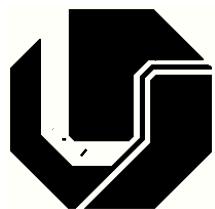


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO TRADICIONAL E UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM
ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA**

WELLINGTON DO PRADO

MESTRADO
Uberlândia-MG
2013

WELLINGTON DO PRADO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO TRADICIONAL E UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM
ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA**

Dissertação apresentada ao Departamento de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Máquinas Elétricas.

Banca Examinadora:

Carlos Augusto Bissochi Jr, Dr. (UFU)
Roberlam Gonçalves de Mendonça, Dr. (IFG)
Luciano Martins Neto, Dr. (UFU) - Orientador

Uberlândia
Julho, 2013.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

WELLINGTON DO PRADO

**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO TRADICIONAL E UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM
ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA**

Dissertação apresentada ao Departamento de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Máquinas Elétricas.

Profº Luciano Martins Neto, Dr.
Orientador

Profº Edgard A. Lamounier Júnior, Dr
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Uberlândia
Julho, 2013.

DEDICATÓRIA

**A minha esposa, Pauliana Siqueira
Borges Prado.**

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e em seguida, a todos aqueles que contribuíram para realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia, por intermédio do Departamento de Engenharia Elétrica.

Ao meu orientador, Professor Luciano Martins Neto pela amizade, dedicação, paciência e pela competente, segura e valiosa orientação prestada, com as indicações certas e precisas, em todos os momentos da realização deste trabalho.

Aos muitos outros, mestres, amigos, ou simples conhecidos, os quais foram, de modos muito diferentes, fundamentais na minha formação e que prestaram auxílio em muitas ocasiões.

Às empresas JBS e o Sr Edson Filho de Itumbiara , pelo apoio e boa vontade na execução dos trabalhos.

Conteúdo

Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas.....	9
Lista de Abreviaturas	10
Capítulo 1	14
Introdução	14
1.1- Objetivos e justificativas	14
1.2. - Exposição do Trabalho	16
Capítulo 2	17
Motor de indução trifásico assimétrico	17
2.1 – Equações Básicas.....	17
2.2 - Análise Teórica	18
2.2.1 - Modelagem Matemática no Domínio do Tempo	18
2.2.2 - Aplicação da Modelagem Matemática no Motor de Indução Trifásico Tradicional	22
2.2.3 - Aplicação da modelagem matemática no motor de indução trifásico assimétrico com alimentação monofásica.....	25
Capítulo 3	29
Terminologia e Definições dos Ventiladores	29
3.1 - Filosofia Dos Ventiladores.....	29
3.2 - Terminologia e Definições Dos Ventiladores.....	30
3.2.1 - Pressão Relativa - Coluna d'água (ca)	30
3.2.2 - Pressão Estática (Pe)	31
3.2.3 - Pressão de Velocidade/Pressão Dinâmica	31
3.2.4 - Pressão Total.....	32
3.2.5 - Pressão Total do Ventilador	33
3.2.6 - Vazão (Q)	33
3.2.7 - Pressão Estática do Ventilador	34
3.2.8 - Potência Absorvida pelo ventilador (Pabs)	35
3.2.9 - Rendimento Estático (η_e).....	35
3.2.10 - Rendimento Total (η_t)	36

3.3 - Torque de Partida do Ventilador (Ts).....	36
3.3.1 - Equação do Torque de Partida.....	36
3.3.2 - Tempo de Partida do Motor com Carga	37
3.3.3 - Fórmulas para Cálculo do Torque de Partida.....	37
Capítulo 4	39
4.1 - Resultados das Simulações Digitais dos Motores de Indução Trifásico Tradicional e Assimétrico com Alimentação Monofásica	39
4.2 - Resultados Experimentais Comparativos Entre os Motores Assimétrico e Tradicional	41
4.3 – Análise do Rendimento Global : Motor-Carga.....	42
4.4 - Análise das Correntes	44
5. Conclusão.....	50
Referências.....	52

Lista de Figuras

Capítulo 2

FIGURA 2. 1 - LIGAÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA	17
FIGURA 2. 2 - EIXOS ESPACIAIS "I" E "J".....	20
FIGURA 2. 3 - EIXOS DOS ENROLAMENTOS.....	21

Capítulo 3

FIGURA 3. 1 - ARRANJO EXPERIMENTAL	29
FIGURA 3. 2 - ARRANJO EXPERIMENTAL	30
FIGURA 3. 3 - PRESSÃO ATMOSFÉRICA.....	31
FIGURA 3. 4 PRESSÃO DINÂMICA DO VENTILADOR.....	32
FIGURA 3. 5 - PE, PD E PT NUM PONTO.....	33
FIGURA 3. 6 - PRESSÃO TOTAL DO VENTILADOR	33
FIGURA 3. 7 - PRESSÃO ESTÁTICA DO VENTILADOR	34
FIGURA 3. 8 - PRESSÃO ESTÁTICA COM VAZÃO NULA E DESCARGA LIVRE.....	34
FIGURA 3. 9 - VISUALIZAÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA DO CONJUNTO MOTOR/VENTILADOR	38

Capítulo 4

FIGURA 4. 1 - PARTIDA MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO TRADICIONAL	39
FIGURA 4. 2 – AMPLIAÇÃO DA FIGURA 4.1 PARTIDA MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO TRADICIONAL	40
FIGURA 4. 3 - PARTIDA DO MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA... <td>40</td>	40
FIGURA 4. 4 – AMPLIAÇÃO DA FIGURA 4.3 PARTIDA DO MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO COM ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA	41
FIGURA 4. 5 - RENDIMENTOS DOS MOTORES PADRÃO E ASSIMÉTRICO COM CARGA	44
FIGURA 4. 6 - CORRENTE DE PARTIDA DO MOTOR TRIFÁSICO TRADICIONAL - PARTIDA DIRETA	45
FIGURA 4. 7 – AMPLIAÇÃO DA FIGURA 4.6 CORRENTE DE PARTIDA DO MOTOR TRIFÁSICO TRADICIONAL EM PARTIDA DIRETA.	45
FIGURA 4. 8 - CORRENTE DE PARTIDA DO MOTOR TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO - PARTIDA DIRETA	46
FIGURA 4. 9 – AMPLIAÇÃO DA FIGURA 4.8 CORRENTE DE PARTIDA DO MOTOR TRIFÁSICO ASSIMÉTRICO EM PARTIDA DIRETA	46
FIGURA 4. 10 - AFUNDAMENTO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DO MOTOR TRIFÁSICO TRADICIONAL EM PARTIDA DIRETA	47
FIGURA 4. 11 - AFUNDAMENTO DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO DO MOTOR ASSIMÉTRICO.....	47
FIGURA 4. 12 - FATOR DE POTÊNCIA	49

Lista de Tabelas

Capítulo 3

TABELA 3. 1 - TEMPO DE PARTIDA DE MOTORES	37
---	----

Capítulo 4

TABELA 4. 1 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	42
--	----

TABELA 4. 2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	43
--	----

TABELA 4. 3 - FATOR DE POTÊNCIA	48
---------------------------------------	----

Lista de Abreviaturas

Capítulo 2

v_i, i_i, r_i, λ_i - tensão, corrente, resistência, e enlace de fluxo magnético na fase "i", respectivamente;

L_{ii}, L_{ij}, L_{di} - indutâncias própria "i" sem dispersão, mútua "i" e "j", e de dispersão "i", respectivamente;

k_{ij} - constante caracterizada pelo circuito magnético de ferro e de entre ferro, e pelos dados construtivos dos enrolamentos

N_i, N_j - número de espiras dos enrolamentos "i" e "j", respectivamente

α_i, α_j - ângulo espacial que localiza os eixos dos enrolamentos "i" e "j", respectivamente

J - momento de inércia das partes girantes;

p - número de pólos;

θ_R - deslocamento angular elétrico;

w_R - velocidade angular mecânica;

Tm - conjugado eletromagnético;

Tc - conjugado de carga resistente.

$[i_i]$ - matriz coluna das correntes i_i

$[i_i]^T$ - matriz transposta de $[i_i]$

$[L]$ - matriz das indutâncias L_{ij}

Capítulo 3

Pd - pressão dinâmica em Pa ou mmca

V - Velocidade em m/s

r - Densidade de 1,204 kg/m³

g - Aceleração da gravidade de 9,81 m/s²

η_t - Rendimento total do ventilador

Pt - Pressão total em Pa ou mmca

Pabs - Potência em kW ou cv

Q - Vazão em m³/h

J - Momento total de inércia, kgm²

α - Aceleração angular, rad/s²

m - Massa do rotor/polia, kg

R - Raio externo do rotor/polia, m

r - Raio interno do rotor/polia, m

J_{FP} - Momento de inércia da polia do ventilador, kgm²

J_{MP} - Momento de inércia da polia do motor, kgm²

J_M - Momento de inércia do motor, kgm²

η_F - Velocidade de rotação do ventilador, rpm

η_M - Velocidade de rotação do motor, rpm

ts - Tempo de partida do motor, s

Resumo

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre um motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo tradicional e um motor de indução trifásico assimétrico. Foram empregados dois motores com a mesma potência, sendo o motor assimétrico alimentado por uma fonte de tensão monofásica. Nos estudos foi investigado o comportamento de várias grandezas como rendimento, corrente de partida, afundamentos de tensão, fator de potência, bem como as potências fornecidas por cada máquina. De posse dos resultados obtidos através de experimentos práticos, pôde-se constatar que o motor assimétrico apresenta uma série de vantagens em relação aos motores tradicionais, o que o torna uma excelente opção quando a aplicação exige o acionamento de cargas de potências elevadas e não se dispõe de um sistema trifásico de alimentação.

Palavras Chave – Motor de indução trifásico, motor assimétrico, rendimento, fator de potência, corrente de partida.

ABSTRACT

The main objective of this work is to perform a comparative study between a three phase induction motor squirrel cage traditional and asymmetrical three-phase induction motor. Were used two motors of the same power, the motor being powered by an asymmetrical voltage source phase. In the studies we investigated the behavior of various quantities such as yield, starting current, voltage sags, power factor, and the power supplied by each machine. With the results obtained from practical experiments, it was found that the asymmetric motor features a number of advantages over traditional engines, which makes it an excellent choice when the application requires the drive loads of high power and not has a three-phase supply.

