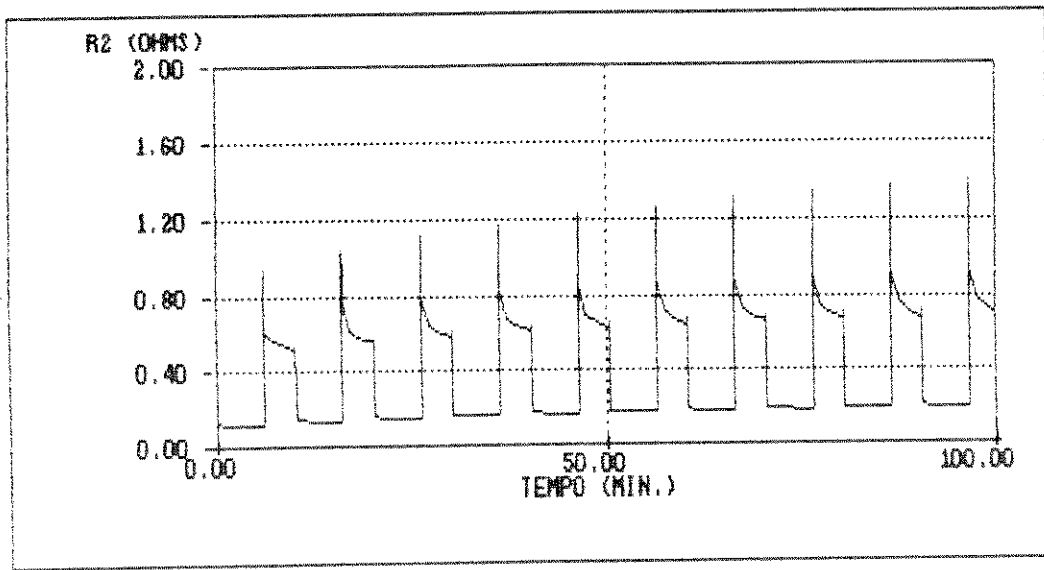


figura 6.70 - Resistência do enrolamento do rotor, regime S5, motor de 50 CV, alimentação senoidal

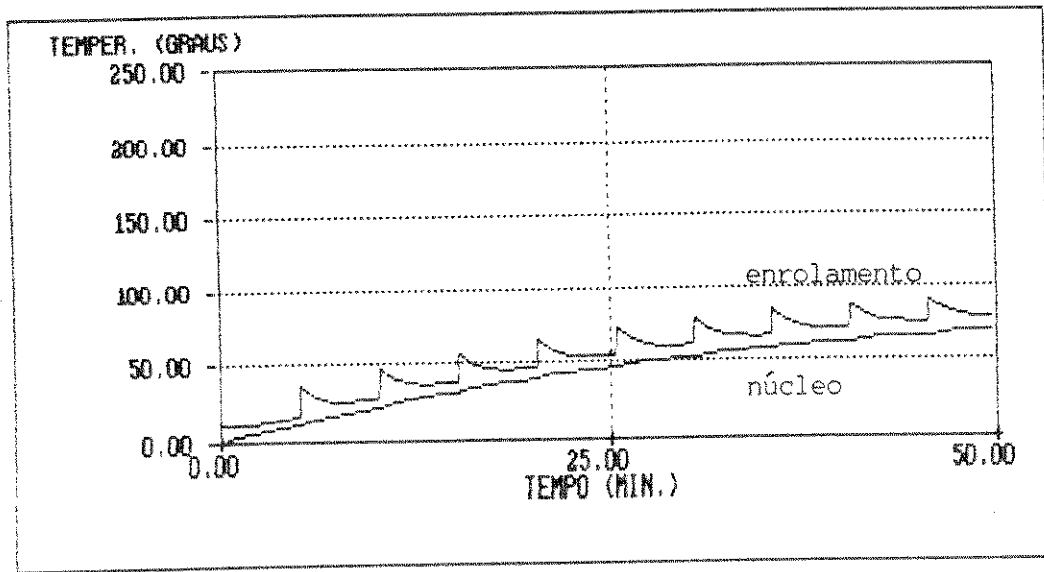


figura 6 71 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime S7, motor de 50 CV, alimentação senoidal

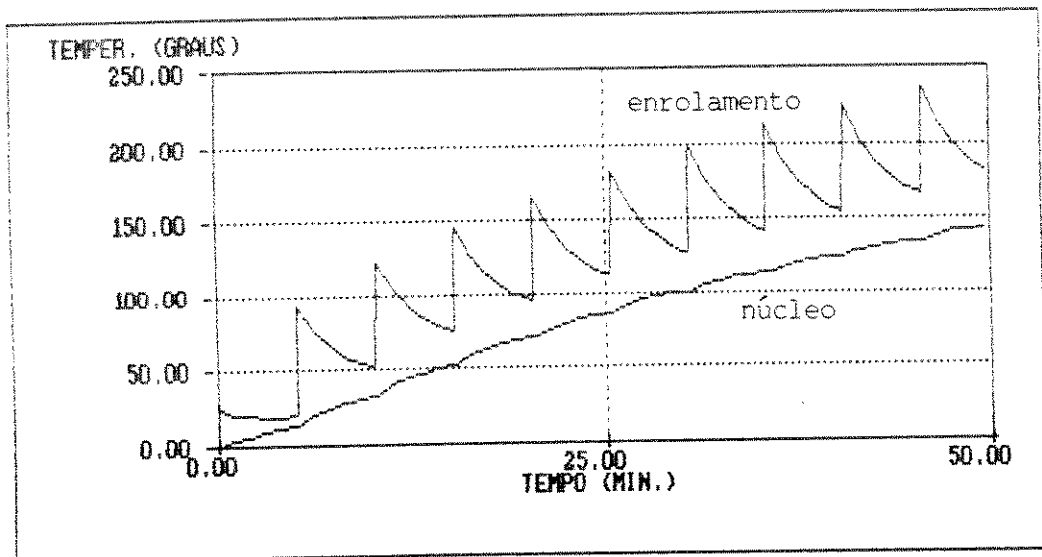


figura 6.72 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime S7, motor de 50 CV, alimentação senoidal

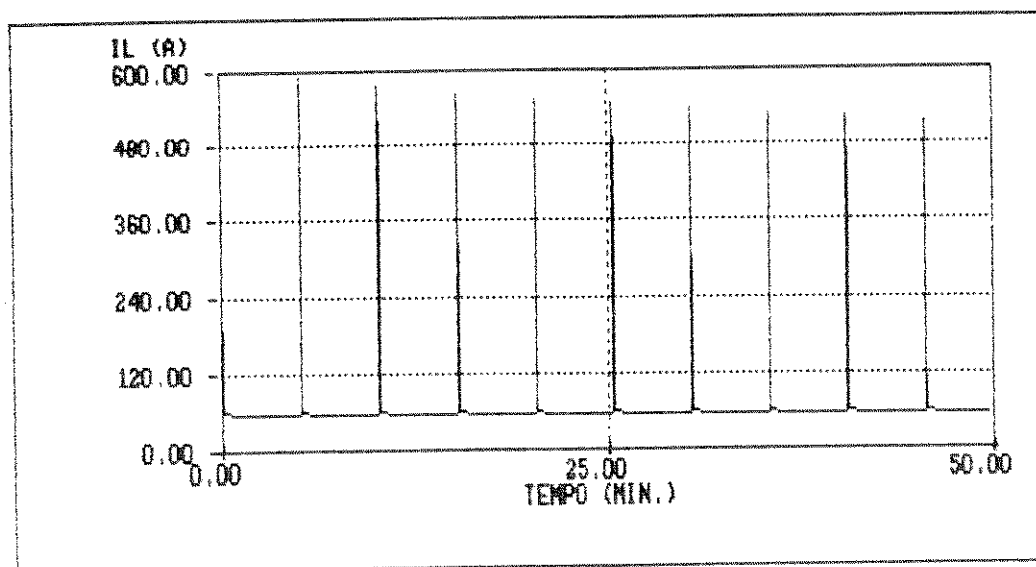


figura 6 73 - Corrente de linha, regime S7, motor de 50 CV, alimentação senoidal

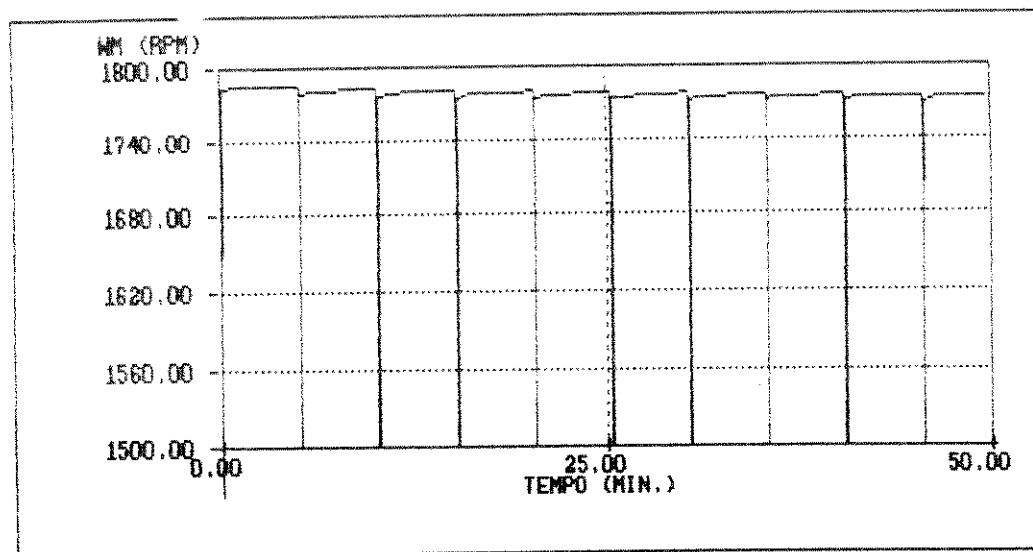


figura 6.74 - velocidade do motor, regime S7, motor de 50 CV, alimentação senoidal

