

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

USP

Programa de Pós-Graduação em Energia

PPGE

(EP / FEA / IEE / IF)

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO E
OTIMIZAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS VISANDO A CONSERVAÇÃO
DE ENERGIA EM APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Mário Cesar do Espírito Santo Ramos

**São Paulo
2009**

MÁRIO CESAR DO ESPÍRITO SANTO RAMOS

Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica / Faculdade de Economia e Administração / Instituto de Eletrotécnica e Energia e Instituto de Física) para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientação: Prof. Dr. Hédio Tatizawa

**São Paulo
2009**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Ramos, Mário Cesar do Espírito Santo

Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais.

Mário Cesar do Espírito Santo Ramos; Orientador: Prof. Dr. Hédio Tatizawa – São Paulo, 2009.

246p.

Tese (Doutorado – Programa de Pós- Graduação em Energia)
EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.


1. Motores elétricos de indução trifásicos. 2. Conservação de energia elétrica. 3. Metodologia MHmit. 4. Aplicações industriais.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
EP – FEA – IEE - IF

MÁRIO CESAR DO ESPÍRITO SANTO RAMOS

‘Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais’

Tese defendida e aprovada em 29/10/2009 pela Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Hédio Tatizawa – PPGE/USP
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora



Prof. Dr. André Luiz Veiga Gímenes – Bandeirante Energia



Prof. Dr. Alexandre Piantini – PPGE/USP



Prof. Dr. Luiz Fernando Tibaldi Kurahassi - UNICID



Prof. Dr. Arnaldo Gakiya Kanashiro – PPGE/USP

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Mário César G. Ramos e Vilma do Espírito Santo Ramos.

Ao meu avô Hugo Ramos.

Aos meus padrinhos Olympio Norberto Zappile e Therezinha Giaco Zappile.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos Professores Hédio Tatizawa, Alexandre Piantini e Arnaldo Kanashiro pela amizade, atenção e orientação.

A todos os Professores, Funcionários e Alunos do IEE/USP.

Ao Laboratório de Máquinas do IEE/USP pela disponibilização dos dados de ensaios de motores elétricos de indução trifásicos.

Aos Professores André Luiz Veiga Gimenes e Luiz Fernando Tibaldi Kurahassi pelas valiosas contribuições.

RESUMO

Esta tese apresenta uma metodologia específica para a quantificação das perdas energéticas em motores elétricos de indução trifásicos com rotor em gaiola, por meio da determinação indireta do rendimento nas condições de funcionamento a plena carga. A referida metodologia, denominada MHmit, foi desenvolvida em ambientes industriais, particularmente no segmento alimentício, contando também com a colaboração do Laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo no tocante a disponibilização dos ensaios de vários motores de indução trifásicos com rotor em gaiola ao longo de vários anos de prestação de serviços. Esses ensaios foram de extrema importância para a validação da metodologia apresentada.

Sendo o motor elétrico um equipamento de uso final de forte presença industrial, é passível de substituição por tecnologias mais eficientes mediante a realização de estudos de eficiência energética. Os diagnósticos energéticos em sistemas motrizes beneficiam as indústrias por meio da diminuição dos custos com energia elétrica, tanto pela redução de demanda, quanto pela redução do consumo. Porém, para o desenvolvimento desta metodologia foi necessária a avaliação de estudos realizados por empresas prestadoras de serviços na área de conservação de energia elétrica. Essas empresas foram selecionadas a partir da averiguação da satisfação do cliente quanto aos serviços prestados e resultados obtidos após a substituição dos motores.

Por meio da análise de 266 casos, verificaram-se os problemas encontrados por essas empresas antes, durante e após a substituição dos motores elétricos do tipo padrão por de alto rendimento. Em alguns casos, a substituição de um motor antigo do tipo padrão por um motor novo do tipo alto rendimento resultou num aumento do consumo de energia elétrica, fato este totalmente controverso quando se espera uma economia de 2 a 6% proveniente desta mudança de tecnologias, de acordo com Eletrobrás e NEMA MG 1. A metodologia MHmit desenvolvida neste trabalho contempla esta situação.

As principais metodologias atualmente utilizadas na realização de estudos para substituição de motores elétricos dos tipos padrão por alto rendimento foram analisadas e apresentadas neste trabalho. Dentre elas, a metodologia convencional, que utiliza curvas de motores elétricos para a determinação do rendimento, a metodologia que utiliza o programa denominado BD Motor, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica da Eletrobrás, a

metodologia que utiliza o programa Mark IV, desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Itajubá, em parceria com o Procel / Eletrobrás e o *software Motor Master*, desenvolvido pelo Departamento de Energia Norte-Americano (DoE). Todos esses programas estão disponíveis gratuitamente para *download* no site do Procel Info / Eletrobrás - www.procelinfo.com.br.

