



STC/ 04
17 à 22 de outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil

SESSÃO TÉCNICA ESPECIAL
CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (STC)

ANÁLISE DO REPARO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Edson C. Bortoni* Jamil Haddad Afonso H.M. Santos Luiz A.H. Nogueira

Paulo S.R. Meloni Eduardo Vasconcelos André Ramon S. Martins Erick M. de Azevedo

PROCEL / ELETROBRÁS

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa, desenvolvida dentro do âmbito do PROCEL, que visou determinar a influência da manutenção corretiva sobre o desempenho energético de motores de indução trifásicos. Os resultados encontrados apresentam excelente conformidade com os obtidos por pesquisadores envolvidos em trabalhos semelhantes em nível internacional, e são de suma importância para a análise de viabilidade econômica de reparo de motores e conservação de energia.

PALAVRAS-CHAVE

Conservação, manutenção, motores elétricos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os motores elétricos constituem-se nas cargas mais significativas nas indústrias. A grande quantidade existente e as extremas condições de operação levam, com frequência ao surgimento de unidades danificadas. Após a avaliação da extensão dos eventuais danos, surge uma questão bastante objetiva: deve-se recuperar o motor ou substituí-lo?

A resposta a esta questão não é trivial. Diversos são os fatores que influenciam esta tomada de decisão. É prática comum em muitas plantas, principalmente as de grande porte, considerar-se os motores de pequeno porte como, literalmente, descartáveis, enquanto os de

maior porte são passíveis de reparos. Em indústrias de pequeno porte isto acontece com todos os motores.

De uma maneira simplificada, a opção entre reparar o motor ou simplesmente substituí-lo, pode ser tomada comparando-se os custos de manutenção, aquisição e operação do motor novo ou reconicionado.

A variável mais importante desta análise, e também com o maior nível de incerteza é, sem dúvida alguma, o rendimento do motor após a sua reforma. Uma pequena redução deste rendimento é admissível posto que pode ser compensada, até um certo ponto, pelo reduzido custo da manutenção em relação ao custo do motor novo. Uma regra prática é que o custo da manutenção não deve exceder 60% do custo do motor novo.

A fim de se reduzir as incertezas e o empirismo destas análises foram ensaiados motores de várias potências, antes e após uma manutenção. O procedimento adotado constitui-se em três fases, a saber: ensaiar o motor, provocar um defeito e, finalmente, ensaiá-lo novamente. O defeito provocado nestes testes foi a queima por sobrecarga.

Em uma primeira etapa foi empregado o método dinamométrico para a obtenção direta do rendimento. Porém, em função dos resultados obtidos, houve-se a necessidade de se extrair maiores informações dos ensaios, quando optou-se pelo método de separação das perdas. Também foram contemplados levantamentos a respeito da qualidade técnica das diversas oficinas de manutenção.

2.0 - DESENVOLVIMENTO

2.1 – Análise das oficinas de manutenção

Verificada a necessidade de se conhecer o desempenho dos motores após a seu conserto, partiu-se, inicialmente, para um levantamento das condições de serviço das oficinas de manutenção. Os aspectos avaliados se referem principalmente com as características das oficinas e seu reflexo na qualidade do serviço prestado. A Tab. 1 sumariza este levantamento, classificando cada quesito em bom, regular e ruim.

Embora a amostra do universo em análise seja relativamente pequena, julga-se o seu resultado representativo, principalmente por caracterizar os principais tipos de oficinas, sendo observado que não existem grandes diferenças entre oficinas de mesmo porte, encontradas na região sudeste do País.

De uma maneira geral o serviço prestado por estas oficinas são satisfatórios. O principal ponto negativo são aquelas oficinas que não possuem ferramental adequado para a execução dos trabalhos. Um exemplo é a remoção do enrolamento do estator com o emprego de maçarico. Esta prática pode alterar severamente as características magnéticas originais do núcleo do estator, acarretando em um aumento das perdas.

Posto que a manutenção de motores é uma prática usual – existem, na região, oficinas que recuperam até 400 motores por mês –, o que se observa é que o que prevalece é o relacionamento entre o cliente e a oficina de reparo, dentro de uma base de confiança. Para a avaliação da técnica de reparo foi efetuado o levantamento apresentado na Tab. 2. A Tab. 3 apresenta um levantamento do ferramental disponível nas oficinas de manutenção.