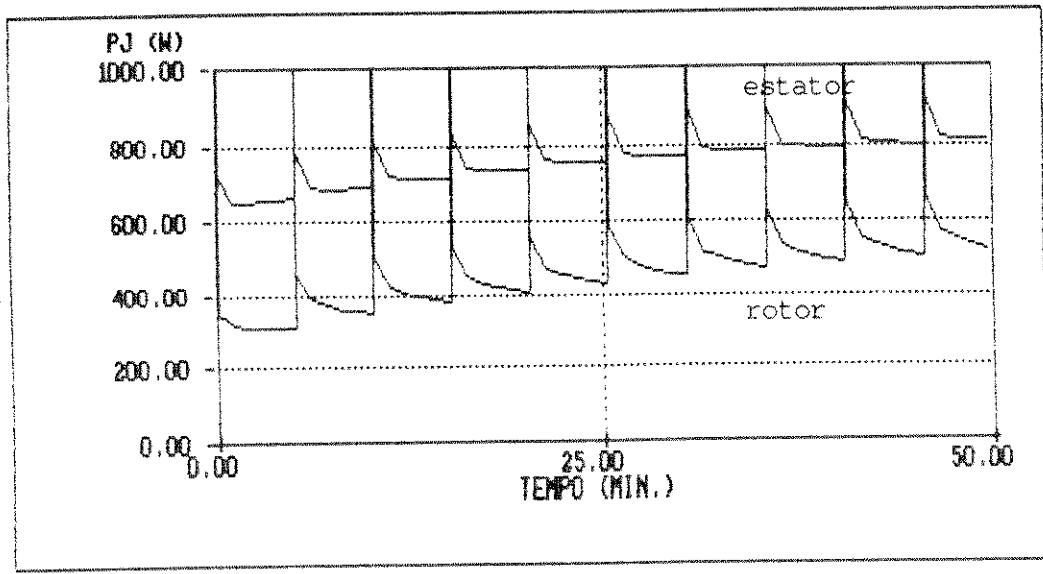


figura 6.75 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime S7, motor de 50 CV, alimentação senoidal

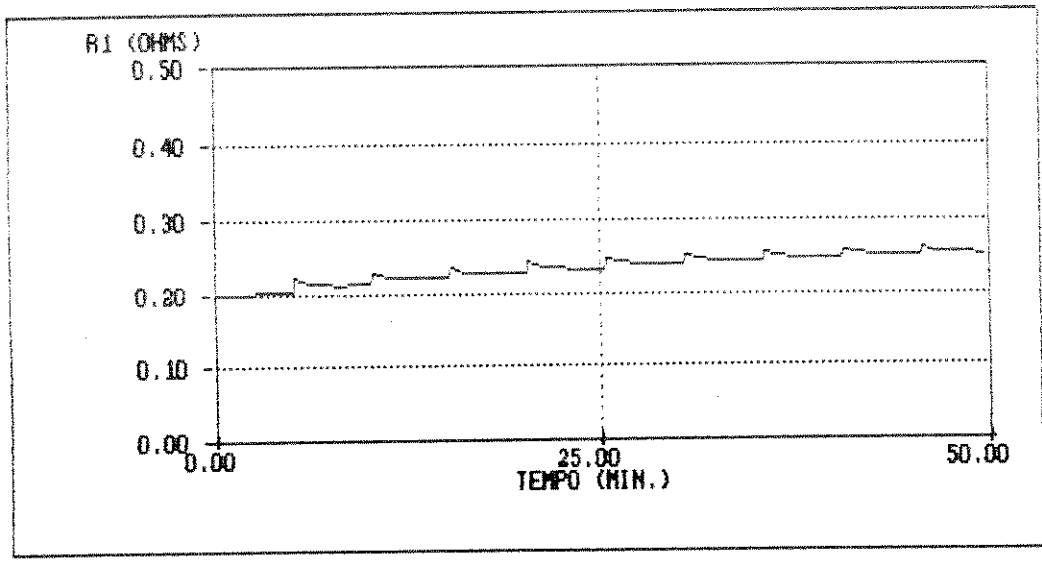


figura 6.76 - Resistência do enrolamento do estator, regime S7, motor de 50 CV, alimentação senoidal

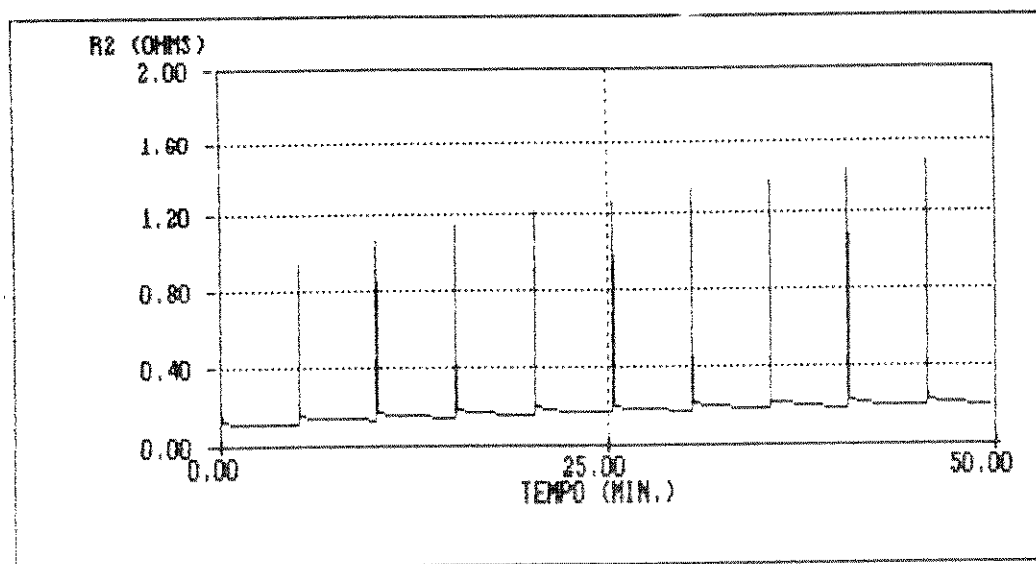


figura 6.77 - Resistência do enrolamento do rotor, regime S7, motor de 50 CV, alimentação senoidal

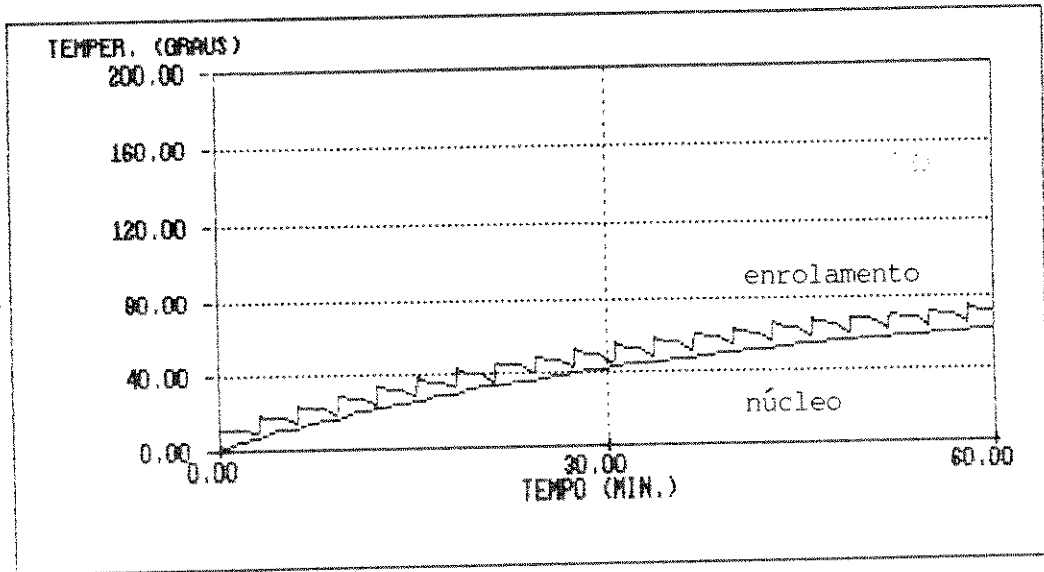


figura 6.78 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime de partidas sucessivas, motor de 50 CV, alimentação senoidal

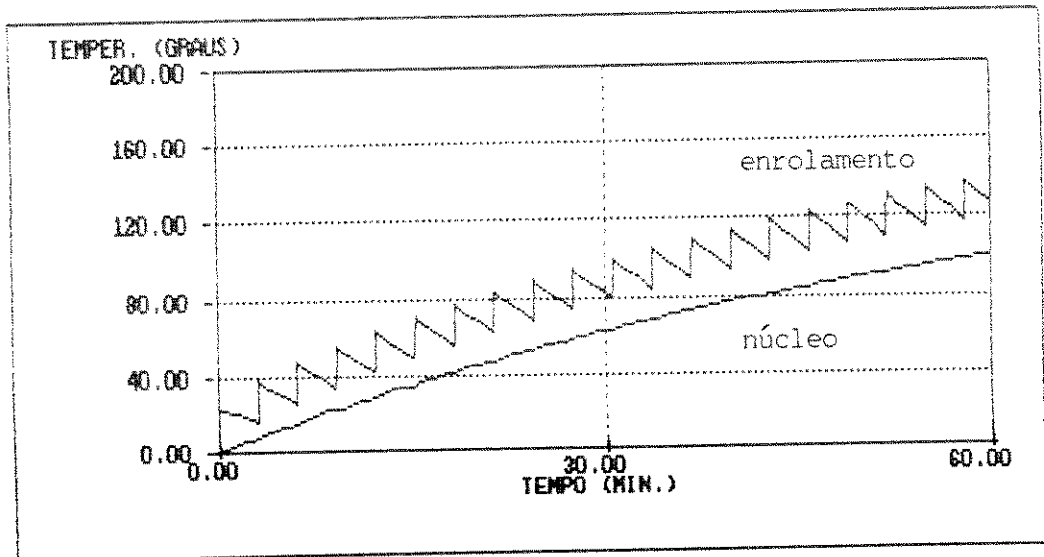


figura 6.79 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime de partidas sucessivas, motor de 50 CV, alimentação senoidal