Key Words - Three-phase induction motor, asymmetric motor, power factor and starting current.

Capítulo 1

Introdução

1.1- Objetivos e justificativas

O presente estudo visa beneficiar as localidades rurais, no Brasil, onde o sistema de distribuição de energia elétrica, quase que na sua totalidade, é monofásica e como as características dos consumidores de energia elétrica aliadas às limitações de recursos financeiros para investimento em programas de eletrificação rural impeliram as concessionárias de energia elétrica a utilizar o sistema elétrico de distribuição monofásico. Tais características podemos usar de exemplo que somente no estado de Goiás apresenta uma rede rural monofassica de 105.447,09 km, e ainda consumo energético mensal resumido, número reduzido de consumidores por quilômetro de rede e pequenas demandas máximas simultâneas. Tais características operacionais inviabilizam investimentos por parte das concessionárias de energia para disponibilizar rede elétrica trifásica.

Com o atual desenvolvimento do país e, em particular, o crescimento expressivo da agroindústria, tem exigido o desenvolvimento de novas técnicas de plantio irrigado e necessidade da beneficiação de produtos agrícolas nos próprios locais de produção, impõem ao produtor rural a necessidade de aumentar o consumo de energia elétrica, principalmente, em termos de demanda máxima. Além desta questão, vale observar que equipamentos elétricos de potência mais elevada são, via de regra, trifásicos, exigindo, desta forma, redes elétricas compatíveis com esta imposição operacional. Por outro lado, como dito anteriormente, as concessionárias disponibilizam redes monofásicas levando os consumidores rurais à mercê das peculiaridades próprias desta.

Geralmente os motores elétricos utilizados em propriedades rurais são monofásicos, comercialmente limitados à potência máxima de 12,5 Cv, até alguns anos atrás. Atualmente existem disponíveis no mercado motores monofásicos acima de 12,5 Cv, porém com uma série de desvantagens elétricas e mecânicas, além do custo extremamente alto.

A distribuição da energia elétrica monofásica, embora econômica do ponto de vista das concessionárias de energia elétrica, para os consumidores traz algumas dificuldades, a exemplo: os motores elétricos monofásicos são mais caros, fisicamente maiores e, consequentemente, mais pesados, mais sujeitos a falhas e sua produção no Brasil está limitada à Baixas potências; os sistemas de bombeamento de água oriunda de poços profundos são, em sua maioria, acionadas por motores elétricos trifásicos. Quanto aos motores elétricos trifásicos, em comparação com aqueles monofásicos, caracterizam por serem menores, mais leves, custo inferior, ampla disponibilidade no mercado e vários níveis de potência nominal. Com a mecanização da agricultura e a necessidade de melhorar a produtividade, o sistema de irrigação vem se tornando ponto de fundamental importância, desencadeando a necessidade dos motores acima de 12,5 Cv. Para satisfazer esta condição existem duas possibilidades mais atuais. A primeira, estender uma linha trifásica e a segunda utilizar o motor monofásico citado anteriormente. Ambas as possibilidades são dispendiosas. O custo de uma linha trifásica de 13,8 KV está em torno de R\$ 15.200 por Km, enquanto que a monofásica pode chegar a 40% deste valor.

A substituição dos ramais monofásicos por trifásicos carece de um estudo de viabilidade econômica, pois existem soluções, que embora ainda não sejam tradicionais no mercado, em muitos casos podem resultar em alternativas técnicas e economicamente interessantes. Como soluções alternativas, tem-se por exemplo o uso dos conversores mono-trifásicos estáticos ou rotativos , os inversores eletrônicos, e uma outra solução, objeto desta dissertação, que consiste na utilização de motores de indução trifásicos assimétricos cuja alimentação é monofásica .

Este tipo de motor reúne as condições necessárias para atender as necessidades do produtor rural. A sua alimentação é monofásica e as suas características nominais são iguais ou até melhores que a do motor trifásico comercial. Seu custo não deverá exceder muito (inferior a 50%) ao motor trifásico comercial, uma vez que as únicas modificações que ele apresenta em relação ao trifásico são o número de espiras diferente para fases e um capacitor adicional.

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo, eminentemente técnico-científico, comparando o desempenho de um motor de indução trifásico tradicional com um motor de indução trifásico assimétrico com alimentação monofásica. Os estudos foram direcionados avaliando o desempenho operacional de ambos os motores do ponto de vista do rendimento, tempo de partida, valor máximo da corrente de partida, fator de potência.

1.2. - Exposição do Trabalho

O trabalho é desenvolvido aplicando-se uma metodologia apresentada em cinco capítulos.

No capítulo 1 - Apresenta a introdução, objetivo e justificativa do trabalho.

No capítulo 2 - Apresenta-se o motor de indução trifásico assimétrico e uma modelagem desenvolvida no domínio do tempo.

No capítulo 3 - Faz-se o estudo da terminologia e definições dos ventiladores.

No capítulo 4 - São apresentados os resultados experimentais comparativos entre os motores assimétrico e tradicional.

No capítulo 5 - São expostas as conclusões finais.

Capítulo 2

Motor de indução trifásico assimétrico

2.1 – Equações Básicas

O motor de indução trifásico assimétrico é originado do motor de indução trifásico tradicional, com rotor do tipo gaiola de esquilo e estrutura ferromagnética do estator, ambos semelhantes ao do motor de indução trifásico tradicional. Basicamente, a diferença entre ambos os motores reside no enrolamento do estator. Este enrolamento, no motor assimétrico, possui números diferentes de espiras por fase, porém mantendo-se o deslocamento de 120° elétricos. A ligação entre as fases deste enrolamento pode ser estrela ou delta, sendo alimentado por um sistema monofásico, auxiliado por um capacitor. A figura 2.1 ilustra o esquema de ligação estrela de um motor de indução trifásico assimétrico em uma rede de alimentação monofásica.

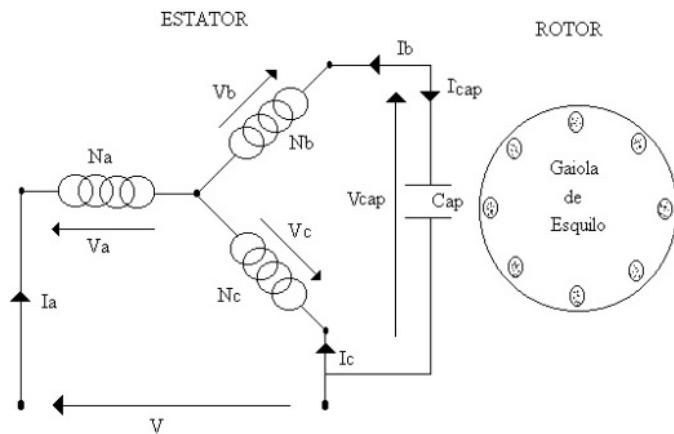


Figura 2. 1 - Ligação do motor de indução trifásico assimétrico com alimentação monofásica

De acordo com a figura 2.1, observa-se que o motor de indução, com enrolamento assimétrico, pode ser alimentado via rede elétrica monofásica e atender às necessidades dos consumidores rurais, os quais, via de regra, são supridos através de redes monofásicas.

É necessário enfatizar que a decisão pelo motor de indução assimétrico, passa pela análise comparativa do seu desempenho operacional em relação ao motor trifásico tradicional, além da análise econômica de seu custo comparado com o custo global do motor tradicional e das modificações da rede monofásica para a trifásica .

2.2 - Análise Teórica

Neste item são apresentados os equacionamentos no domínio do tempo para ambos os motores. Processando computacionalmente tais equacionamentos pode-se simular o funcionamento de ambos os motores, desde a partida até o regime permanente .

2.2.1 - Modelagem Matemática no Domínio do Tempo

O equacionamento do motor trifásico tradicional é bem conhecida e pode-se encontrar na referência [10].

Para se ter uma apresentação mais sintética possível da modelagem matemática, inicialmente são estabelecidas as equações entre duas fases genéricas "i" e "j", que representam fases indistintamente de ambos os motores. Desta forma pode-se escrever a expressão da tensão v_i da fase "i", (1) .

$$v_i = r_i \cdot i_i + \frac{d\lambda_i}{dt} \quad (1)$$

$$\lambda_i = L_{ii} \cdot i_i + L_{ij} \cdot i_j + L_{di} \cdot i_d \quad (2)$$

onde:

v_i, i_i, r_i, λ_i - tensão, corrente, resistência, e enlace de fluxo magnético na fase "i", respectivamente;

L_{ii}, L_{ij}, L_{di} - indutâncias própria "i" sem dispersão, mútua "i" e "j", e de dispersão "i", respectivamente;

Considerando-se agora "j" representando todas as fases de uma máquina, inclusive a própria fase "i", a expressão (2) se torna (3) .

$$\lambda_i = L_{di} \cdot i_i + \sum_j L_{ij} \cdot i_j \quad (3)$$

Em relação a indutância L_{ij} , considerando apenas a componente fundamental da distribuição espacial de densidade de fluxo magnético, que por sua vez é produzida pela circulação de cada corrente i_i no seu enrolamento, a referida indutância pode ser expressa por (4), considerando os eixos espaciais "i" e "j" da figura 2.2

$$L_{ij} = k_{ij} \cdot N_i \cdot N_j \cdot \cos(\alpha_i - \alpha_j) \quad (4)$$

Onde :

k_{ij} - constante caracterizada pelo circuito magnético de ferro e de entre ferro, e pelos dados construtivos dos enrolamentos

N_i, N_j - número de espiras dos enrolamentos "i" e "j", respectivamente

α_i, α_j - ângulo espacial que localiza os eixos dos enrolamentos "i" e "j", respectivamente

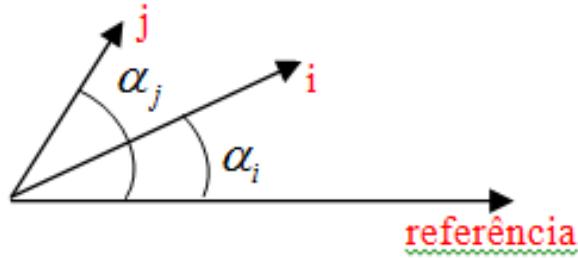


Figura 2. 2 - Eixos espaciais "i" e "j"

De (1) e (3) tem-se (5), desde que considere a indutância de dispersão constante.

$$v_i = r_i \cdot i_i + L_{di} \cdot \frac{di_i}{dt} + \sum_j \left[L_{ij} \cdot \frac{di_j}{dt} + i_j \cdot \frac{dL_{ij}}{dt} \right] \quad (5)$$

A expressão (5) representa genericamente todas as equações elétricas da máquina, enquanto que as expressões de (6) a (8) representam as suas equações mecânicas .

$$Tm - Tc = J \cdot \frac{dW_R}{dt} \quad (6)$$

$$W_R = \frac{2}{p} \frac{d\theta_R}{dt} \quad (7)$$

onde:

J - momento de inércia das partes girantes;

p - número de pólos;

θ_R - deslocamento angular elétrico;

w_R - velocidade angular mecânica;

Tm - conjugado eletromagnético;

Tc - conjugado de carga resistente.