A metodologia MHmit, desenvolvida neste trabalho, apresentou desvios percentuais satisfatórios (10,12%) entre os valores previstos (durante as simulações com o aplicativo MHmit) e reais (por meio da verificação da real economia de energia elétrica proporcionada após a substituição do novo motor) das metodologias em estudo. Estas, não contemplam dados de parâmetros de motores antigos, dificultando a obtenção de um valor verdadeiro do rendimento do motor em funcionamento, pois muitas vezes este já sofreu reparos, rebobinagens e curtos-circuitos. Os 86 estudos de caso realizados para a validação desta metodologia (motores com potências de 7,5 a 125 cv) mostraram diferenças significativas entre os valores previstos pelas metodologias atuais e a metodologia desenvolvida MHmit.

ABSTRACT

This thesis presents a specific methodology to quantify the energy loss in three-phase induction electric motors with cage rotor, by indirect determination of efficiency under operation conditions at full load. This methodology, named MHmit, was developed in industrial environments, particularly in textile and food sectors, relying on the collaboration of the machines laboratory of the Institute of Electrotechnics and Energy, University of São Paulo on the availability of tests in several three-phase induction motors with cage rotor over several years under the laboratory service. These essays were extremely important to validate the presented methodology.

Once the electric motor is an equipment of final use strongly present in industry, it is subject to replacement by more efficient technologies by carrying out energy efficiency studies. Energy Diagnosis in electric motors aims to provide the client with a decrease in electric energy costs, not only a decrease in demand, but also as a decrease in consumption. However, for the development of this methodology, it was necessary for evaluation, an assessment by companies that provide services in the area of energy conservation. These companies were selected from an investigation of customer satisfaction on services provided and results obtained after replacing the motors.

By analyzing 266 cases, the problems found by these companies had been verified before, during and after the substitution of standard electric motors by high-efficiency ones. In some cases, the substitution of an old standard motor by a new high-efficiency one resulted in an increase of consumption of electric energy, and this fact is totally controversial when one expects savings of 2 to 6 % from this change of technologies, according to Eletrobrás and NEMA MG 1. The methodology MHmit developed in this work covers this situation.

The main methodologies currently used to carry out studies to replace standard electric motors by high-efficiency ones were analyzed and presented in this work. Amongst them, the conventional methodology, which uses electric motor curves to determine efficiency, and the methodology that uses the program named BD Motor, developed by the Center of Research in Electric Energy of Eletrobrás, the methodology that uses the program Mark IV, developed by researchers from Federal University of Itajubá, in partnership with Procel/Eletrobrás and the

program named Motor Master, developed by the North American Department of Energy (DoE). All these programs are freely available for download at Procel Info/Eletróbrás website - www.procelinfo.com.br.

The MHmit methodology, developed in this work, presented satisfactory percentage values of deviations (10,12%), between the predicted values (during simulations with MHmit application) and real (by checking the real electric energy savings provided after the old standard motor replacement) when compared to the methodologies in study. These, do not include the old motor data parameters, making it difficult to obtain a true value of motor operation efficiency, because it may have gone through repairs, rewinding and short-circuits. The 86 case studies which were carried out for the validation of this methodology (motors with rated power from 7.5 to 125 hp) showed significant differences between the values provided by current methodologies and the methodology developed MHmit.

OBJETIVO

Apresentar uma metodologia inédita denominada MHmit, desenvolvida nesta tese com o intuito de se estimar as perdas energéticas no motor elétrico de indução trifásico com rotor em gaiola, por meio da determinação indireta do rendimento deste em funcionamento, utilizando-se de banco de dados com parâmetros elétricos e mecânicos, específicos para cada unidade motriz estudada, bem como equações que foram desenvolvidas para este fim.

MOTIVAÇÃO

Em função das dificuldades encontradas pela sociedade brasileira no tocante a oferta de energia, conservar este insumo pode constituir-se em alternativa eficaz para minimizar racionamentos e grandes investimentos.