2.2 – Análise dos motores reconicionados

Para a análise da influência da manutenção sobre o desempenho de motores, foram tomados motores com potências de 3, 5, 10 e 15 cv. Estes motores, a princípio, foram cuidadosamente selecionados a fim de que o resultado da pesquisa refletisse exatamente as condições encontradas na prática. Para tanto tomaram-se motores que já se encontravam em operação, submetidos a todas as intempéries existentes em um ambiente industrial. Antes e após a queima do motor foram executados uma série de testes a fim de diagnosticar as suas condições de trabalho. Os testes

contemplavam a medição da resistências do estator e de isolamento.

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO DAS OFICINAS QUANTO À QUALIDADE DO SERVIÇO

Oficina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Item												
Limpeza	☺	☺	☺	☹	☹	☺	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Lay out	☺	☺	☹	☹	☹	☺	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Iluminação	☺	☺	☺	☹	☹	☺	☺	☺	☺	☺	☹	☺
Nível de Ruído	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
Uniformização	☺	☹	☹	☹	☺	☹	☹	☹	☺	☹	☺	☹
Informatização	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☺	☺	☹	☺
Ferramental	☺	☺	☹	☹	☹	☺	☹	☺	☺	☺	☺	☺
Seg. Pessoal	☺	☺	☹	☺	☹	☹	☹	☹	☺	☺	☺	☺
Prot. Incêndio	☺	☺	☺	☹	☹	☺	☹	☹	☺	☺	☺	☺
Garantia	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹
Segurança geral	☹	☺	☹	☹	☺	☺	☹	☺	☹	☹	☺	☹
Qualidade geral	☹	☺	☹	☹	☹	☺	☹	☺	☹	☺	☺	☺

TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS OFICINAS QUANTO À TÉCNICA EMPREGADA

Oficina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Item												
Armazenamento de componentes	√	√						√	√	√	√	√
Usa maçarico sobre as bobinas									√	√		
Limpeza do estator	√	√	√			√		√	√	√	√	√
Usa guilhotina no isolamento		√					√	√	√	√	√	√
Bobinadeira com contador	√				√		√	√	√	√	√	√
Ligações com uso de maçarico	√							√	√	√	√	√
Realiza testes elétricos	√							√	√	√	√	√
Utiliza verniz adequado	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Respeita tempo de secagem	√	√			√	√	√	√		√		√
Tratamento do rotor									√	√	√	√
Pintura externa no motor								√	√	√	√	√
Usa aquecedor indutivo	√	√						√	√	√	√	√
Testa o motor na rede elétrica	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√	√
Emite relatórios para o cliente								√	√	√	√	√

TABELA 3 – CARACTERIZAÇÃO DAS OFICINAS QUANTO AO FERRAMENTAL EMPREGADO

Oficina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Item												
Aquecedor	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√
An. Vibração									√	√		
Aquecedor	√	√						√	√	√	√	√
Balanceadora										√		
Bancada de teste	√							√	√			
Bobinadeira	√						√	√	√	√	√	
Cabine pintura									√	√		
Compressor	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√	√
Estufa secagem	√					√	√	√	√	√	√	√
Guilhotina		√					√	√	√	√	√	√
Guincho hidrául.	√	√				√	√	√	√	√	√	√
Jato de areia							√	√		√	√	
Megger								√	√	√	√	√
Paquímetro	√	√							√	√	√	√
Multímetro	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
Prensa	√	√				√	√	√	√	√	√	√
Roncador	√								√	√		

Foram, ainda, executados ensaios de rotor livre e de rotor bloqueado, além do teste de elevação de temperatura. Os rendimentos para os pontos de carregamento de 25, 50, 75 e 100% foram obtidos tanto pelo método direto, com o auxílio de dinamômetro, como pelo método de separação das perdas. A dano provocado, queima por sobrecarga, foi escolhido por ser esta a causa mais comum de estrago de motores na indústria, tornando a análise mais representativa.

Sendo assim, a seguir apresentam-se tabelas com os resultados dos ensaios antes e posterior à manutenção. Nestas tabelas tem-se a resistência do estator referida a 75°C (R_{75}), as perdas por atrito e ventilação (P_{AV}), as perdas por histerese, Foucault e adicionais (P_{HF+AD}), as perdas por efeito Joule no estator (P_{JE}) e no rotor (P_{JR}), e a elevação de temperatura com carga nominal ($\Delta\theta$). As perdas são expressas em kW e a elevação de temperatura em graus Celcius.