O conjugado eletromagnético é dado por:

$$Tm = \frac{p}{4} \cdot [i_i]^T \cdot \left[\frac{d[L]}{d\theta_R} \right] \cdot [i_i] \quad (8)$$

onde:

$[i_i]$ - matriz coluna das correntes i_i

$[i_i]^T$ - matriz transposta de $[i_i]$

$[L]$ - matriz das indutâncias L_{ij}

Como os dois motores a serem analisados possuem enrolamentos trifásicos, os seus eixos de enrolamento de fase serão espacialmente representados por "a", "b", e "c", fases de estator, e "A", "B", e "C", fases de rotor, mesmo sendo as máquinas de rotor em gaiola de esquilo, pois é prática comum equacionar um rotor bobinado equivalente ao rotor em gaiola. A figura 2.3 ilustra tais eixos, tomando-se como referência o eixo "a".

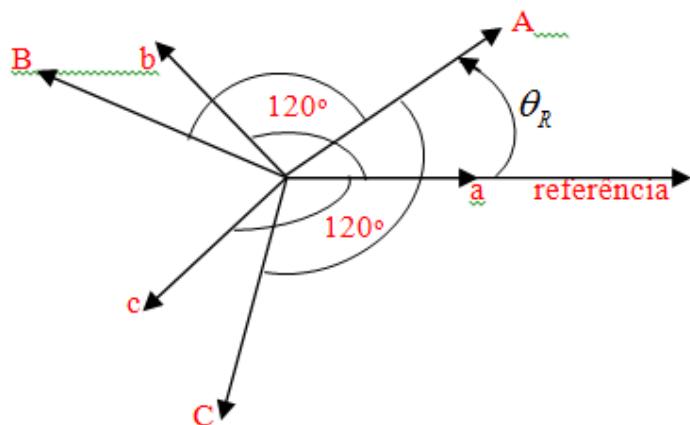


Figura 2.3 - Eixos dos enrolamentos

2.2.2 - Aplicação da Modelagem Matemática no Motor de Indução Trifásico Tradicional

Na expressão (5), fazendo "i" e "j" assumir os eixos "a", "b", "c", "A", "B", "C", pode-se escrever a equação matricial (9).

$$[V] = [R][I] + [L] \left[\frac{d[I]}{dt} \right] + \left[\frac{d[L]}{dt} \right] [I] \quad (9)$$

Onde:

$$[V]^T = [v_a \ v_b \ v_c \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$[I]^T = [i_a \ i_b \ i_c \ i_A \ i_B \ i_C]$$

$$[R] = \begin{bmatrix} r_E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_R \end{bmatrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{EE} & M_{EE} & M_{EE} & L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} \\ M_{EE} & L_{EE} & M_{EE} & L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} \\ M_{EE} & M_{EE} & L_{EE} & L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} \\ L_{aA} & L_{bA} & L_{cA} & L_{RR} & M_{RR} & M_{RR} \\ L_{aB} & L_{bB} & L_{cB} & M_{RR} & L_{RR} & M_{RR} \\ L_{aC} & L_{bC} & L_{cC} & M_{RR} & M_{RR} & L_{RR} \end{bmatrix}$$

$$r_E = r_a = r_b = r_c$$

$$r_R = r_A = r_B = r_C$$

$$L_{EE} = L_{da} + L_{aa} = L_{db} + L_{bb} = L_{dc} + L_{cc}$$

$$L_{RR} = L_{dA} + L_{AA} = L_{dB} + L_{BB} = L_{dC} + L_{CC}$$

$$M_{EE} = L_{ab} = L_{ac} = L_{bc} = -0,5 \cdot L_{aa}$$

$$M_{RR} = L_{AB} = L_{AC} = L_{BC} = -0,5 \cdot L_{AA}$$

$$L_{aA} = L_{bB} = L_{cC} = M_{ER} \cdot \text{COS}(\theta_R)$$

$$L_{aB} = L_{bC} = L_{cA} = M_{ER} \cdot \text{COS}(\theta_R + 120^0)$$

$$L_{aC} = L_{bA} = L_{cB} = M_{ER} \cdot \text{COS}(\theta_R - 120^0)$$

As resistências e indutâncias acima apresentadas, foram obtidas considerando o perfeito balanceamento das fases de estator e de rotor. Particularmente as indutâncias, representadas genericamente por L_{ij} , foram obtidas através de (4), observando-se a localização dos eixos das fases na figura 2.3.

A expressão (9) representa o sistema de equações diferenciais elétricas, resta complementá-lo com as equações mecânicas. Para tanto, pode-se inicialmente particularizar a expressão (8) para o caso do motor de indução trifásico tradicional, utilizando-se os resultados obtidos para as suas indutâncias. A resposta está na expressão (10).

$$Tm = -\frac{p \cdot M_{ER}}{2} \cdot (S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c) \quad (10)$$

$$S_a = i_A \text{sen}(\theta_R) + i_B \text{sen}(\theta_R + 120^0) + i_C \text{sen}(\theta_R - 120^0)$$

$$S_b = i_A \text{sen}(\theta_R - 120^0) + i_B \text{sen}(\theta_R) + i_C \text{sen}(\theta_R + 120^0)$$

$$S_c = i_A \text{sen}(\theta_R + 120^0) + i_B \text{sen}(\theta_R - 120^0) + i_C \text{sen}(\theta_R)$$

Pode-se modificar a equação matricial (9), introduzindo as equações mecânicas (6), (7),

e (10). O resultado está expresso em (11). Integrando-se numericamente a equação (11), o motor de indução trifásico tradicional é simulado digitalmente.

$$[V^*] = [R^*][I^*] + [L^*] \left[\frac{d[I^*]}{dt} \right] + \left[\frac{d[L^*]}{dt} \right] [I^*] \quad (11)$$

Onde :

$$[V^*]^T = [v_a \ v_b \ v_c \ 0 \ 0 \ 0 \ -T_c \ 0]$$

$$[I^*]^T = [i_a \ i_b \ i_c \ i_A \ i_B \ i_C \ W_R \ \theta_R]$$

$$[R^*] = \begin{bmatrix} r_E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_R & 0 & 0 \\ S_a^* & S_b^* & S_c^* & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_a^* = \frac{p.M_{ER}}{2} S_a$$

$$S_b^* = \frac{p.M_{ER}}{2} S_b$$

$$S_c^* = \frac{p.M_{ER}}{2} S_c$$

$$[L^*] = \begin{bmatrix} [L] & [0] & [0] \\ [0] & J & 0 \\ [0] & 0 & \frac{2}{p} \end{bmatrix}$$

A expressão matricial (11) representa um sistema de 8 equações diferenciais não lineares com as 8 variáveis de estado : $i_a, i_b, i_c, i_A, i_B, i_C, W_R, \theta_R$.

Através de um processo de integração numérica é possível resolver computacionalmente tal sistema, obtendo-se a simulação digital do motor de indução trifásico tradicional, em quaisquer condições de funcionamento .

2.2.3 - Aplicação da modelagem matemática no motor de indução trifásico assimétrico com alimentação monofásica

A modelagem matemática utilizada neste trabalho foi desenvolvida na referência [1]. Como no motor assimétrico o números de espiras de fase são diferentes, o equacionamento deve iniciar pela obtenção das suas indutâncias.

A indutância de dispersão de cada fase pode ser obtida por (12), onde k_d é a constante que caracteriza o circuito magnético de dispersão .

$$L_{di} = k_d \cdot N_i^2 \quad (i = a, b, c, A, B, C) \quad (12)$$

As indutâncias L_{ii} podem ser obtidas aplicando-se (4) e observando-se as posições dos eixos das fases ilustradas na figura 2.3.

$$L_{ii} = k \cdot N_i^2 \quad (i = a, b, c, A, B, C) \quad (13)$$

De (12) e (13) tem-se as indutâncias próprias de estator (14) e rotor (15).

$$L_{Ei} = L_{ii} + L_{di} = (k + k_d) \cdot N_i^2 \quad (i = a, b, c) \quad (14)$$

$$L_{Ri} = L_{ii} + L_{di} = (k + k_d) \cdot N_i^2 \quad (i = A, B, C) \quad (15)$$

Todas as outras indutâncias do motor assimétrico podem ser obtidas utilizando-se (4) e a figura 2.3.

As mútuas entre fases do estator e entre fases do rotor são dadas por (16).

$$L_{ij} = -0,5k.N_i N_j \quad (i = a, j = b, c) \quad (i = b, j = c) \\ (i = A, j = B, C) \quad (i = B, j = C) \quad (16)$$

As mútuas entre uma fase do estator e outra do rotor são dadas por (17) a (19).

$$L_{ij} = k.N_i.N_j.COS(\theta_R) \quad (i = a, j = A) \quad (i = b, j = B) \quad (i = c, j = C) \quad (17)$$

$$L_{ij} = k.N_i.N_j.COS(\theta_R - 120^0) \quad (i = a, j = C) \quad (i = b, j = A) \quad (i = c, j = B) \quad (18)$$

$$L_{ij} = k.N_i.N_j.COS(\theta_R + 120^0) \quad (i = a, j = B) \quad (i = b, j = C) \quad (i = c, j = A) \quad (19)$$

Os números de espiras das fases do rotor são os mesmos, ou seja,

$$N_A = N_B = N_C = N_R.$$

De posse das indutâncias, estabelece-se as equações de tensão do motor. Analisando-se a figura 1, pode-se escrever (20) a (23).

$$v = v_a - v_c \quad (20)$$

$$v_{cap} = v_b - v_c \quad (21)$$

$$i_c = -(i_a + i_b) \quad (22)$$

$$\frac{dv_{cap}}{dt} = -\frac{1}{C_{ap}} i_b \quad (23)$$

Fazendo "i" variar no conjunto "a,b,c,A,B,C" em (1) e (3), obtém-se as equações "v_a, v_b, v_c, v_A, v_B, v_C", utilizando-se as indutâncias expressas em (12) a (19). Nestas equações, eliminando-se "i_c" através de (22), e substituindo "v_a, v_b, v_c" em (20) e (21), é possível estabelecer as equações elétricas do motor assimétrico, integralizando com (23).