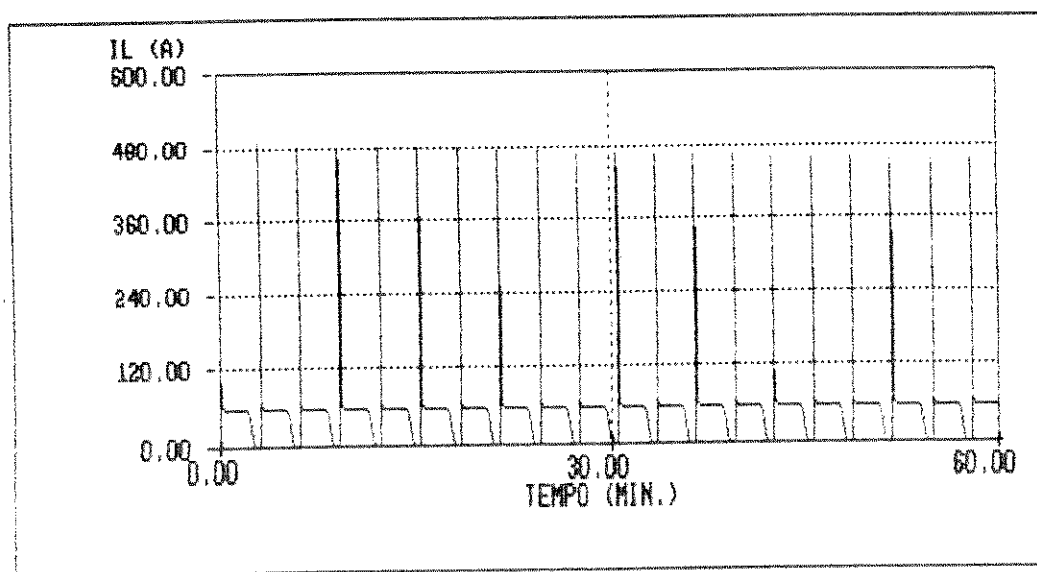


figura VI.80 - Corrente de linha, regime de partidas sucessivas, motor de 50 CV, alimentação senoidal

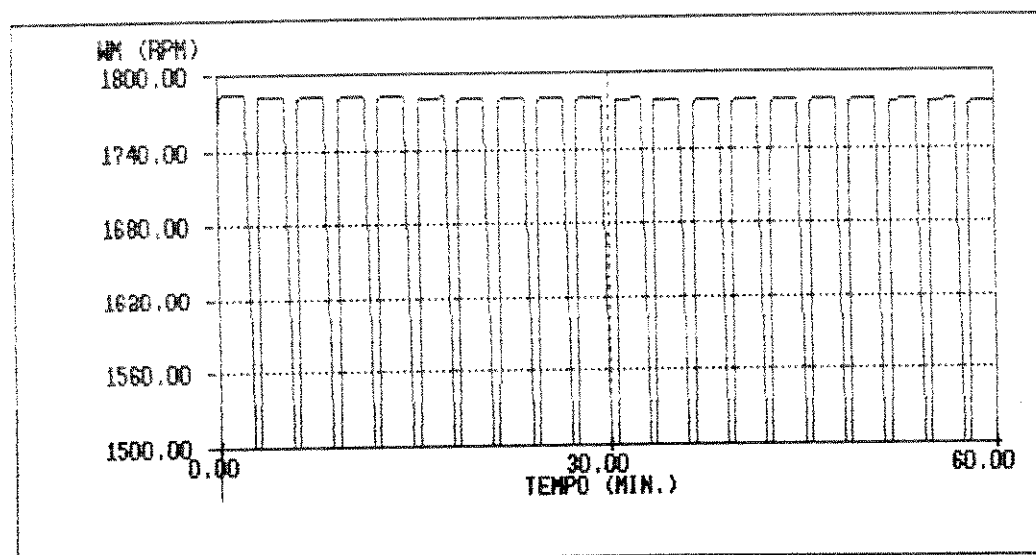


figura 6.81 - velocidade do motor, regime de partidas sucessivas, motor de 50 CV, alimentação senoidal

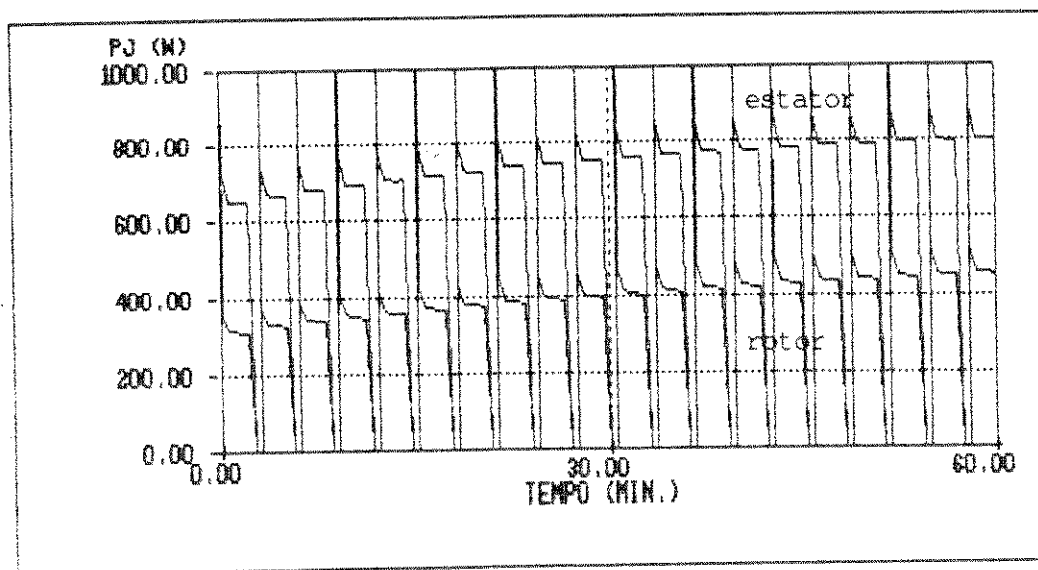


figura 6.82 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime de partidas sucessivas, motor de 50 CV, alimentação senoidal

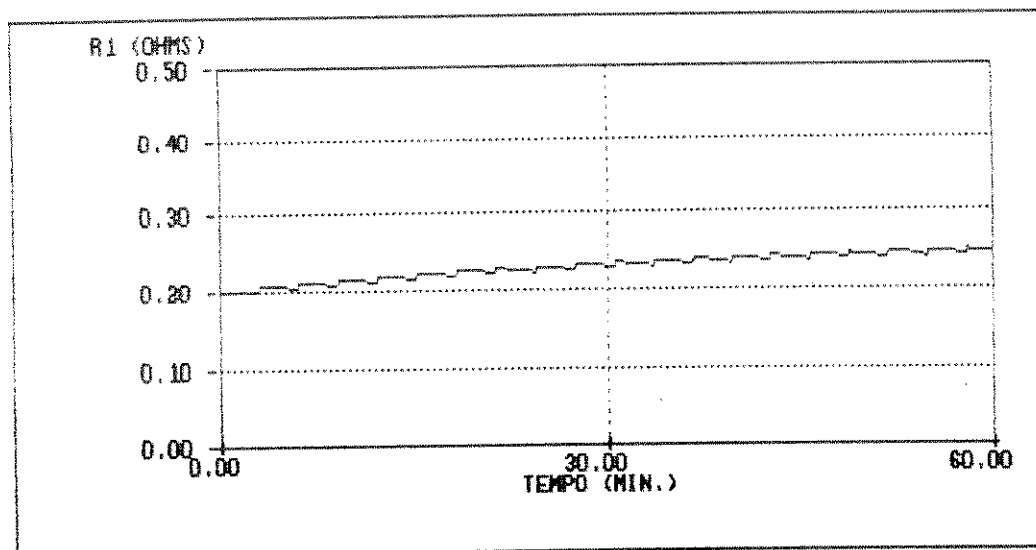


figura 6.83 - Resistência do enrolamento do estator, regime de partidas sucessivas, motor de 50 CV, alimentação senoidal

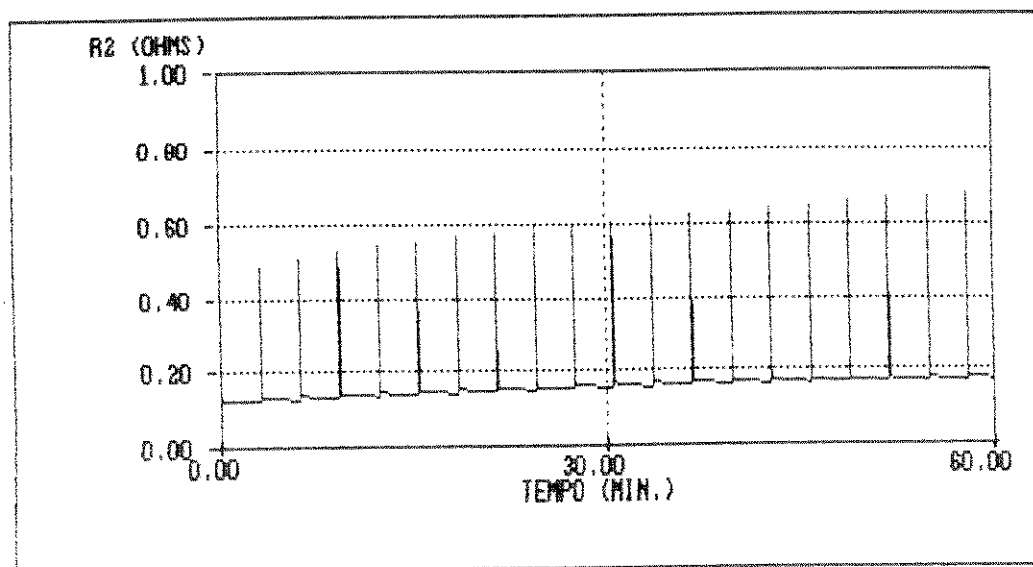


figura 6.84 - Resistência do enrolamento do rotor, regime de partidas sucessivas, motor de 50 CV, alimentação senoidal