TABELA 4 – GRANDEZAS ANTES DO REPARO.

Motor	P (cv)	R_{75}	P_{AV}	P_{HF+AV}	P_{JE}	P_{JR}	$\Delta\theta$
1	5	1,369	0,042	0,573	0,294	0,139	82
2	5	1,654	0,045	0,328	0,335	0,173	70
3	10	0,560	0,059	0,484	0,411	0,179	75
4	10	0,554	0,093	0,455	0,407	0,138	69
5	10	0,561	0,036	0,402	0,402	0,177	73
6	10	0,596	0,142	0,419	0,455	0,196	86
7	15	0,298	0,104	0,778	0,501	0,204	76
8	15	0,372	0,046	0,560	0,567	0,286	80

TABELA 5 – GRANDEZAS ANTES DO REPARO

Motor	P (cv)	n_{100}	I_{100}	I_0	η_{50}	η_{75}	η_{100}
1	5	1737	14,7	7,46	77,1	79,6	80,1
2	5	1721	14,3	7,28	78,8	81,7	80,7
3	10	1759	27,1	10,2	82,3	84,7	84,7
4	10	1767	27,1	13,3	84,4	86,7	86,8
5	10	1759	26,8	12,0	84,9	86,5	86,3
6	10	1756	30,2	14,1	78,3	81,5	81,4
7	15	1768	41,0	17,0	84,0	86,1	86,3
8	15	1755	39,0	16,9	86,0	87,2	86,8

Na Tab. 5 apresentam-se a rotação e a corrente a plena carga (n_{100} e I_{100}) e a corrente em vazio (I_0). Estas grandezas são muito importantes quando deseja-se avaliar o comportamento das perdas no rotor, perdas no ferro e perdas a plena carga. Além destas tem-se também os rendimentos a 50, 75 e 100% de carga.

A seguir são apresentados o comportamento destas grandezas após a imposição da queima por sobrecarga e conseqüente manutenção.

TABELA 6 – GRANDEZAS APÓS O REPARO.

Motor	P (cv)	R_{75}	P_{AV}	P_{HF+AV}	P_{JE}	P_{JR}	$\Delta\theta$
1	5	1,298	0,041	0,351	0,279	0,128	76
2	5	1,443	0,061	0,351	0,298	0,179	72
3	10	0,490	0,056	0,485	0,357	0,164	71
4	10	0,575	0,049	0,444	0,413	0,122	65
5	10	0,554	0,023	0,403	0,393	0,174	61
6	10	0,581	0,084	0,455	0,528	0,193	91
7	15	0,368	0,080	0,725	0,643	0,204	97
8	15	0,362	0,0319	0,496	0,555	0,316	71

TABELA 7 – GRANDEZAS APÓS O REPARO

Motor	P (cv)	n_{100}	I_{100}	I_0	η_{50}	η_{75}	η_{100}
1	5	1741	14,7	7,39	79,0	81,7	82,1
2	5	1719	14,3	7,39	78,3	80,9	80,8
3	10	1762	27,0	10,4	83,1	85,4	85,5
4	10	1771	26,8	13,4	85,2	87,5	87,5
5	10	1760	26,6	11,8	84,4	86,2	86,3
6	10	1760	26,6	11,8	79,3	81,9	81,7
7	15	1769	41,8	17,0	83,6	85,6	85,4
8	15	1751	39,1	16,6	85,4	86,9	86,5

As variações percentuais destas grandezas são agora apresentadas graficamente nas figuras a seguir, através das quais pode-se inferir a respeito dos efeitos da manutenção sobre o desempenho dos motores.

As figura 1 apresenta a variação da resistência do estator. As figuras de 2 a 5 apresentam importantes características de variação das perdas no motor, enquanto as figuras 6 e 7 mostram o comportamento de variação das correntes em vazio e em plena carga.