As equações mecânicas são obtidas a partir de (6) a (8), eliminando-se "i_c" através de (22), e utilizando-se as indutâncias expressas em (12) a (19).

Unindo as equações elétricas e mecânicas em uma única expressão matricial (24), tem-se o sistema de equações diferenciais não lineares que modela matematicamente o funcionamento do motor de indução trifásico assimétrico, alimentado por um sistema monofásico de tensão .

$$[V^{**}] = [R^{**}][I^{**}] + [L^{**}] \left[\frac{d[I^{**}]}{dt} \right] + \left[\frac{d[L^{**}]}{dt} \right] [I^{**}] \quad (24)$$

Onde :

$$[V^{**}]^T = [v \quad v_{cap} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad -T_c \quad 0]$$

$$[I^{**}]^T = [i_a \quad i_b \quad v_{cap} \quad i_A \quad i_B \quad i_C \quad W_R \quad \theta_R]$$

$$[R^{**}] = \begin{bmatrix} r_a + r_c & r_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b + r_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Cap} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_R & 0 & 0 \\ \frac{p}{2}.S_a^{**} & \frac{p}{2}.S_b^{**} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} S_a^{**} = kN_R \{ i_A \cdot [N_a \operatorname{sen}(\phi_R) - N_c \operatorname{sen}(\phi_R + 120^\circ)] + \\ + i_B \cdot [N_a \operatorname{sen}(\phi_R + 120^\circ) - N_c \operatorname{sen}(\phi_R - 120^\circ)] + \\ + i_C \cdot [N_a \operatorname{sen}(\phi_R - 120^\circ) - N_c \operatorname{sen}(\phi_R)] \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
S_b^{**} = & kN_R \{ i_A \cdot [N_b \sin(\phi_R - 120^\circ) - N_c \sin(\phi_R + 120^\circ)] + \\
& + i_B \cdot [N_b \sin(\phi_R) - N_c \sin(\phi_R - 120^\circ)] + \\
& + i_C \cdot [N_b \sin(\phi_R + 120^\circ) - N_c \sin(\phi_R)] \}
\end{aligned}$$

$$[L^{**}] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & A_{13} & A_{14} & A_{15} & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & A_{23} & A_{24} & A_{25} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{13} & A_{23} & 0 & A_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{14} & A_{24} & 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 & 0 \\ A_{15} & A_{25} & 0 & 0 & 0 & A_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2}{p} \end{bmatrix}$$

$$A_{11} = (k + k_d) \cdot (N_a^2 + N_c^2) + k \cdot N_a \cdot N_c$$

$$A_{12} = 0,5 \cdot k \cdot (N_b \cdot N_c + N_a \cdot N_c - N_a \cdot N_b) + (k + k_d) \cdot N_c^2$$

$$A_{13} = k \cdot N_R \cdot [N_a \cdot \cos(\phi_R) - N_c \cdot \cos(\phi_R + 120^\circ)]$$

$$A_{14} = k \cdot N_R \cdot [N_a \cdot \cos(\phi_R + 120^\circ) - N_c \cdot \cos(\phi_R - 120^\circ)]$$

$$A_{15} = k \cdot N_R \cdot [N_a \cdot \cos(\phi_R - 120^\circ) - N_c \cdot \cos(\phi_R)]$$

$$A_{22} = (k + k_d) \cdot (N_b^2 + N_c^2) + k \cdot N_b \cdot N_c$$

$$A_{23} = k \cdot N_R \cdot [N_b \cdot \cos(\phi_R - 120^\circ) - N_c \cdot \cos(\phi_R + 120^\circ)]$$

$$A_{24} = k \cdot N_R \cdot [N_b \cdot \cos(\phi_R) - N_c \cdot \cos(\phi_R - 120^\circ)]$$

$$A_{25} = k \cdot N_R \cdot [N_b \cdot \cos(\phi_R + 120^\circ) - N_c \cdot \cos(\phi_R)]$$

$$A_{33} = (1,5 \cdot k + k_d) \cdot N_R^2$$

Através da expressão (25), pode-se obter o conjugado eletromagnético.

$$Tm = -\frac{p}{2} \cdot (S_a^{**} \cdot i_a + S_b^{**} \cdot i_b) \quad (25)$$

Capítulo 3

Terminologia e Definições dos Ventiladores

3.1 - Filosofia Dos Ventiladores

A comparação entre o motor de indução trifásico tradicional e o assimétrico passa, necessariamente, pela avaliação das grandezas elétricas inerentes ao funcionamento destes dispositivos sob diversas condições operacionais.

Este trabalho apresenta os resultados das medições experimentais realizadas no laboratório de máquinas elétricas empregando um motor trifásico tradicional e um assimétrico ambos de mesma potência e tensão nominais, 20 cv e 380 V, respectivamente . A figura 3.1 e 3.2 mostra o arranjo experimental empregado nos ensaios, onde ambos os motores acionam um ventilador centrífugo .



Figura 3. 1 - Arranjo experimental

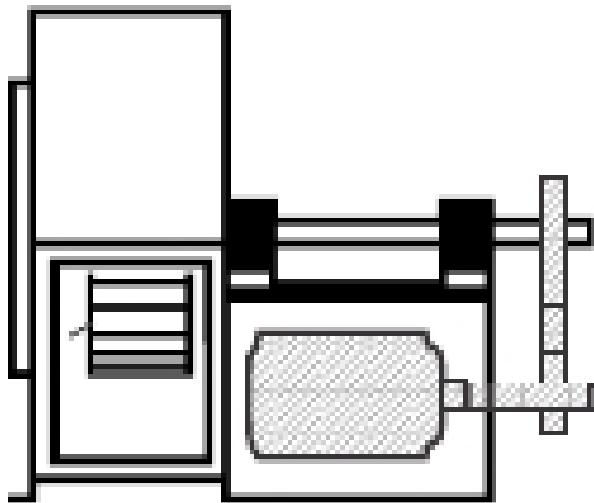


Figura 3. 2 - Arranjo experimental

Para levantamento da eficiência entre os motores foi utilizado um ventilador centrífugo como carga para os motores, com isto foi possível o levantamento das grandezas do ventilador centrífugo, como pressão, vazão para que com estas gradezas conseguise chegar a eficiência do ventilador centrífugo.

Um ventilador é uma máquina que produz fluxo de gás com duas ou mais pás fixadas a um eixo rotativo. Os ventiladores convertem a energia mecânica rotacional, aplicada aos seus eixos pelos motores tradicional e assimétrico, em aumento de pressão total do gás em movimento. Esta conversão é obtida através da alteração do momento do fluido.

Para prever com razoável exatidão o desempenho de um ventilador na instalação, um projetista deve saber:

- (a) Como o ventilador foi testado e qual procedimento (norma) foi seguido.
- (b) Os efeitos que o sistema de distribuição de ar terá no desempenho do ventilador.

3.2 - Terminologia e Definições Dos Ventiladores

3.2.1 - Pressão Relativa - Coluna d'água (ca)

O equacionamento do ventilador centrífugo foram obtidas da referência [9].

Para conseguir medir a eficiência do ventilador e com isto fazer o comparativo do motor

de indução trifásico tradicional e o trifásico assimétrico com alimentação monofásica foi necessário fazer as medições das grandezas do ventilador.

Pressão relativa é a medida de pressão acima da atmosférica expressa como a altura de uma coluna de água em mm (ou polegadas). A pressão atmosférica ao nível do mar iguala-se a 10.340 mm (407,1 polegadas) de água ou 10m (33,97 pés) de água (Fig 3.3).

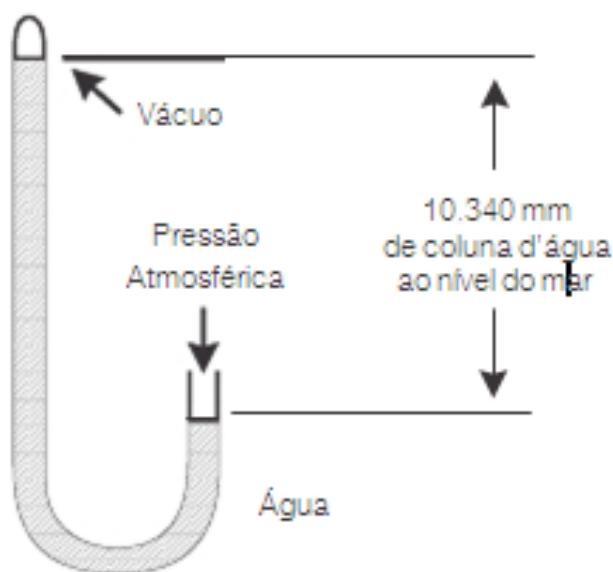


Figura 3. 3 - Pressão Atmosférica

3.2.2 - Pressão Estática (Pe)

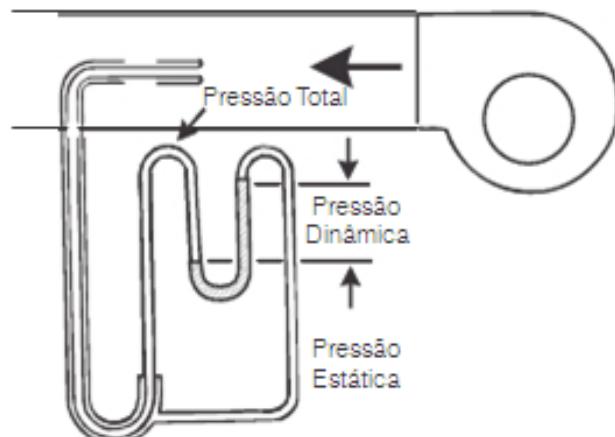
É a diferença entre a pressão absoluta em um determinado ponto em uma corrente de ar ou câmara pressurizada e a pressão absoluta da atmosfera ambiente, sendo positiva quando a pressão neste ponto estiver acima da pressão ambiente e negativa quando estiver abaixo.