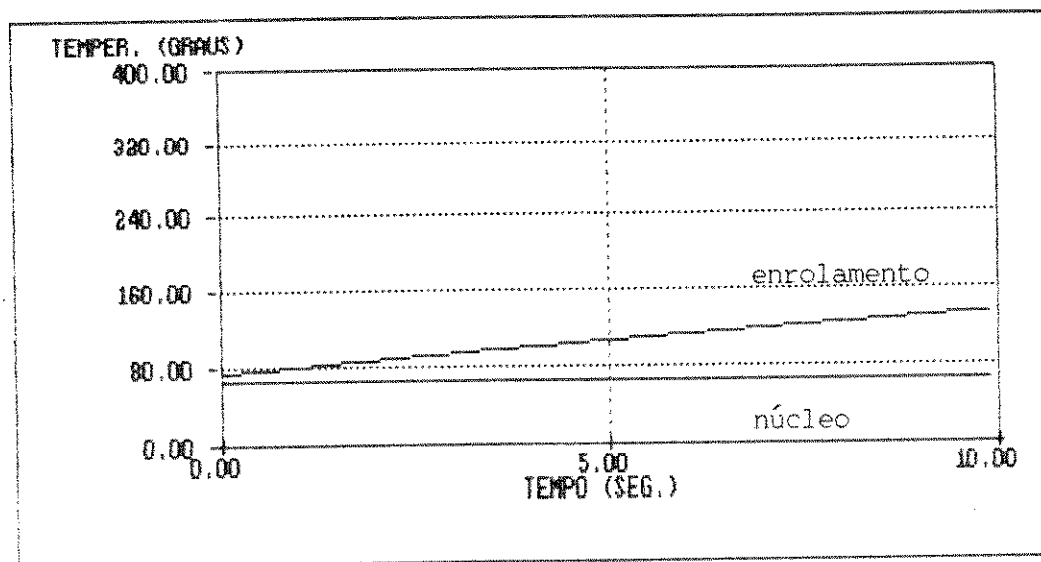


figura 6.85 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime de rotor bloqueado, motor de 50 CV, alimentação senoidal

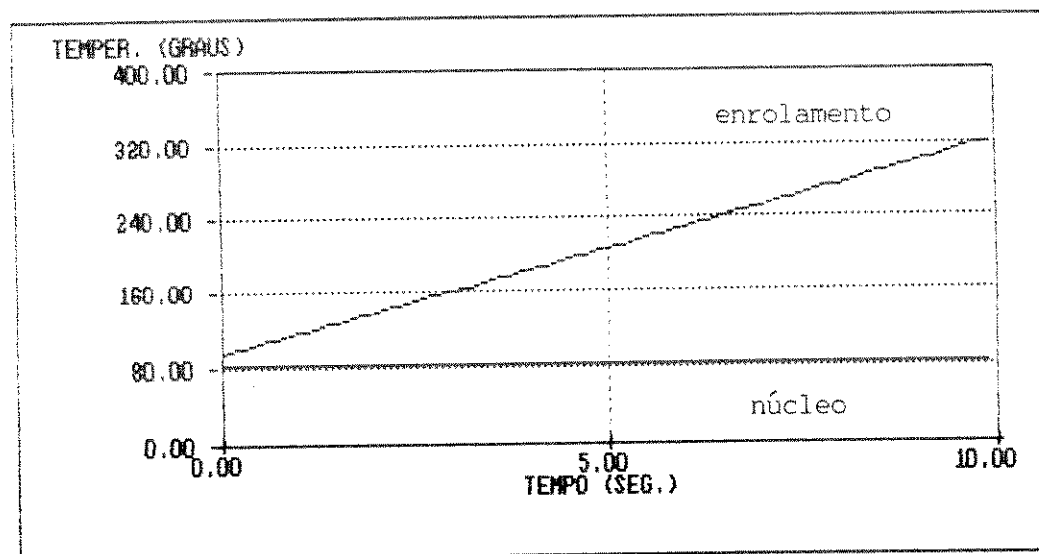


figura 6.86 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime de rotor bloqueado, motor de 50 CV, alimentação senoidal

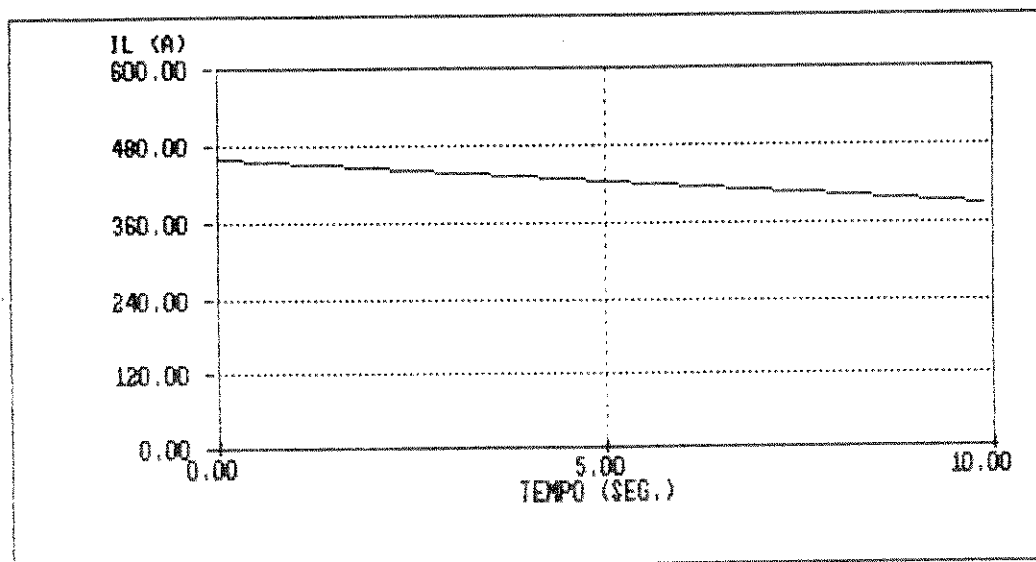


figura 6 87 - Corrente de linha, regime de rotor bloqueado, motor de 50 CV, alimentação senoidal

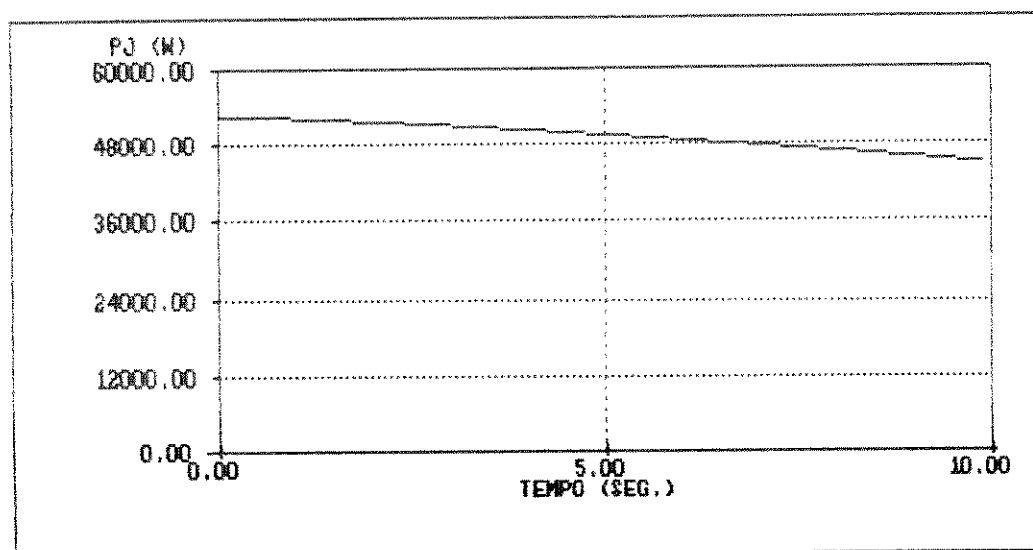


figura 6.88 - Potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor, regime de rotor bloqueado, motor de 50 CV, alimentação senoidal

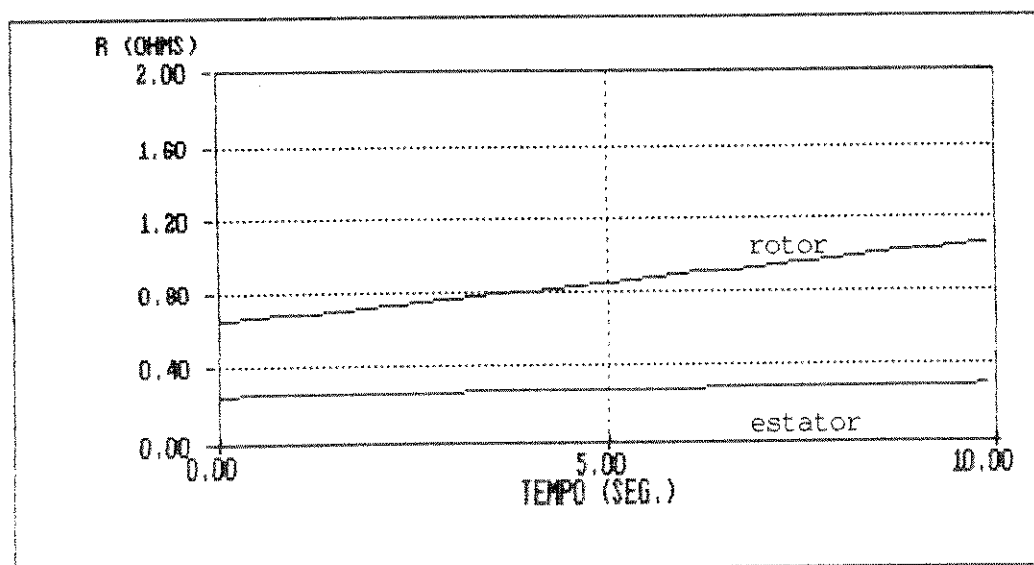


figura 6.89 - Resistências dos enrolamentos do estator e do rotor, regime de rotor bloqueado, motor de 50 CV, alimentação senoidal

VI.6 - COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES COM OS FORNECIDOS PELO FABRICANTE - MOTOR DE 50 CV

A seguir apresentam-se os resultados obtidos nas simulações para o regime S1, após o tempo de duração do funcionamento do motor e os resultados, fornecidos pelo fabricante, obtidos no ensaio de elevação de temperatura para o regime S1.