Além disso, observam-se na maioria das indústrias, grandes desperdícios de energia, devido à utilização de equipamentos e processos energeticamente deficientes, que sobreviveram a um mercado internacionalmente fechado, mas que necessitam urgentemente de estudos voltados a substituições, modificações e atualizações, de forma a reduzirem seus custos internos e se tornarem mais competitivas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Consumo de energia elétrica por setor no Brasil.....	1
Figura 2.1 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 1.	9
Figura 2.2 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 2.	10
Figura 2.3 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 3.	11
Figura 2.4 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 4.	12
Figura 2.5 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 5.	14
Figura 3.1 - Relação massa / potência de um motor elétrico ao longo dos anos.	16
Figura 3.2 - Participação percentual dos motores elétricos no ambiente industrial brasileiro.....	16
Figura 3.3 - Participação dos motores elétricos nos acionamentos industriais.....	17
Figura 3.4 - Árvore da Família dos Motores Elétricos.	19
Figura 3.5 - Comparação entre motores do tipo padrão e alto rendimento.	23
Figura 3.6 - Comportamento do rendimento do motor elétrico em função do carregamento.	25
Figura 3.7 - Comportamento do fator de potência do motor elétrico em função do carregamento.	26
Figura 3.8. Comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor.	28
Figura 3.9. Comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor para a chave estrela-triângulo.....	29
Figura 3.10 - Comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor para a chave compensadora.....	30
Figura 3.11 - Comportamento do conjugado em relação à rotação do motor para o Soft-Starter.....	31
Figura 3.12 - Estrutura de um conversor de frequência.	32
Figura 3.13 - Limites das variações de tensão e frequência em funcionamento.	35
Figura 3.14 - Fator de redução de potência em função do percentual de desequilíbrio de tensão.....	37
Figura 3.15 - Desequilíbrio de corrente em função do desequilíbrio de tensão.	38
Figura 3.16 - Fator de redução de conjugado em função do fator de harmônicos de tensão.	42

<i>Figura 3.17 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado constante.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.18 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado linear.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.19 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado parabólico.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.20 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado hiperbólico.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.21 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado não uniforme.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 3.22. Curva de conjugado x rotação para motores de indução com rotor do tipo gaiola.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.23 - Curvas de conjugado do motor e da carga em função da rotação para um sistema estável.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 3.24 - Curvas de conjugado do motor e da carga em função da rotação para um sistema instável.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.25 - Curva do motor e da carga acionada.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.1 - Parâmetros apresentados pelo programa BD Motor para cada unidade selecionada.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.2 - Dimensões de um motor elétrico de indução.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.3 - Corrente e conjugado do motor para partida direta.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.4 - Conjugado em função da rotação para um motor Categoria N.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.5 - Lista de motores elétricos.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.6 - Condições de operação de um motor de 100 cv para dimensionamento por potência de entrada.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.7 - Condições de operação de um motor de 100 cv para dimensionamento por intensidade de corrente.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.8 - Condições de operação de um motor de 100 cv para dimensionamento por escorregamento.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.9 - Análise econômica entre motores de 100 cv, padrão e alto rendimento.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.10 - Curvas de desempenho de um motor de indução de gaiola (400 cv, 4 pólos - Tipo Padrão - 380 V).</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.11 - Determinação do rendimento e fator de potência de um motor elétrico de indução (400 cv, 4 pólos - Tipo Padrão - 380 V).....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.12 - Determinação da intensidade de corrente elétrica e fator de potência de um motor elétrico trifásico de indução (250 cv, 4 pólos - Tipo Padrão - 380 V).</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5.13 - Tela de apresentação do programa Mark IV.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5.14 - Identificação do motor elétrico.....</i>	<i>87</i>

<i>Figura 5.15 - Tela para preenchimento de dados adicionais.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.16 - Entrada de dados para rendimento, fator de potência e características da carga.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.17 - Tela de entrada de dados coletados em campo.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5.18 - Tela inicial do Motor Master.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5.19 - Lista de motores selecionados no programa Motor Master.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.20 - Tela de dados de um motor elétrico da marca WEG.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.21 - Tela de comparação entre dois motores.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5.22 - Relatório das economias obtidas.</i>	<i>97</i>
<i>Figura 6.1 - Edifício Ramos de Azevedo - São Paulo.</i>	<i>99</i>
<i>Figura 6.2 - Salão de ensaio de máquinas elétricas.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 6.3 - Inauguração do laboratório de máquinas do IEE em 25/04/1966.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 6.4 – Resultados do ensaio para a determinação da curva de rendimento de um motor WEG 150 cv.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 6.5 – Resultados do ensaio para a determinação da curva de rendimento de um motor WEG 100 cv.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 7.1 – Catálogos obtidos para a análise e cadastro de parâmetros de motores elétricos.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 7.2 – Catálogo WEG com dados de parâmetros de motores elétricos fabricados no ano de 1979.</i>	<i>130</i>
<i>Figura 7.3 – Perda de conjugado e rotação em função do tempo de uso para cargas do tipo conjugado constante.</i>	<i>132</i>
<i>Figura 7.4 – Perda de conjugado e rotação em função do tempo de uso para cargas do tipo conjugado linear.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 7.5 – Perda de conjugado e rotação em função do tempo de uso para cargas do tipo conjugado parabólico.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 7.6 – Perda de conjugado e rotação em função do tempo de uso para cargas do tipo conjugado hiperbólico.....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 7.7 – Curvas de conjugado de um motor em uso do tipo padrão comparado com um motor novo do tipo alto rendimento acionando uma carga com conjugado do tipo constante.</i>	<i>145</i>
<i>Figura 7.8 – Determinação do Grau de Desequilíbrio de Tensão utilizando analisador trifásico de potência e qualidade de energia elétrica.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 7.9 – Tela de abertura do MHmit.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 7.10 – Tela do módulo de cadastro do cliente.</i>	<i>153</i>
<i>Figura 7.11 – Tela de identificação do motor elétrico originalmente instalado.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 7.12 – Tela de identificação do motor elétrico proposto.....</i>	<i>154</i>