Atua igualmente em todas as direções, independente da velocidade do ar e é uma medida da energia potencial disponível em uma corrente de ar.

3.2.3 - Pressão de Velocidade/Pressão Dinâmica

É a pressão exigida para acelerar o ar da velocidade zero para alguma velocidade e é

proporcional à energia cinética da corrente de ar. A pressão de velocidade apenas será exercida na direção do fluxo de ar e é sempre positiva (Fig 3.4).



$$\text{Pressão Dinâmica} = \text{Pressão Total} - \text{Pressão Estática}$$

Figura 3. 4 Pressão Dinâmica do Ventilador

$$P_d = \frac{V^2}{1,3} \quad \text{Para ar Padrão} \quad (26)$$

Onde:

Pd - pressão dinâmica em Pa

V - velocidade em m/s

Ou

$$P_d = (\dot{\rho} \cdot V^2) / 2g \quad (27)$$

Onde:

Pd - pressão dinâmica em mmca

V - velocidade em m/s

$\dot{\rho}$ - densidade de 1,204 kg/m³

g - aceleração da gravidade de 9,81 m/s²

3.2.4 - Pressão Total

Com a Pressão Estática (Pe) somada com a formula (26) ou (27) conseguimos a pressão

total, formula (28) que é a soma algébrica da pressão dinâmica e estática. É uma medida da energia total disponível na corrente de ar. (fig. 3.5).

$$P_t = P_e + P_d \quad (28)$$

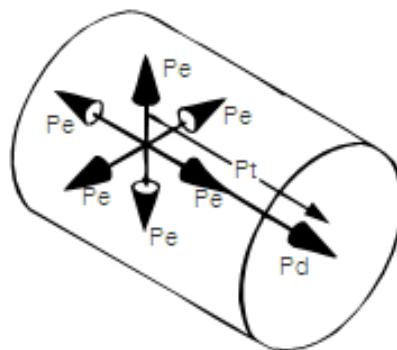


Figura 3. 5 - P_e , P_d e P_t num ponto

3.2.5 - Pressão Total do Ventilador

Diferença algébrica entre a pressão total média na descarga do ventilador e a pressão total média na aspiração do ventilador é a medida da energia mecânica total acrescentada ao ar ou gás pelo ventilador. A Figura. 3.6 mostra como isto é medido

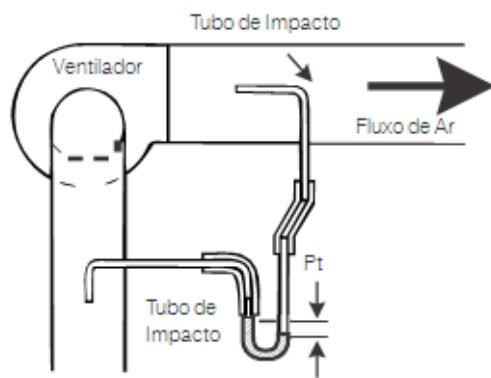


Figura 3. 6 - Pressão Total do Ventilador

3.2.6 - Vazão (Q)

Esta Grandeza é fundamental para conseguir chegar no valor de eficiência do conjunto testado, foi medido por um anemômetro digital, este volume de ar é

movimentado pelo ventilador. A unidade usual é m^3/h , mas no SI o correto é utilizar m^3/s .

3.2.7 - Pressão Estática do Ventilador

A pressão estática do ventilador (Fig. 3.7) é uma grandeza usada na medição do desempenho do ventilador e não pode ser medida diretamente. É a pressão total do ventilador menos a pressão dinâmica correspondente à velocidade média do ar na descarga do ventilador.

Observa-se que não é a diferença entre pressão estática na descarga e a pressão estática na aspiração, isto é, não é a pressão estática do sistema externo.

Na figura 3.8 podemos verificar como fica a pressão estática do ventilador com a vazão de ar nula, com “damper” fechado e com a descarga livre, com “damper” aberto.

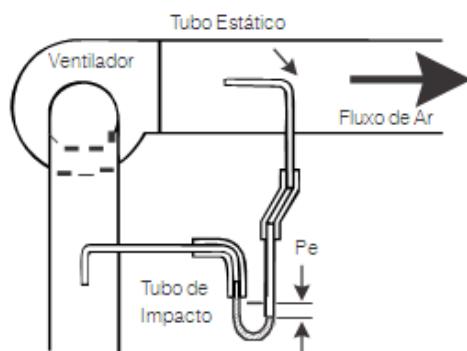


Figura 3.7 - Pressão Estática do Ventilador

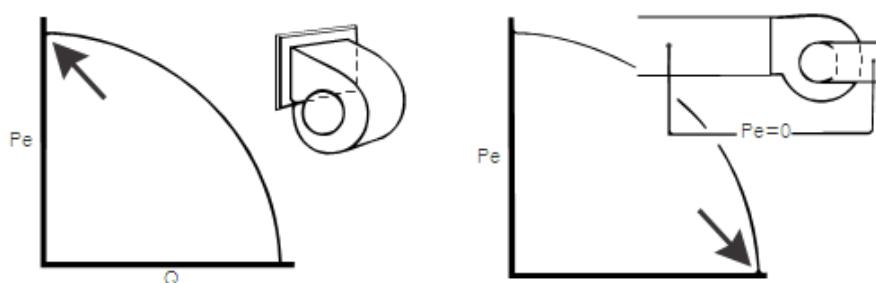


Figura 3.8 - Pressão Estática com Vazão nula e Descarga Livre

3.2.8 - Potência Absorvida pelo ventilador (Pabs)

Com a vazão e a pressão total medida na saída do ventilador, rendimento do ventilador pela tabela do fabricante juntamente com a fórmula (28) se obtém a potência absorvida pelo ventilador fórmula (29 ou a 30).

Potência absorvida pelo ventilador é a potência real que um ventilador requer para mover um dado volume de ar a uma determinada pressão.

$$P_{abs} = \frac{Q}{1020} \cdot \frac{P_t}{\eta_t} \quad (29)$$

Onde:

η_t - rendimento total do ventilador

Q - vazão em m^3/s

P_t - pressão total em Pa

Pabs - potência em kW

Ou

$$P_{abs} = \frac{Q}{270.000} \cdot \frac{P_t}{\eta_t} \quad (30)$$

Onde:

η_t - rendimento total do ventilador

Q - vazão em m^3/s

P_t - pressão total em mmca

Pabs - potência em cv

3.2.9 - Rendimento Estático (η_e)

Com a vazão medida na saída do ventilador, pressão estatica com o resultado da formula (29) se obtém o rendimento estático, formula (31).

Rendimento estático é a potência estática dividida pela potência absorvida do ventilador.

$$\eta_e = \frac{\text{Saída de Força}}{\text{Suprimento de Força}} = \frac{Q \times P_e}{270.000 \times P_{abs}} \quad (31)$$

3.2.10 - Rendimento Total (η_t)

Com a vazão e a pressão total em mmca e o resultado da fórmula (30) conseguimos resolver a fórmula (32).

Rendimento total também chamado de rendimento mecânico, ou simplesmente rendimento. É a razão da saída de potência sobre o suprimento de potência.

$$\eta_t = \frac{Q \times P_t}{270.000 \times Pabs} \quad (32)$$

3.3 - Torque de Partida do Ventilador (Ts)

Torque, também conhecido como o momento da força, é uma medida de energia exigida para iniciar o movimento de um corpo que gira sobre um eixo fixo, no qual a força está agindo.

Quando o motor dá a partida, ele possui um torque relativamente alto, geralmente de 1,5 a 2,5 vezes o torque de plena carga, dependendo do tipo de máquina sendo acionada, porque a frequência de partidas, a temperatura, o tipo e a quantidade de lubrificante, etc., e outras variáveis devem ser levadas em consideração.

3.3.1 - Equação do Torque de Partida

Torna-se, portanto, necessário calcular o torque de partida do ventilador. Isso nos habilita a determinar se o motor selecionado é capaz de produzir torque suficiente para levar o ventilador da rotação zero até a rotação de operação, sem exceder suas limitações de projeto.

$$Ts = \frac{J \times \alpha}{g} \quad (33)$$

Onde:

J- momento total de inércia, kgm^2

α - aceleração angular, rad/s^2

g- aceleração por gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$)

3.3.2 - Tempo de Partida do Motor com Carga

O tempo de partida de um motor de indução é o fator mais crítico, pois um período de partida excessivamente longo provoca um aumento de temperatura prejudicial ao motor. Não há qualquer tempo de partida padrão que possamos seguir; ele varia de acordo com fabricantes diferentes, estruturas, tamanhos de carcaça, número de pólos e custo do motor.

A Tabela 1 apresenta aproximações para o tempo de partida do motor. Para o tempo real de partida, é necessária uma série de outros cálculos, que não serão apresentados aqui.

Tabela 3. 1 - Tempo de Partida de Motores

Número de pólos	Tempo de Partida (s)
2	3 – 4
4	4 – 6
6	4 – 8
8	5 – 10

O tempo de partida do conjunto motor/ventilador nunca pode ser maior que 80% do tempo de rotor bloqueado informado no catálogo do motor.

3.3.3 - Fórmulas para Cálculo do Torque de Partida

Momento de inércia do ventilador;

$$JF = \frac{PD^2}{4} = \frac{M \times (R^2 + r^2)}{2} \text{ kgm}^2 \quad (34)$$

Momento de inércia da polia;

$$JFP, JMP = \frac{m \times R^2}{2} \text{ kgm}^2 \quad (35)$$

Momento de inércia total.