Tabela 6.2 - Resultados obtidos na simulação e no ensaio de elevação de temperatura do fabricante

MOTOR DE 50 CV		
	SIMULAÇÃO	FABRICANTE
POTÊNCIA MECÂNICA (W)	35644.49	36800.00
VELOCIDADE (rpm)	1779.58	1778.00
CONJUGADO DO MOTOR (Nm)	191.28	197.57
CORRENTE DE LINHA (A)	56.89	57.30
POTÊNCIA DE ENTRADA (W)	38271.22	40160.00
FATOR DE POTÊNCIA	0.88	0.88
RENDIMENTO	0.93	0.92
ELEV. TEMP. ENROL. ESTATOR (°C)	73.75	76.40
RESISTÊNCIA DO ESTATOR (Ω)	0.25	0.25

VI.7 - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA UM MOTOR DE 50 CV COM
ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL

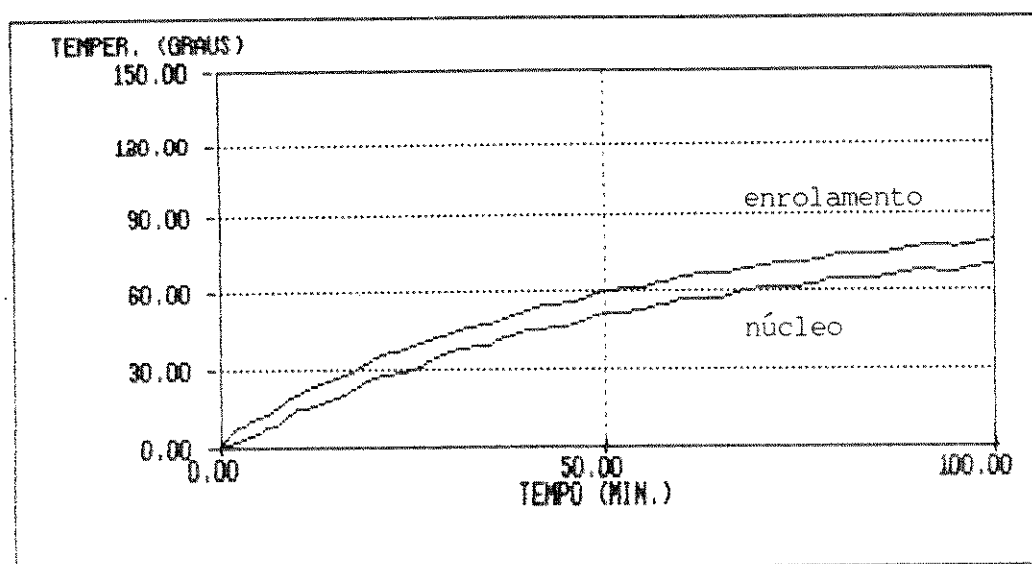


figura 6.90 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do estator, regime de velocidade variável, motor de 50 CV alimentação não senoidal

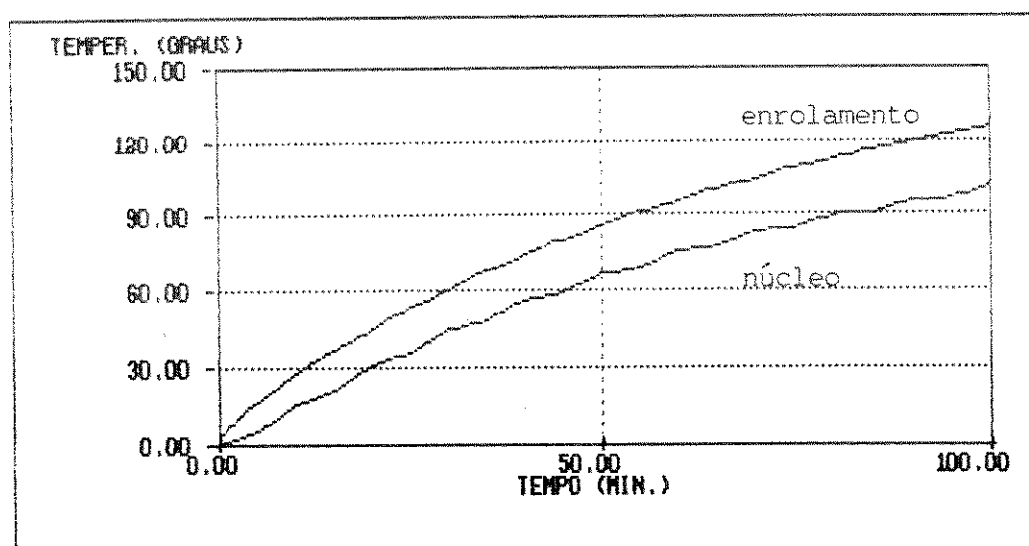


figura-6.91 - Elevação de temperatura no enrolamento e no núcleo do rotor, regime de velocidade variável, motor de 50 CV, alimentação não senoidal

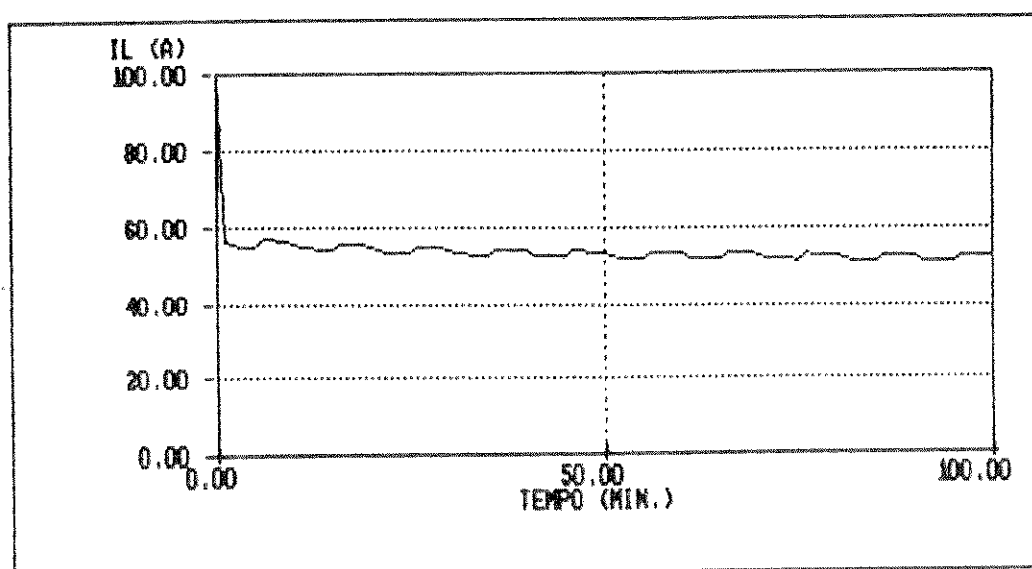


figura 6.92 - Corrente de linha, regime de velocidade variável, motor de 50 CV, alimentação não senoidal

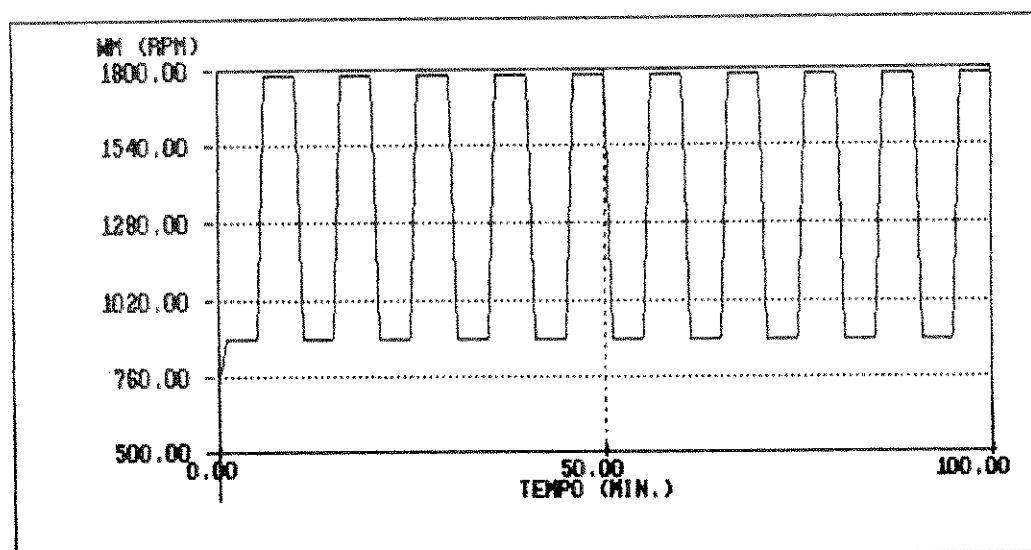


figura 6.93 - velocidade do motor, regime de velocidade variável, motor de 50 CV, alimentação não senoidal

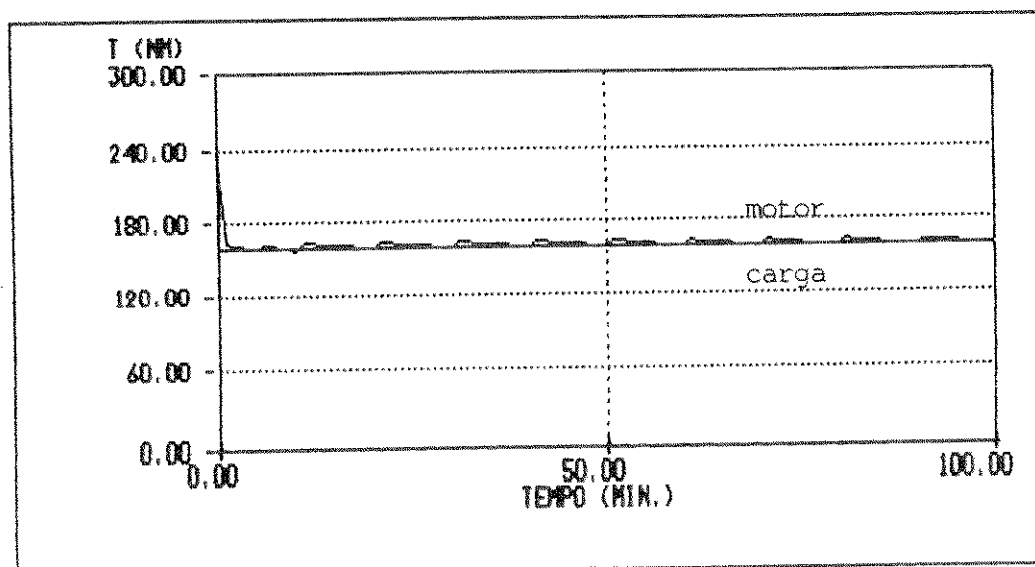


figura 6.94 - conjugados de carga e desenvolvido pelo motor, regime de velocidade variável, motor de 50 CV, alimentação não senoidal

VI.8 - COMENTÁRIOS

As curvas que mostram a elevação de temperatura devem ser observadas e confrontadas com os limites de temperatura apresentados pelas normas ou catálogos de fabricantes para que uma decisão de uso do motor, em estudo, seja tomada.