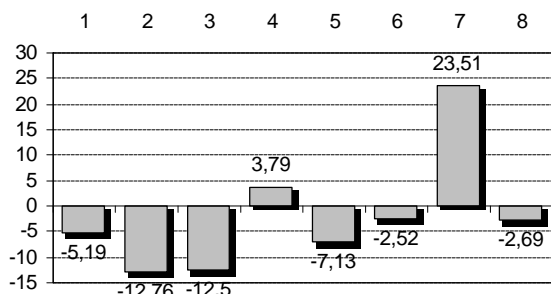


FIGURA 1 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE R_{75} .

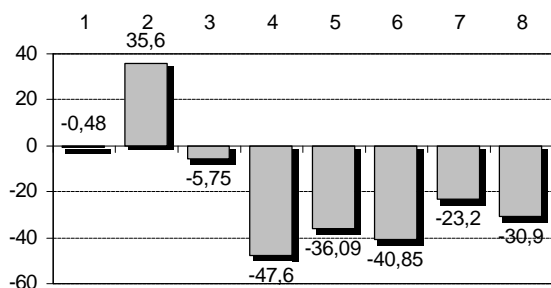


FIGURA 2 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE P_{AV} .

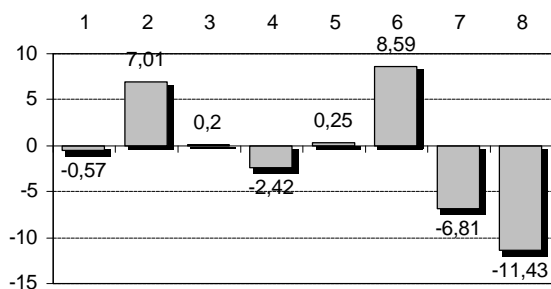


FIGURA 3 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE P_{HF+AD} .

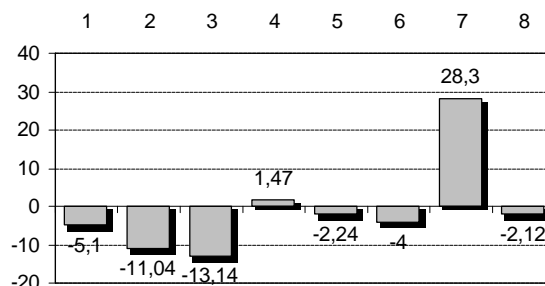


Figura 4 – Variação percentual de P_{JE} .

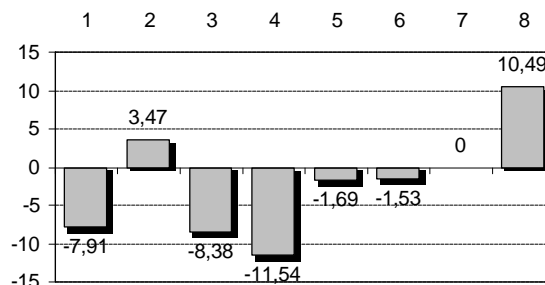


FIGURA 5 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE P_{JR} .

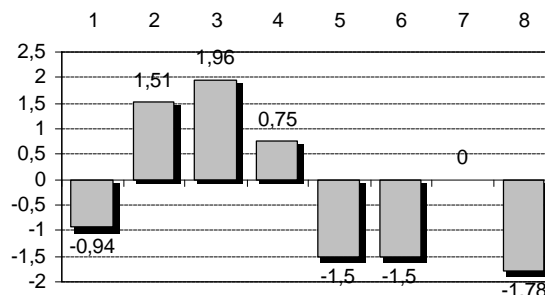


FIGURA 6 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE I_0 .