A figura 3.9 demonstra os pontos de inércia do conjunto motor/ventilador, pela figura se consegue visualizar os pontos calculados pelas formulas 34 e 35

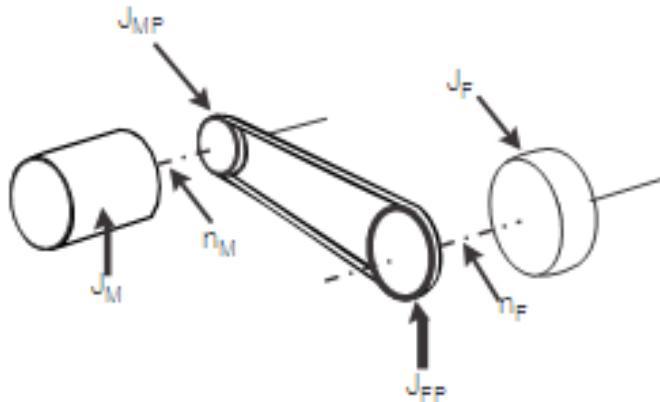


Figura 3.9 - Visualização do momento de inércia do conjunto motor/ventilador

$$J = (J_F + J_{FP}) \times (\eta_F / \eta_M)^2 + J_{MP} + J_M \text{ Kgm}^2 \quad (36)$$

$$\text{Velocidade angular, } w = \frac{2\pi \eta M \text{ rad/s}}{60} \quad (37)$$

$$\text{Aceleração angular, } \alpha = w/t_s \text{ rad/s}^2 \quad (38)$$

$$\text{Torque de partida, } T_s = \frac{J \times \alpha}{g} \text{ Kgfmg} \quad (39)$$

onde:

m - massa do rotor/polia, kg

R - raio externo do rotor/polia, m

r - raio interno do rotor/polia, m

J_{FP} - momento de inércia da polia do ventilador, kgm^2

J_{MP} - momento de inércia da polia do motor, kgm^2

J_M - momento de inércia do motor, kgm^2

η_F - velocidade de rotação do ventilador, rpm

η_M - velocidade de rotação do motor, rpm

t_s - tempo de partida do motor, s

Capítulo 4

4.1 - Resultados das Simulações Digitais dos Motores de Indução Trifásico Tradicional e Assimétrico com Alimentação Monofásica

A seguir são apresentados os gráficos das possibilidades de projeto simuladas nos domínio do tempo considerando o efeitos dos harmônicos espaciais até a 25º ordem.

Pela figura 4.1 a corrente apresentada no motor trifásico tradicional durante o processo de partida a plena tensão e em regime permanente, que permite observar que a corrente de uma das fases atingiu inicialmente um único pico de 300 A e posteriormente o valor de 250 A durante o tempo inicial de partida da máquina.

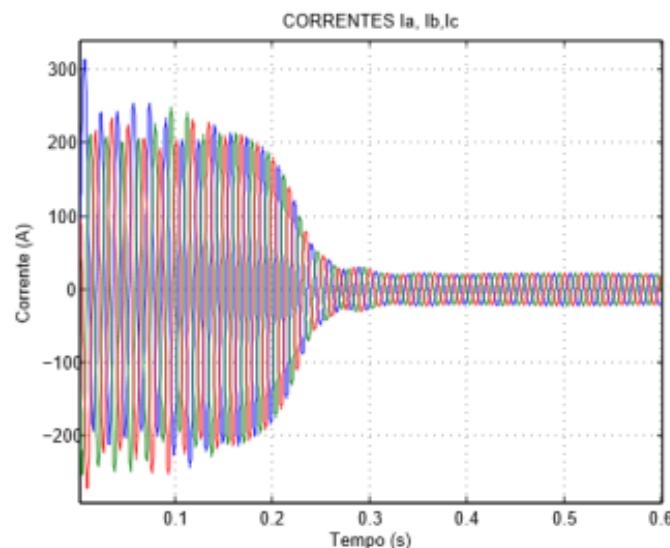


Figura 4. 1 - Partida motor de indução trifásico tradicional

Para melhor observar os valores máximos das correntes , procedeu-se uma ampliação no início da partida, mostrado na figura 4.2

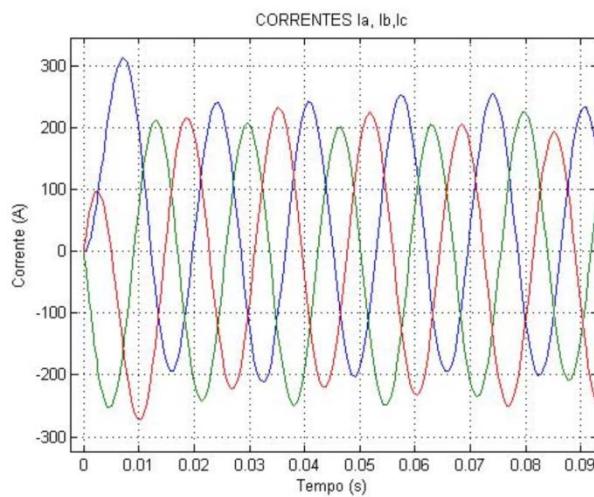


Figura 4. 2 – Ampliação da figura 4.1 Partida motor de indução trifásico tradicional

A análise da figura 4.3 fica evidenciado que para a máquina assimétrica a corrente atinge inicialmente um único valor de pico de 190 A e depois cai para cerca de 130 A durante o período inicial da partida.

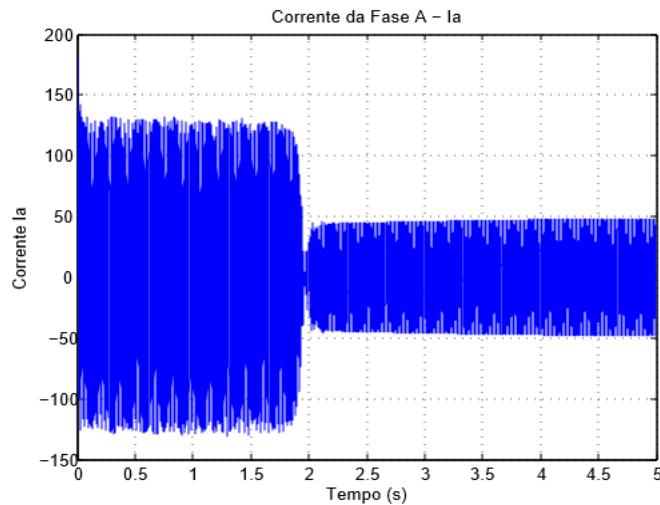


Figura 4. 3 - Partida do Motores de Indução Trifásico Assimétrico com Alimentação Monofásica

Para melhor observar os valores máximos das correntes , procedeu-se uma ampliação no início da partida, mostrado na figura 4.4

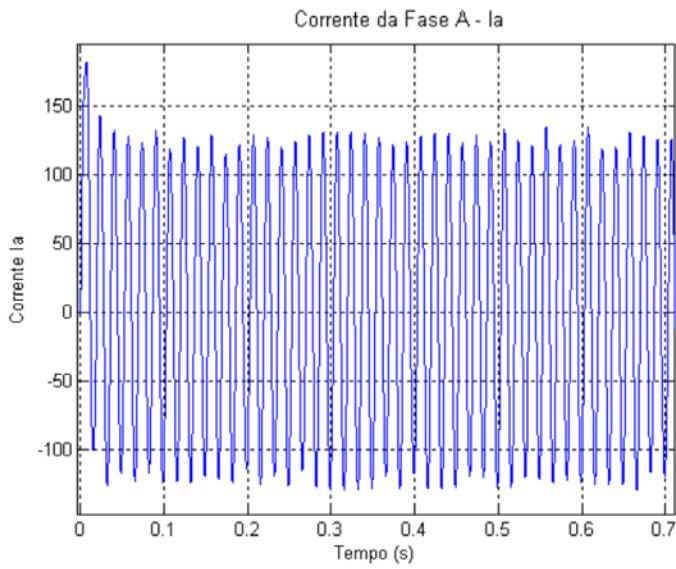


Figura 4. 4 – Ampliação da Figura 4.3 Partida do Motores de Indução Trifásico Assimétrico com Alimentação Monofásica

4.2 - Resultados Experimentais Comparativos Entre os Motores Assimétrico e Tradicional

Os ensaios foram realizados tomando-se como referência os fatores de carregamento (valores percentuais em relação à carga nominal) de 25%, 50%, 75%, 100% e 120%. Para cada carregamento, mediu-se a potência útil da carga e, por consequência, o rendimento do conjunto motor/exaustor.

Para alcançar os valores percentuais de carregamento, a estratégia empregada foi ajustar a abertura “damper” de admissão de ar do exaustor centrífugo. A potência do exaustor foi determinada através da medição da velocidade e da pressão do ar na saída do equipamento.

Para a potência elétrica absorvida pelo motor, empregou-se um analisador de energia que permite a medição das seguintes grandezas elétricas: tensões , correntes, potências elétricas (ativa, reativa, e aparente), fator de potência. O equipamento permite o registro destas grandezas em um microcomputador para que análises posteriores possam ser realizadas.

4.3 – Análise do Rendimento Global : Motor-Carga

Inicialmente, os estudos direcionaram para avaliar os rendimentos do conjunto motor/ventilador.

As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, os valores obtidos nas medições experimentais utilizando os motores tradicional e assimétrico.

Tabela 4. 1 - Resultados Experimentais Motor de Indução Trifásico – Tradicional ("standard")

Motor de Indução Trifásico – Tradicional							
Corrente			Damper %	RPM	Potência Ventilador (W)	Potência Motor (W)	Eficiencia do conjunto ($\eta\%$)
IA	IB	IC					
22,6	24,24	23,68	25%	1780	910,37	11154,76	8,16
25,05	26,81	25,92	50%	1775	2.252,38	12337,43	18,26
28,57	30,48	29,06	75%	1773	4.449,82	14026,29	31,72
32,97	34,34	33,25	100%	1770	7.967,29	15802,58	50,42
32,59	34,32	34,11	120%	1767	8.891,78	15793,38	56,30

Observa-se que um aumento da carga mecânica no eixo do motor, realizado através da abertura do “damper” para admissão de ar, a eficiência do conjunto exaustor/motor aumenta de forma semelhante.

A potência em W do ventilador foi conseguida medindo a vazão de ar com um anemômetro e a pressão em mmca através de um manômetro tipo U, conforme mostrado nas figuras 3.3 e 3.6, de posse destas medidas foi utilizada as formulas 29 e 30, com isto conseguimos chegar ao valor em W do ventilador.