Com isso pode-se verificar se um dado motor é termicamente viável para ser utilizado num dado acionamento seja ele com alimentação senoidal ou não (inversores).

Apresentam-se também, para efeito ilustrativo, curvas de corrente de linha, velocidade do motor, potências dissipadas nos enrolamentos do estator e do rotor e resistências elétricas dos enrolamentos, todas em função do tempo.

As tabelas 6.1 e 6.2 mostram resultados compatíveis entre o modelo e os ensaios de elevação de temperatura executados pelo fabricante nos motores de 10 CV e 50 CV para o regime S1.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

O trabalho se propôs a obter um modelo matemático térmico e elétrico de um motor de indução com rotor em gaiola baseado exclusivamente em dados de catálogos e de informações técnicas de fabricantes.

Um modelo deste tipo se presta, fundamentalmente, ao serviço de especificação de motores, para um dado acionamento com alimentação senoidal ou não senoidal (inversores), dentre os normalmente apresentados em catálogos. Para executar esta tarefa o engenheiro, muitas vezes, é obrigado a consultar o fabricante sobre a possibilidade de usar um dado motor.

Por outro lado o fabricante, em geral, por não conhecer a aplicação a que se propõe o motor, não se sente seguro em dar informações ao usuário.

A intenção é, então, a de compatibilizar os dados e informações gerais apresentadas pelo fabricante com os conhecimentos do acionamento que o engenheiro deve ter.

O modelo proposto foi verificado em laboratório através de ensaios realizados em um motor de 3 CV e se mostrou adequado para o fim a que se propôs. Foram simulados casos de operação de motores de 10 CV e de 50 CV e os resultados confrontados com os experimentais fornecidos pelo fabricante. Observou-se boa concordância entre os resultados.

O modelo apresentado é simples e exige nada mais do que um

computador pessoal para ser usado. Os dados de entrada, como mostra o trabalho, podem ser obtidos nos catálogos e informações técnicas dos fabricantes e no próprio trabalho (tabelas apresentadas). Desta forma, tanto o usuário do motor como o próprio fabricante pode utilizá-lo com facilidade.

Seria interessante que os fabricantes utilizassem esse modelo para adequarem os dados de catálogos às aplicações mais comumente apresentadas pelos seus clientes já que os dados apresentados nos catálogos nem sempre são os reais dos motores mas os valores limites especificados por normas técnicas.

Como sugestões para novos trabalhos pode-se propor : 1) trabalho mais próximo dos fabricantes e do COBEI/ABNT no sentido de aperfeiçoar os dados de catálogos apresentados pelos fabricantes, 2) desenvolvimento de um modelo térmico que considere dados de projeto dos motores apresentados em catálogos para confrontação com os resultados aqui apresentados, 3) considerar a curva conjugado-velocidade da carga em regime transitório (neste trabalho a curva de conjugado-velocidade foi considerada constante), 4) ensaiar motores maiores para confronto de resultados, 5) utilizar o equacionamento do motor através de transformadas de Park ao invés de circuito elétrico equivalente, e 6) desenvolvimento de um modelo térmico que leve em consideração a troca de calor através do entreferro e de outras partes da máquina.

APÊNDICE A

SUBROTINAS UTILIZADAS NO PROGRAMA

A.1 - PROCEDURE DET_PARAMETROS;

Begin

```

if lig > 0 then
  begin
    vfn:=vln;
    ifn:=iln/1.73;
  end
else
  begin
    vfn:=vj1/1.73;
    ifn:=iln;
  end;

pn:=736*pcv;
ns:=120*fn/p;
sn:=(ns-nn)/ns;
wn:=nn/9.55;
sm:=sn*(tm+sqrt(sqr(tm)-1));
z1p:=vfn/(ip*ifn);
i2p:=ip*ifn;
wsn:=ns/9.55;
tn:=pn/wn;
r2p:=tp*tn*wsn/(3*sqr(i2p));
xep:=sqrt(sqr(z1p)-sqr(r10+r2p));
x1:=xep/(1+yx);
x2p:=x1*yx;
i2n:=ifn*fpn*sqrt(1+sqr(sn/(2*sm)));
r2n:=tn*wsn*sn/(3*sqr(i2n));
pen:=3*vfn*ifn*fpn;
pj1:=3*r10*(1+alfae*tref)*sqr(ifn);
pj2:=3*r2n*sqr(i2n);
pfn:=pen-(pn+pj1+pj2+prot);
ks1:=sqrt(1-sqr(fpn));
ze[1]:=r10*(1+alfae*tref);
ze[2]:=x1;
ve[1]:=vfn;
ve[2]:=0;
ie[1]:=ifn*fpn;
ie[2]:=-ifn*ks1;
produto(ie,ze,dev);
subtrai(ve,dve,em);
vmag:=modulo(em);

```

```

rfe:=3*sqr(vmag)/pfn;
x2n:=sqr(sqr(vmag/i2n)-sqr(r2n/sn));
qen:=pen*ks1/fpn;
qxm:=qen-3*(x1*sqr(ifn)+x2n*sqr(i2n));
xm:=3*sqr(vmag)/qxm;

gr:=ln(r2p/r2n)/(1-sqrt(sn));
gx:=ln(x2p/x2n)/(1-sqrt(sn));

r20:=r2p/exp(gr);
x20:=x2p/exp(gx);

cee:=ce1*mee;
cne:=cen*mne;
cer:=ce1*mer;
cnr:=cen*mnr;
gene:=pj1/deltat1;
gnen:=(pj1+pfn/2)/(tisol1-deltat1);
genr:=pj2/(tbarra-tnucleo2);
gnrn:=(pj2+pfn/2)/tnucleo2;

end;

```

A.2 - PROCEDURE RES_CIR_EQUIV;

Begin

```

r1:=r10*(1+alfae*tee);
r2:=r20*(1+alfar*ter)*exp(gr*sqrt(sf));
x2:=x20*exp(gx*sqrt(sf));
z1[1] :=r1;
z1[2] :=x1;
z2[1] :=r2/sf;
z2[2] :=x2;
zm1[1] :=rfe;
zm1[2] :=0;
zm2[1] :=0;
zm2[2] :=xm;
va1[1] :=vfn;
va1[2] :=0;

```

```

z_total;
divide(va1,ztotal,i1);
produto(z1,i1,dv1);
subtrai(va1,dv1,em);
divide(em,z2,i2);
divide(em,zm2,ixm);
divide(em,zm1,irfe);

```

```

is:=modulo(i1);
ir:=modulo(i2);
ife:=modulo(irfe);
imag:=modulo(ixm);
vmag:=modulo(em);
pje:=3*r1*sqr(is);
pjr:=3*r2*sqr(ir);
pfe:=3*rfe*sqr(ife);
pfe1:=kfe1*pfn;
pfe2:=kfe2*pfn;
fi1:=angulo(ztotal);
fp1:=cos(fi1);
t:=3*r2*sqr(ir)/(sf*wsn);
tc:=tn;
pent:=3*vfn*is*fp1;
wm:=wsn*(1-sf);
pmec:=t*wm;
rd:=pmec/pent;

```

end;

A.3 - PROCEDURE DET_TEMPERATURA;

Begin

```

if vent = 0 then
  begin
    kt1:=0.7*ln(wn);
    kt2:=0.7/exp(kt1);
    if sf = 1 then
      begin
        kv:=0.3;
      end
    else
      begin
        kt3:=0.7*ln(wm);
        kv:=0.3+kt2*exp(kt3); (*auto-ventilado*)
      end;
    if vent = 1 then kv:=1.0; (*fechado com ventilação externa*)
    if vent = 2 then kv:=0.3; (*fechado sem ventilação*)

    gne:=kv*gnen;
    gnr:=kv*gnrn;

    dter:=(pjr-genr*(ter-tnr))*dt/cer;
    dtnr:=(genr*(ter-tnr)+pfe2-gnr*tnr)*dt/cnr;
    dtee:=(pjs-gene*(tee-tne))*dt/cee;
    dtne:=(gene*(tee-tne)+pfe1-gne*tne)*dt/cne;

    ter:=ter+dter;
    tnr:=tnr+dtnr;
    tee:=tee+dtee;
    tne:=tne+dtne;

  end;
end;

```

A.4 - PROCEDURE PARTIDA;

Begin

```

passo:=100;
salva:=0;
dt:=0.005;
sf:=1.0;
wm:=0;
res_cir_equiv;

i:=0;
ten[i] :=0;
trn[i] :=0;
tera:=0;
teea:=0;

repeat
  j:=0;
  if t >= 1.02*tc then
    begin
      res_circ_equiv;
      if 1 = salva then armazena(i,passo);
      det_temperatura;
      ds:=(t-tc)*dt/(-jt*wsn);
      sf:=sf+ds;
      wm:=wsn*(1-sf);
      tfu:=tfu+dt;
    end;
  teea:=tee;
  tera:=ter;
  repeat
    res_circ_equiv;
    det_temperatura;
    ten[j+1] :=tee;
    trn[j+1] :=ter;
    if (ten[j+1] - tee) <= 0.1 then tee:=teea;
    if (trn[j+1] - ter) <= 0.1 then ter:=tera;
  inc(j,1);
  until (trn[j] - tera) <= 0.1;
inc(i,1);
until (t <= 1.02*tc);
armazena(i,passo);

end;
```