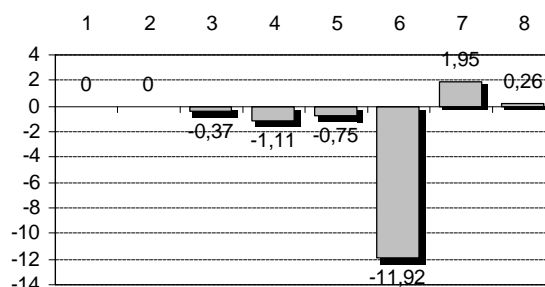
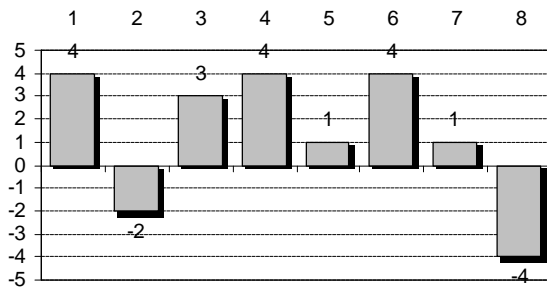
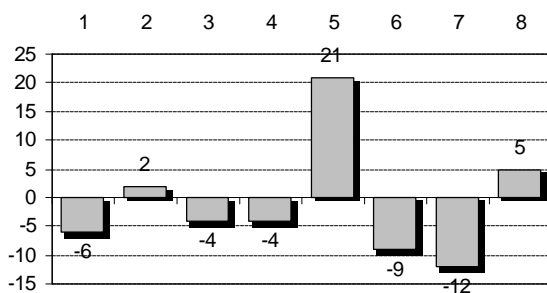
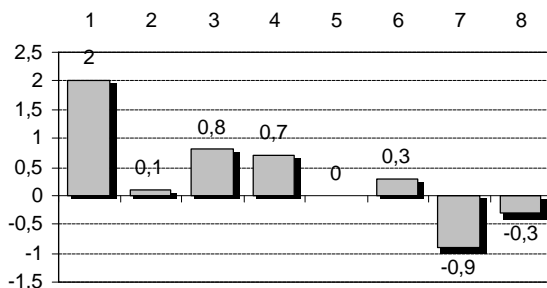


FIGURA 7 – VARIAÇÃO PERCENTUAL DE I_{100} .FIGURA 8 – VARIAÇÃO DE n_{100} EM rpm.FIGURA 9 – VARIAÇÃO DE $\Delta\theta$ EM $^{\circ}\text{C}$.FIGURA 10 – VARIAÇÃO DE η_{100} EM PONTOS %.

3.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com respeito às oficinas de reparo de motores, pode-se considerar que a maior parte das visitadas seguem os procedimentos corretos para a manutenção de motores de indução. Em algumas ocasiões foi observado o emprego de materiais de qualidade duvidosa, principalmente no que diz respeito aos isolantes, o que pode influenciar sobremaneira na queda da vida útil dos motores. Outra prática empregada com uma certa frequência, e também danosa, é a utilização de maçarico para remoção das espiras danificadas, o que pode causar alteração nas propriedades eletromagnéticas do núcleo.

Como conclusão principal sobre o desempenho dos motores após o reparo, pode-se observar que houve um aumento médio do rendimento dos mesmos. É importante observar que os motores ensaiados eram motores usados, levando a uma melhor aderência com a realidade, e não motores novos, como em outros estudos executados em nível internacional, onde observa-se uma queda média do rendimento.

A principal característica que se altera nas manutenções é uma notável variação na resistência dos enrolamentos do estator e, por conseguinte, alteração das perdas por efeito Joule. Esta variação, no entanto, não é uniforme, podendo-se encontrar diferenças antes e após o rebobinamento da ordem -13,1 a +28,3%. Observe-se que as perdas Joule no estator têm aproximadamente o mesmo percentual de variação da resistência do estator.

Considerando que a oficina tenha utilizado um condutor de mesma bitola, esta diminuição da resistência do estator pode ser parcialmente explicada pelo emprego de material de melhor qualidade ou por alguma diferença entre o enrolamento original e o executado nas oficinas, pois nas fábricas é utilizado maquinário especial ao passo que nas oficinas o bobinamento é feito manualmente. Desta maneira, torna-se difícil conseguir alojar um número igual ao original de espiras dentro das ranhuras, o que também contribui com a redução da resistência do estator, alterando inclusive outras características da máquina.

Como a estrutura do projeto do motor permanece intocada, ou seja, o pacote magnético, o formato e a disposição das ranhuras e rotor não se alteram, mas são resultados de um projeto otimizado do motor, observa-se que em poucos casos existiram variações nas perdas por histerese e Foucault. Tal fato pode ser observado pelos resultados da separação das perdas e também pela pequena variação da corrente em vazio do motor. Nos casos onde existam grandes variação destas perdas, pode-se considerar o fato de que, devido à natureza do defeito imposto (queima por sobrecarga) e ao procedimento adotado para a manutenção (aplicação de maçarico), a elevação da temperatura possa influenciar sobremaneira as características magnéticas do material do núcleo.