O desequilíbrio de corrente nas fases deve-se ao desbalanço das tensões trifásicas de alimentação da concessionária.

Tabela 4. 2 - Resultados Experimentais do Motor de Indução Trifásico Assimétrico

Motor de Indução Trifásico Assimétrico							
Corrente			Damper %	RPM	Potência Ventilador (W)	Potência Motor (W)	Eficiencia do conjunto ($\eta\%$)
IA	IB	IC					
29,28	35,1	29,29	25%	1768	910,37	7788,48	11,69
33,01	33,91	30,99	50%	1764	2.381,08	8780,66	27,12
33,88	32,46	33,85	75%	1757	4.449,82	11458,22	38,84
39,23	30,48	39,22	100%	1746	8.114,83	14609,25	55,55
40,34	40,33	30,11	120%	1740	8.891,78	15022,62	59,19

Constata-se, pelos resultados apresentados, que o conjunto ventilador/motor assimétrico apresenta uma eficiência mais satisfatórios, para as mesmas condições de carregamento, quando comparados ao conjunto exaustor/motor tradicional.

O mesmo método de obtenção dos valores do ventilador em W foi o igual para ambos testes.

A figura 4.5 mostra os valores obtidos para o rendimento do conjunto motor/ventilador, para os dois experimentos realizados.

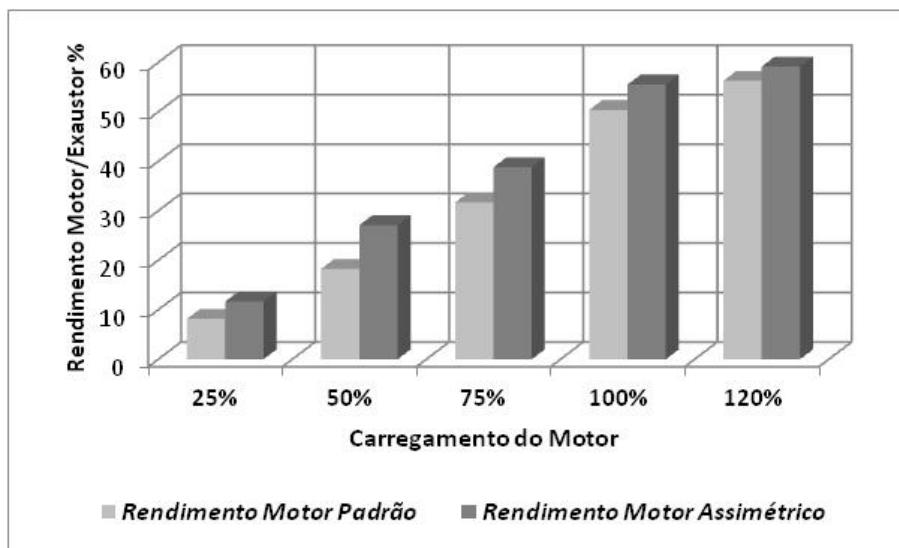


Figura 4. 5 - Rendimentos dos motores padrão e assimétrico com Carga

4.4 - Análise das Correntes

Nesta etapa procurou-se avaliar o comportamento das correntes elétricas em cada motor durante todo o tempo de partida, e em regime permanente de carga . O estudo desta grandeza tem importância significativa tendo em vista que ela exerce grande influência no dimensionamento dos alimentadores, sistema de proteção e perdas de energia.

O desequilíbrio observado nas correntes no motor de indução trifásico tradicional deve-se aos desbalanceamentos das tensões trifásicas de suprimento. Para o motor assimétrico é normal suas correntes serem desequilibradas.

A figura 4.6 apresenta a corrente no motor trifásico tradicional durante o processo de partida a plena tensão e em regime permanente.

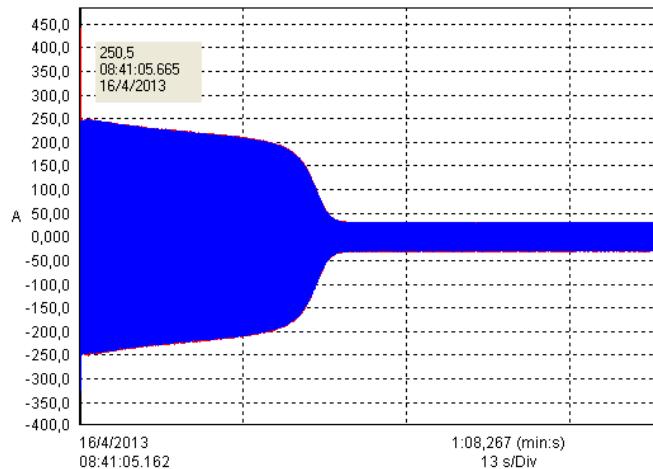


Figura 4. 6 - Corrente de partida do motor trifásico tradicional - partida direta

Para melhor observar os valores máximos das correntes , procedeu-se uma ampliação no início da partida, mostrado na figura 4.7

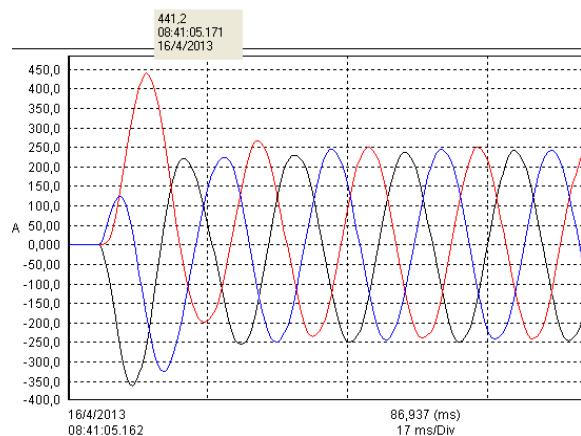


Figura 4. 7 – Ampliação da Figura 4.6 Corrente de partida do motor trifásico tradicional em partida direta.

A análise da figura permite observar que a corrente de uma das fases atingiu inicialmente um único pico de 441,2 A e posteriormente o valor de 250 A durante o tempo inicial de partida da máquina.

Para o motor assimétrico tem-se na figura 4.8 o oscilograma da corrente nas três fases para o mesmo carregamento aplicado no motor de indução trifásico tradicional.

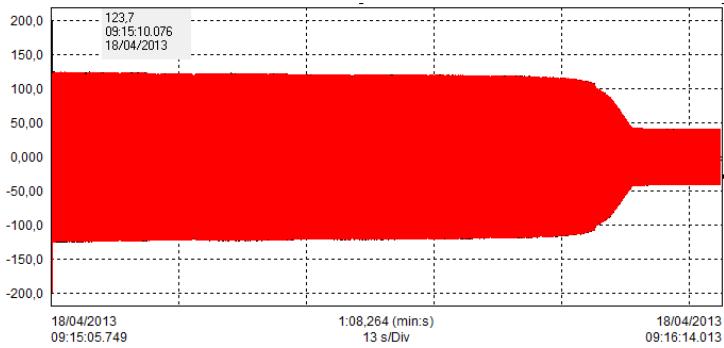


Figura 4. 8 - Corrente de partida do motor trifásico assimétrico - partida direta

Para uma melhor análise dos valores máximos das correntes, apresenta-se na figura 4.9 uma ampliação do registro durante o início da partida.

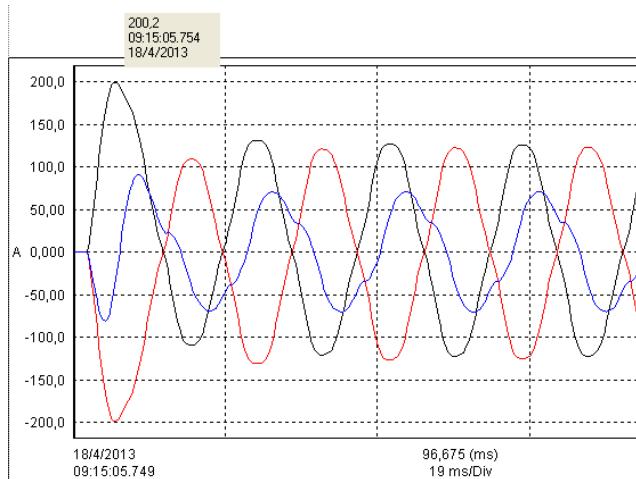


Figura 4. 9 – Ampliação da Figura 4.8 Corrente de partida do motor trifásico assimétrico em partida direta

Fica evidenciado que para a máquina assimétrica a corrente atinge inicialmente um único valor de pico de 200 A e depois cai para cerca de 130 A durante o período inicial da partida. Outra grandeza que merece atenção quando da partida de motores de indução. Nas figuras 4.7 e 4.9 observa-se que o período subtransitório e transitório da corrente de partida no motor tradicional é aproximadamente duas vezes maior que o apresentado pelo motor assimétrico, entretanto conforme visualizado nas figuras 4.6 e 4.8 mostra que o tempo de partida dos motores assimétricos são em media 3 vezes maior que o tempo de partida do motor de indução tradicional.

A partida de motores de indução é preocupação permanente dos projetistas de sistemas elétricos principalmente quando em geração distribuída. Corrente elevada com baixo fator de potência, durante a partida, provoca afundamentos de tensão por vezes insuportáveis. As soluções dos fabricantes prevêem o superdimensionamento do gerador. Um dos principais efeitos resultante dos elevados valores das correntes de partida dos motores de indução trata-se dos afundamentos das tensões de suprimento com reflexos nas demais cargas conectadas no mesmo barramento. É o principal problema de qualidade da energia elétrica e que pode resultar em sérios prejuízos econômicos para as indústrias e demais consumidores.

Para ilustrar tal efeito com objetivo de comparar o comportamento das duas máquinas, têm-se as figuras 4.10 e 4.11, as quais ilustram o comportamento dos valores eficazes das tensões trifásicas quando da ocorrência da partida dos motores.