A.5 - PROCEDURE FRENACAO;

Begin

```

so:=sf;
passo:=100;
salva:=0;
dt:=0.005;
sf:=2-so;

i:=0;
repeat
j:=0;
  if sf >= 1.01 then
  begin
    res_circ_equiv;
    if i = salva then armazena(i,passo);
    det_temperatura;
    ds:=(t-tc)*dt/(-jt*wsn);
    sf:=sf+ds;
    wm:=wsn*(sf-1);
    tfu:=tfu+dt;
  end;
  teea:=tee;
  tera:=ter;
  repeat
    res_circ_equiv;
    det_temperatura;
    ten[j+1] :=tee;
    trn[j+1] :=ter;
    if (ten[j+1] - tee) <= 0.1 then tee:=teea;
    if (trn[j+1] - ter) <= 0.1 then ter:=tera;
  inc(j,1);
  until (trn[j] - tera) <= 0.1;
inc(i,1);
until sf<= 1.01;
armazena(i,passo);

end;
```

A.6 - PROCEDURE DET_ESCORREGAMENTO;

Begin

```
h1:=3*sqr(vfn)/(wsn*tc);
h2:=r20*(1+alfar*ter)*exp(gr*sqr(sf));
h3:=r10*(1+alfae*tee);
h4:=sqr(x1+x2);
aa:=sqr(h3)+h4;
bb:=2*h2*h3-h1*h2;
cc:=sqr(h2);
rdelta:=sqr(sqr(bb)-4*aa*cc);
sf:=(-bb-rdelta)/(2*aa);
wm:=wsn*(1-sf);
```

end;

A.7 - PROCEDURE REGIME_S1;

Begin

```

writeln(' :5,ENTRE COM O TEMPO DE FUNCIONAMENTO EM HORAS :
        TFUNC = ');
readln(tfunc);
ton:=tfunc*3600;

partida;
salva:=60;
passo:=60;
dt:=1.0;

for d1:=1 to ton do
  begin
    tfu:=tfu+dt;
    res_circ_equiv;
    det_temperatura;
    det_ecorregamento;
    if d1 = salva then armazena(i,passo);
  end;
writeln(' :5,'VALORES OBTIDOS APOS O TERMINO DO ENSAIO')
writeln;writeln;
writeln(' :5, POTENCIA MECANICA - ',PMEC:10:2, ' W');
writeln(' :5, VELOCIDADE - ',WM:10:2, ' RPM');
writeln(' :5, CONJUGADO DESENVOLVIDO - ',T:10:2, ' NM');
writeln(' :5, CORRENTE DE LINHA - ',IL:10:2, ' IS');
writeln(' :5, POTENCIA DE ENTRDA - ',PENT:10:2, ' W');
writeln(' :5, FATOR DE POTENCIA - ',FP1:10:2);
writeln(' :5, RENDIMENTO - ',RD:10:2);
writeln(' :5, ELEV. TEMP. ENROL. EST. - ',TEE:10:2, ' GRAUS');
writeln(' :5, RESISTENCIA DO ESTATOR - ',R1:10:2, ' OHMS');

end;

```

APÊNCIDE B

DADOS E PARÂMETROS UTILIZADOS

B.1 - INTRODUÇÃO

Neste apêndice apresentam-se os dados dos motores necessários para a resolução do modelo matemático, os valores dos parâmetros do circuito elétrico equivalente e do circuito térmico dos motores, calculados de acordo com as equações desenvolvidas no capítulo II e III e os dados do conversor.

B.2 - DADOS E PARÂMETROS DO MOTOR DE 3 CV

- MODELO	: 182.T
- CATEGORIA	: N
- CLASSE DE ISOLAMENTO	: B
- REGIME DE FUNCIONAMENTO	: S1
- TIPO DE VENTILAÇÃO	: ABERTO
- FATOR DE SERVIÇO	: 1.15
- PROTEÇÃO	: IP21
- POTÊNCIA MECÂNICA	: PCV = 3 CV
- TENSÃO DE LINHA	: VLN = 220.0 V
- CORRENTE DE LINHA	: ILN = 9.0 A
- VELOCIDADE NOMINAL	: NN = 1730 rpm

- CORRENTE DE PARTIDA	: IP = 5.5 pu
- CONJUGADO DE PARTIDA	: TP = 2.8 pu
- CONJUGADO MÁXIMO	: TM = 2.4 pu
- RENDIMENTO NOMINAL	: RDN = 0.82
- FATOR DE POTÊNCIA NOMINAL	: FPN = 0.77
- FREQUÊNCIA NOMINAL	: FN = 60 Hz
- MOMENTO DE INÉRCIA TOTAL	: JT = 0.24 kgm ²
- TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO	: TRB = 6.0 s
- NÚMERO DE PÓLOS	: P = 4
- TIPO DE LIGAÇÃO DO ESTATOR (1-Δ , 0-Y)	: LIG = 1
- RELAÇÃO DAS REATÂNCIAS ESTATOR/ROTOR	: Y = 0.67
- PERDAS ROTACIONAIS	: PROT = 44.0 W
- RESISTÊNCIA DO ESTATOR (20°C)	: R1 = 2.31 Ω
- FATOR DE CORREÇÃO DE R1 (ALUMÍNIO)	: CE1 = 0.00408 °C ⁻¹
- FATOR DE CORREÇÃO DE R2 (ALUMÍNIO)	: CE2 = 0.00408 °C ⁻¹
- MASSA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR	: MEE = 1.598 kg
- MASSA DO NÚCLEO DO ESTATOR	: MNE = 7.6 kg
- MASSA DO ENROLAMENTO DO ROTOR	: MER = 0.66 kg
- MASSA DO NÚCLEO DO ROTOR	: MNR = 3.9 kg
- CALOR ESPECÍFICO DO ENROL. DO ESTATOR	: CEE = 880 W/°C s kg
- CALOR ESPECÍFICO DO ENROL. DO ROTOR	: CER = 880 W/°C s kg
- CALOR ESPECÍFICO DOS NÚCLEOS	: CEN = 460 W/°C s kg
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DO ISOL. DO ESTATOR	: TISOL1 = 80°C
- DIFERENÇA DE TEMPERATURA Δθ _e	: DELTAT1 = 10°C
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DAS BARRAS DO ROTOR	: TBARRA = 90°C
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DO NÚCLEO DO ROTOR	: TNUCLEO2 = 80°C
- TIPO DE VENTILAÇÃO - AUTO-VENTILADO	: VENT = 0

B.2.1 - Parâmetros calculados do circuito elétrico equivalente

Parâmetros do estator

$$R_1 = 2.3100 \, \Omega$$

$$X_1 = 3.5336 \, \Omega$$

$$R_{fe} = 2008.0135 \, \Omega$$

$$X_m = 87.9959 \, \Omega$$

parâmetros do rotor

na partida

$$R_{2p} = 2.6191 \, \Omega$$

$$X_{2p} = 2.3675 \, \Omega$$

na condição nominal

$$R_{2n} = 1.8341 \, \Omega$$

$$X_{2n} = 12.1339 \, \Omega$$

B.2.2 - Parâmetros calculados do circuito térmico

estator

$$C_{ee} = 1406.24 \text{ W s/}^{\circ}\text{C}$$

$$C_{ne} = 3496.0 \text{ W s/}^{\circ}\text{C}$$

$$G_{ene} = 24.4945 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$G_{ne} = 3.9101 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

rotor

$$C_{er} = 580.8 \text{ W s/}^{\circ}\text{C}$$

$$C_{nr} = 1799.98 \text{ W s/}^{\circ}\text{C}$$

$$G_{enr} = 8.9341 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

$$G_{nr} = 1.4763 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$$

B.3 - DADOS E PARÂMETROS DO MOTOR DE 10 CV

- MODELO	: 132.S
- CATEGORIA	: N
- CLASSE DE ISOLAMENTO	: B
- REGIME DE FUNCIONAMENTO	: S1
- TIPO DE VENTILAÇÃO	: FECHADO
- FATOR DE SERVIÇO	: 1.15
- PROTEÇÃO	: IP54
- POTÊNCIA MECÂNICA	: PCV = 10 CV
- TENSÃO DE LINHA	: VLN = 220.0 V
- CORRENTE DE LINHA	: ILN = 29.0 A
- VELOCIDADE NOMINAL	: NN = 1760 rpm
- CORRENTE DE PARTIDA	: IP = 7.4 pu
- CONJUGADO DE PARTIDA	: TP = 2.54 pu
- CONJUGADO MÁXIMO	: TM = 3.7 pu
- RENDIMENTO NOMINAL	: RDN = 0.848
- FATOR DE POTÊNCIA NOMINAL	: FPN = 0.78
- FREQUÊNCIA NOMINAL	: FN = 60 Hz
- MOMENTO DE INÉRCIA TOTAL	: JT = 0.356 kgm ²
- TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO	: TRB = 6.0 s
- NÚMERO DE PÓLOS	: P = 4
- TIPO DE LIGAÇÃO DO ESTATOR (1-Δ , 0-Y)	: LIG = 1
- RELAÇÃO DAS REATÂNCIAS ESTATOR/ROTOR	: YX = 0.67
- PERDAS ROTACIONAIS	: PROT = 97.3 W
- RESISTÊNCIA DO ESTATOR (25°C)	: R1 = 0.452 Ω
- FATOR DE CORREÇÃO DE R1 (COBRE)	: CE1 = 0.00393 °C ⁻¹