Sendo assim, a variação da resistência do estator e a variação das perdas por atrito e ventilação, decorrentes da troca de rolamento, limpeza e lubrificação são fatores preponderantes sobre o resultado do rendimento após a manutenção. Tal correlação pode ser verificada nas tabelas apresentadas.

Com a redução ou aumento das perdas no estator do motor, tem-se uma maior ou menor transferência de potência para o rotor. Sendo assim, as perdas também seguem esta proporção. Para verificar as perdas no rotor pode-se analisar a rotação à plena carga. Esta diminui com o aumento das perdas e vice-versa. É importante observar que, mesmo com um aumento do rendimento global do motor, a redução da rotação diminui a eficiência da troca de calor entre o motor e o ambiente, acarretando uma elevação de temperatura. É importante observar que, mesmo com um aumento do rendimento global do motor, a redução da velocidade de rotação diminui a eficiência da troca de calor entre o motor e o ambiente, acarretando em uma elevação de temperatura maior. Observa-se que a eficiência dessa troca de calor também depende da temperatura externa. Esta correlação é clara ao se observar as perdas no rotor, rotação e elevação de temperatura.

Considerando a classificação geral das oficinas pesquisadas, pode-se constatar uma clara correlação entre as características de perdas e rendimento e a qualidade dos procedimentos de reparo, ferramental disponível e aspectos gerais. Este fato pode ser notado com relação às perdas por atrito e ventilação, onde o maior aumento observado (35,6%) foi obtido em uma das piores oficinas enquanto as oficinas melhores classificadas conseguiram uma redução de 23 a 47%. O mesmo acontece com as perdas por histerese e Foucault, onde a maior queda (-1,4%) foi observada em uma das oficinas de melhor classificação. Curiosamente o maior aumento da resistência da armadura (23,5%) se deu em uma oficina dotada de bobinadeira, enquanto as maiores reduções (-12,7 e -12,5%) em oficinas com bobinamento manual. Este fato pode ser explicado, em contraponto ao citado anteriormente, desde que o enrolamento manual permite um menor diâmetro da curvatura na cabeça de bobina, acarretando em um menor comprimento de condutor necessário para um mesmo número de espiras.

Como foi verificado uma grande redução nas perdas por atrito e ventilação após o rebobinamento, supõe-se que este fato seja devido à limpeza e lubrificação executadas durante a manutenção. Sendo assim, recomenda-se que seja feita uma avaliação dos efeitos da simples limpeza sobre o rendimento do motor, tendo em vista que esta é uma medida de baixíssimo custo e que pode vir a ser aplicada em larga escala pela indústria para reduzir o consumo de energia elétrica.

4.0 – CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma avaliação do desempenho de motores de indução trifásicos após uma manutenção corretiva. Os resultados mostram que o rendimento do motor não varia muito após o reparo, podendo até mesmo ser maior em diversos casos, tornando o reparo de motores uma atividade bastante atrativa. Foi observado também que a qualidade da oficina de manutenção, em termos de procedimentos, material e equipamentos empregados, são fundamentais para o sucesso do reparo do motor e a sua aplicação eficiente. Foi também observado a importância da limpeza do motor, já que as perdas por atrito e ventilação diminuem bastante após a manutenção.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5383 - Máquinas elétricas girantes - Máquinas de indução - Determinação das características.
- (2) ALBRECHT, P.F. et alii; Assessment of the reliability of motors in utility applications. IEEE Trans. on EC-2, N.3, sep. 1987, pp 396-406.
- (3) ANDERS, G.J. et alii; A probabilistic model for evaluating the remaining life of electrical insulation in rotating machines. IEEE Trans. on EC-5, N.4, dec. 1990, pp 761-767.
- (4) CHARETTE, A.; ANGER, P.; Effect of rewinding on motor efficiency. LTEE Hydro-Québec.
- (5) IEEE. Recommended practice for the repair and rewinding of motors for the petroleum and chemical industry. IEEE-std1068. 1990.
- (6) BC HYDRO; Rewound high-efficiency motor performance. Guide to energy management.
- (7) ONTARIO HYDRO; Rewound motor efficiency. Technology profile, nov 1991.
- (8) BONNETT, A.; SOUKUP, C.; Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors.
- (9) NADEL,S.; SHEPARD, M.; GREEBERG, S.; KATZ, G.; ALMEIDA, A.. Energy efficient motor systems. ACEEE, 1992.