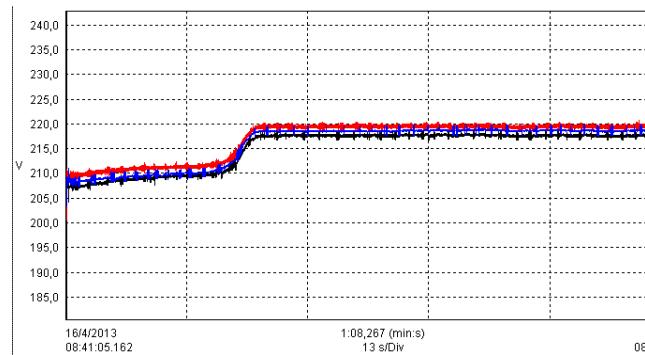


Figura 4. 10 - Afundamento da tensão de alimentação do motor trifásico tradicional em partida direta

Pode-se observar que o valor eficaz das tensões fase-neutro de alimentação do motor trifásico tradicional sofreu um afundamento superior a 5%.

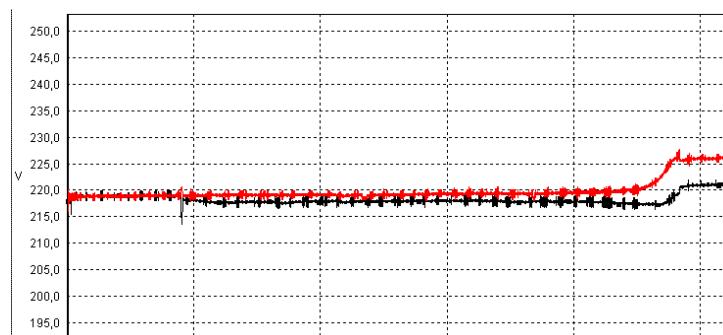


Figura 4. 11 - Afundamento da tensão de alimentação do motor Assimétrico

Para o motor assimétrico o afundamento foi de menor intensidade tendo em vista que as correntes de partida para este tipo de motor foram inferiores do que aquelas do motor trifásico tradicional.

4.5 – Fator de Potência

O fator de potência de uma instalação elétrica está associado ao consumo de potência reativa necessária para a magnetização dos núcleos magnéticos. As consequências de um baixo fator de potência são por demais conhecidas da comunidade acadêmica sendo que qualquer esforço para diminuir a circulação desta potência pelos alimentadores e transformadores e, de igual forma, aumentar a eficiência energética das instalações elétricas sempre será um objetivo a perseguir.

Os motores de indução são os principais consumidores de potência reativa e, portanto, os responsáveis pelo baixo fator de potência nas redes elétricas e nas instalações industriais. Dentro deste contexto, faz-se necessário avaliar o consumo de reativo dos motores trifásico tradicional e o assimétrico com vista a identificar qual apresenta maior eficiência no processo de conversão de energia elétrica em mecânica.

A tabela 4.3 apresenta os valores de fator de potência para cada condição de carregamento dos motores.

Tabela 4. 3 - Fator de Potência

Carregamento do motor %	Fator de Potência	
	Motor de Indução Trifásico Tradicional	Motor de Indução Assimétrico
0%	0,66	0,80
25%	0,70	0,90
50%	0,71	0,92
75%	0,73	0,93
100%	0,74	0,95
120%	0,75	0,96

Para melhor ilustrar a vantagem do motor assimétrico em relação ao consumo de potência reativa, a figura 4.12 apresenta um gráfico comparativo evidenciando as diferenças entre os valores obtidos nas medições experimentais.

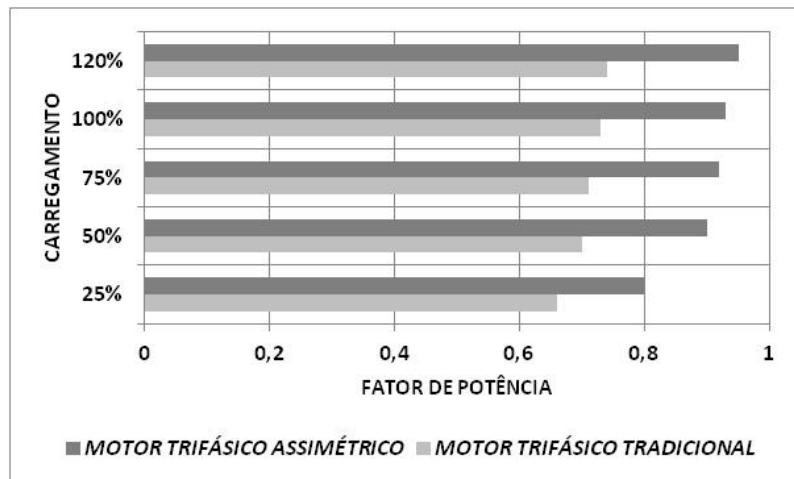


Figura 4. 12 - Fator de potência

Observa-se que para qualquer situação de carregamento o motor assimétrico apresenta fator de potência inferior àquele apresentado pelo motor de indução trifásico tradicional.

5. Conclusão

Este trabalho foi direcionado para realizar uma análise comparativa das grandezas elétricas associadas à operação do motor de indução trifásico tradicional, também conhecido como motor de indução padrão e o motor de indução trifásico assimétrico. Este último como uma estratégia para acionar cargas de potência elevada em redes monofásicas.

O trabalho é eminentemente experimental e os resultados foram obtidos via medições empregando um analisador de energia elétrica para obtenção das grandezas elétricas em estudo. Como carga mecânica utilizou-se um exaustor do tipo centrífugo cuja variação do carregamento foi realizada através da regulagem do “damper”.

Inicialmente avaliou-se o rendimento do conjunto motor/exaustor com objetivo de verificar qual estratégia é mais eficiente do ponto de vista do consumo de energia elétrica. Verificou-se que para qualquer situação de carregamento o motor assimétrico apresentou valores superiores de rendimento.

Posteriormente as análises voltaram para avaliar as correntes elétricas absorvidas pelas máquinas. Os estudos direcionaram para o momento da partida e regime permanente. O valor máximo de corrente na partida é um dado importante no dimensionamento das instalações de motores. Observou-se que o motor assimétrico exige da rede elétrica um valor de corrente inferior ao motor de indução trifásico tradicional. Esta é uma vantagem significativa, pois a consequência de uma partida mais longa pode implicar em afundamentos de tensão no sistema alimentador de maior duração o que traz prejuízos aos demais consumidores conectados á mesma rede. A magnitude do afundamento de tensão causado pelas correntes de partida foi avaliada e apresentada nas figuras 4.9 e 4.10 Mais uma vez e, como era de se esperar, o motor assimétrico causa menor impacto no sistema alimentador quando da partida.

Em seguida as medições voltaram para avaliar o fator de potência destes equipamentos. Sendo os motores de indução os maiores consumidores de potência reativa em instalações industriais e nos sistemas das concessionárias de energia, investigar qual destes dois motores apresentam um comportamento mais eficiente é de extrema importância. A figura 4.12

mostra que o motor assimétrico possui um fator de potência superior ao seu equivalente trifásico.

Finalmente, vale notar que os aspectos relevantes para o mérito deste trabalho estão associados ao fato de que as comparações realizadas se embasaram em resultados experimentais através de medições de grandezas elétricas e mecânicas utilizando-se dois motores de indução trifásicos de igual potência. Sendo um do tipo padrão ou tradicional e outro modificado para ser alimentado por redes monofásicas. Este motor é denominado de motor assimétrico e constitui-se numa nova opção para o acionamento de cargas de potências elevadas em locais com disponibilidade somente de redes elétricas monofásicas, tais como em instalações rurais. Em todos os quesitos o motor assimétrico mostrou ser mais eficiente do ponto de vista energético e os efeitos decorrentes de sua partida na rede elétrica foram de menor intensidade do que aqueles observados do motor trifásico tradicional.

É importante observar que novas investigações devem ser realizadas com vistas a corroborar os resultados aqui observados. Em outras palavras ainda merecem destaque é uma comparação dos conjugados desenvolvidos por ambas as máquinas, o custo de cada uma, etc.

Uma outra linha de investigação que merece destaque trata-se de realizar uma comparação entre as diversas estratégias existentes no mercado que permitem acionar motores trifásicos a partir de redes monofásicas.

Referências

- [1] - Gonçalves de Mendonça, Roberlam . *Estudo dos Conjugados Oscilantes do Motor de Indução Trifásico Assimétrico com Alimentação Monofásica para Efeito de Projeto.* Dissertação de Mestrado, UFU – 1997
- [2] - J.H.H. Alwash; S.H Ikhawan; *Generalised Approach to the Analysis of Asymmetrical Three-Phase Induction Motors. Monofásica.* IEE Proc. Eletric. Volume: 142 , Issue: 2 Digital Publication Year: 1995 , Page(s): 87 - 96
- [3] - Lynce Ribeiro Chaves, Marcelo. *Desenvolvimento e Construção de Sistemas Estáticos Para Alimentação de Cargas Trifásicas à Partir de Redes Monofásicas.* Dissertação de Mestrado, UFU - 1987.
- [4] - Martins Neto, Luciano. *Estudo de Um Motor de Indução Trifásico Convencional Operando Como Conversor de Número de Fases,_Com Objetivo de Obter Elementos Para o Projeto de Um Conversor Mono-Trifásico.* Dissertação de Mestrado, USP - 1976.
- [5] - Martins Neto, Luciano. *Motor de Indução Assimétrico Funcionando Como Conversor de Número de Fases.* Tese de Doutorado, USP - 1980.
- [6] - Martins Neto, Luciano. *Motor de Indução Trifásico Assimétrico Com Alimentação Monofásico.* Projeto de Pesquisa, Relatório MIC / STI, 1988.
- [7] - Martins Neto, Luciano. *Motor de Indução Trifásico Assimétrico Com Alimentação Monofásica.* I Seminário Internacional de Distribuição de Energia Elétrica - Belo Horizonte -MG. Outubro 1990.
- [8] - Richard, Jean-Claude. *Um Estudo Comparativo Entre os Motores de Indução Trifásico Assimétrico e Monofásico.* Dissertação de Mestrado, UFU - 1993.
- [9] - Luis Novaes Ferreira França, Amadeu Zenjiro Matsumura. *Mecânica Geral - 2^a Edição.* Editora Ed.Blucher.
- [10] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Junior, Stephen D. Umans. *Máquinas Elétricas.* Editora ARTMED - BOOKMAN