- FATOR DE CORREÇÃO DE R2 (ALUMÍNIO)	: CE2 = 0.00408°C ⁻¹
- MASSA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR	: MEE = 5.28 kg
- MASSA DO NÚCLEO DO ESTATOR	: MNE = 16.48 kg
- MASSA DO ENROLAMENTO DO ROTOR	: MER = 1.60 kg
- MASSA DO NÚCLEO DO ROTOR	: MNR = 10.79 kg
- CALOR ESPECÍFICO DO ENROL. DO ESTATOR	: CEE = 388 W/°C s kg
- CALOR ESPECÍFICO DO ENROL. DO ROTOR	: CER = 880 W/°C s kg
- CALOR ESPECÍFICO DOS NÚCLEOS	: CEN = 460 W/°C s kg
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DO ISOL. DO ESTATOR	: TISOL1 = 80°C
- DIFERENÇA DE TEMPERATURA $\Delta\theta_e$: DELTAT1 = 10°C
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DAS BARRAS DO ROTOR	: TBARRA = 90°C
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DO NÚCLEO DO ROTOR	: TNUCLEO2 = 80°C
- TIPO DE VENTILAÇÃO - FECHADO	: VENT = 1

B.3.1 - Parâmetros calculados do circuito elétrico equivalente

parâmetros do estator

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 0.452 \, \Omega \\
 X_1 &= 0.9267 \, \Omega \\
 R_{fe} &= 240.9323 \, \Omega \\
 X_m &= 35.0074 \, \Omega
 \end{aligned}$$

Parâmetros do rotor

na partida

$$R_{2p} = 0.4142 \Omega$$

$$X_{2p} = 0.6209 \Omega$$

na condição nominal

$$R_{2n} = 0.3246 \Omega$$

$$X_{2n} = 5.0855 \Omega$$

B.3.2 - Parâmetros calculados do circuito térmico

estator

$$C_{ee} = 2048.64 \text{ W s/}^\circ\text{C}$$

$$C_{ne} = 7580.80 \text{ W s/}^\circ\text{C}$$

$$G_{ene} = 49.3343 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$G_{ne} = 10.7026 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

rotor

$$C_{er} = 1408.0 \text{ W s/}^\circ\text{C}$$

$$C_{nr} = 4963.4 \text{ W s/}^\circ\text{C}$$

$$G_{enr} = 16.7273 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$G_{nr} = 5.2889 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

B.4 - DADOS E PARÂMETROS DO MOTOR DE 50 CV

- MODELO	: 200.L
- CATEGORIA	: N
- CLASSE DE ISOLAMENTO	: B
- REGIME DE FUNCIONAMENTO	: S1
- TIPO DE VENTILAÇÃO	: FECHADO
- FATOR DE SERVIÇO	: 1.15
- PROTEÇÃO	: IP54
- POTÊNCIA MECÂNICA	: PCV = 50 CV
- TENSÃO DE LINHA	: VLN = 440.0 V
- CORRENTE DE LINHA	: ILN = 59.7 A
- VELOCIDADE NOMINAL	: NN = 1785 rpm
- CORRENTE DE PARTIDA	: IP = 8.2 pu
- CONJUGADO DE PARTIDA	: TP = 2.98 pu
- CONJUGADO MÁXIMO	: TM = 2.93 pu
- RENDIMENTO NOMINAL	: RDN = 0.916
- FATOR DE POTÊNCIA NOMINAL	: FPN = 0.88
- FREQUÊNCIA NOMINAL	: FN = 60 Hz
- MOMENTO DE INÉRCIA TOTAL	: JT = 4.949 kgm ²
- TEMPO DE ROTOR BLOQUEADO	: TRB = 10.0 s
- NÚMERO DE PÓLOS	: P = 4
- TIPO DE LIGAÇÃO DO ESTATOR (1-Δ , 0-Y)	: LIG = 1
- RELAÇÃO DAS REATÂNCIAS ESTATOR/ROTOR	: YX = 0.67
- PERDAS ROTACIONAIS	: PROT = 680.2 W
- RESISTÊNCIA DO ESTATOR (25°C)	: R1 = 0.193 Ω
- FATOR DE CORREÇÃO DE R1 (COBRE)	: CE1 = 0.00393 °C ⁻¹

- FATOR DE CORREÇÃO DE R2 (ALUMÍNIO)	: CE2 = 0.00408°C ⁻¹
- MASSA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR	: MEE = 19.8 kg
- MASSA DO NÚCLEO DO ESTATOR	: MNE = 71.85 kg
- MASSA DO ENROLAMENTO DO ROTOR	: MER = 7.17 kg
- MASSA DO NÚCLEO DO ROTOR	: MNR = 54.57 kg
- CALOR ESPECÍFICO DO ENROL. DO ESTATOR	: CEE = 388 W/°C s kg
- CALOR ESPECÍFICO DO ENROL. DO ROTOR	: CER = 880 W/°C s kg
- CALOR ESPECÍFICO DOS NÚCLEOS	: CEN = 460 W/°C s kg
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DO ISOL. DO ESTATOR	: TISOL1 = 80°C
- DIFERENÇA DE TEMPERATURA $\Delta\theta_e$: DELTAT1 = 10°C
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DAS BARRAS DO ROTOR	: TBARRA = 90°C
- TEMPERATURA ADMISSÍVEL DO NÚCLEO DO ROTOR	: TNUCLEO2 = 80°C
- TIPO DE VENTILAÇÃO - FECHADO	: VENT = 1

B.4.1 - Parâmetros calculados do circuito elétrico equivalente

parâmetros do estator

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 0.193 \, \Omega \\
 X_1 &= 0.8449 \, \Omega \\
 R_{fe} &= 375.5831 \, \Omega \\
 X_m &= 58.4261 \, \Omega
 \end{aligned}$$

parâmetros do rotor

na partida

$$R_{2p} = 0.4604 \Omega$$

$$X_{2p} = 0.5661 \Omega$$

na condição nominal

$$R_{2n} = 0.1109 \Omega$$

$$X_{2n} = 3.4425 \Omega$$

B.4.2 - Parâmetros calculados do circuito térmico

estator

$$C_{ee} = 7682.4 \text{ W s/}^\circ\text{C}$$

$$C_{ne} = 33051.0 \text{ W s/}^\circ\text{C}$$

$$G_{ene} = 89.2732 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$G_{ne} = 22.7754 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

rotor

$$C_{er} = 6309.6 \text{ W s/}^\circ\text{C}$$

$$C_{nr} = 25102.2 \text{ W s/}^\circ\text{C}$$

$$G_{enr} = 30.9244 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

$$G_{nr} = 12.6349 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

B.5 - DADOS DO CONVERSOR

MARCA : TELEMECANIQUE

MODELO : ALTIVAR VP3-BD501E127(BR)

POTÊNCIA : 2.2 kW

TENSÃO : 220 V

CORRENTE : 12 A

BIBLIOGRAFIA

- [1] - De Sá, J.S. - "Contribuição à Análise do Comportamento Térmico de Motores de Indução Trifásicos com Rotor do Tipo Gaiola", Tese de Doutorado Apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Unicamp, Campinas-SP, 1989
- [2] - Ruppert Filho, E.; Arango, H.; De Sá, J.S. - "Analysis of Squirrel Cage Induction Motor Rotor Bars Thermal Behavior" Proc. of International Conference on Electrical Machines, pp. 245-250, Massachusetts, USA, 1990
- [3] - Juri, G.F. - "Supervisão em Tempo Real de Motores de Indução Trifásicos", Tese de Mestrado apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá - MG, 1991
- [4] - NBR 7094 - "Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução", Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, Dez/1981
- [5] - Zhu, D.S.; Champenois, G.; Gruszczynski, P. "Coupling of Electrical and Thermal Models of an Induction Motor for Performance Predictions", Proc. International Conference on Electrical Machines, pp. 281-286, Massachusetts, USA, 1990

- [6] - Kostenko, M.; Piotrovsky, L. - "Electrical Machines", Ed. Mir, Moscow - URSS, pp. 151-159, 1969
- [7] - Klingshirn, E.A.; Jordan, H.A. - "Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources", IEEE Trans. on PAS, vol. 87, nº 3, March 1968
- [8] - Lobosco, O.S.; Dias, J.L.P.C. - "Seleção e Aplicação de Motores Elétricos", vol. 1 e 2, McGraw-Hill, São Paulo, 1988
- [9] - Chalmers, B.J.; Sarkar, B.R. - "Induction-Motor Losses due to Nonsinusoidal Supply Waveforms", Proc. IEE, vol. 115, nº 12, December 1968
- [10] - Dewan, S.B.; Slemon, G.R.; Straughen, A. - "Power Semiconductor Drives", John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 220-254, 1984
- [10] - Alger, P.L. - "Induction Machines", 2ª Edition, Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA, 1970
- [11] - Heidbreder, J.F. - "Induction Motor Temperature Characteristics", AIEE Trans. on PAS, vol. 77, nº 4, pp. 800-804, Oct. 1968

- [12] - Enjeti, P.N.; Lindsay, J.F. - "Steady State and Transient Behavior of PWM Inverter Fed Induction Motor", Electric Machines and Power Systems, vol. 16, 1989
- [13] - Cummings, P.G. - "Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-22, nº 6, pp. 1121-1126, November/December, 1988
- [14] - Ruppert Filho, E.; Avolio, E. - "Estudo do Comportamento Térmico de um Motor de Indução Através de um Circuito Elétrico Análogo", II Seminário Internacional de Motores Elétricos e Acionamentos Reguláveis - SIMEAR, vol. 3, pp. 67-85, 1991
- [15] - Avolio, E.; Ruppert Filho, E. - "Análise do Desempenho de um Motor de Indução de Gaiola Alimentado por um Inversor de Tensão Através de um Modelo dinâmico", II Seminário Internacional de Motores Elétricos e Acionamentos Reguláveis - SIMEAR, vol. 3, pp. 103-120, 1991
- [16] - Bose, B.K. - "Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, New Jersey, USA, pp.121-124, 1986
- [17] - Krause, P. C.; Lipo, T. A. - "Analysis and Simplified Representation of a Rectifier-Inverter Induction Motor Drive", IEEE Trans. on PAS, vol. 88, pp. 588-596, 1969

[18] - Holman, J.P. - "Transfêrencia de Calor", McGraw-Hill, São Paulo, 1983

[19] - NBR 5383 - "Máquinas Elétricas Girantes - Máquinas de Indução : Determinação das Características", Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, nov/1982

[20] - Std 112-1978 - "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators", 1978