<i>Figura 7.13 – Tela para cadastro das condições de operação do acionamento.</i>	<i>155</i>
<i>Figura 7.14 – Tela do módulo de entrada de dados de medição.</i>	<i>156</i>
<i>Figura 7.15 – Tela do módulo de entrada de tarifas de energia elétrica do MHmit.</i>	<i>157</i>
<i>Figura 7.16 – Tela do módulo para determinação do rendimento a plena carga do motor elétrico originalmente instalado.</i>	<i>158</i>
<i>Figura 7.17 – Tela do módulo para estudos de redimensionamento motriz.</i>	<i>159</i>
<i>Figura 7.18 – Tela do módulo de entrada de dados de verificação.</i>	<i>159</i>
<i>Figura 7.19 – Tela do módulo de análise econômica.</i>	<i>160</i>
<i>Figura 7.20 – Tela do módulo de avaliação de desvios.</i>	<i>161</i>
<i>Figura 7.21 – Tela do módulo de cadastro de fotos.</i>	<i>161</i>
<i>Figura 7.22 – Relatório Executivo.</i>	<i>163</i>
<i>Figura 8.1 – Motor n. 637 – 100 cv, 4 pólos, 440V, fabricado em 1997.</i>	<i>166</i>
<i>Figura 8.2 – Condições de operação do motor elétrico em estudo.</i>	<i>166</i>
<i>Figura 8.3 – Tela de identificação do motor utilizado na simulação.</i>	<i>167</i>
<i>Figura 8.4 – Tela de cadastro dos parâmetros do motor elétrico em funcionamento.</i>	<i>168</i>
<i>Figura 8.5 – Tela de entrada de dados de medição e funcionamento do motor elétrico originalmente instalado.</i>	<i>169</i>
<i>Figura 8.6 – Tela de relatório do motor elétrico originalmente instalado.</i>	<i>169</i>
<i>Figura 8.7 – Curvas do motor WEG do tipo padrão, 4 pólos, 440 V, fabricado em 2006. ..</i>	<i>170</i>
<i>Figura 8.8 – Tela do programa Motor Master para a seleção do banco de dados.</i>	<i>171</i>
<i>Figura 8.9 – Seleção do motor elétrico utilizado no estudo de caso.</i>	<i>171</i>
<i>Figura 8.10 – Parâmetros do motor elétrico selecionado.</i>	<i>172</i>
<i>Figura 8.11 – Rendimento do motor elétrico em estudo segundo o programa Motor Master - Análise A.</i>	<i>173</i>
<i>Figura 8.12 – Rendimento do motor elétrico em estudo segundo o programa Motor Master - Análise B.</i>	<i>174</i>
<i>Figura 8.13 – Identificação do motor elétrico originalmente instalado.</i>	<i>174</i>
<i>Figura 8.14 – Tela do módulo de entrada de dados de medição.</i>	<i>175</i>
<i>Figura 8.15 – Rendimento do motor elétrico em estudo.</i>	<i>175</i>
<i>Figura 8.16 – Apresentação dos rendimentos e carregamentos obtidos para cada metodologia utilizada no estudo de caso.</i>	<i>176</i>
<i>Figura 8.17 – Determinação da intensidade de corrente elétrica e fator de potência de um motor WEG alto rendimento, 4 pólos, 440 V, fabricado em 2006.</i>	<i>177</i>
<i>Figura 8.18 – Motor n. 1506 – 100 cv, 4 pólos, 440 V, alto rendimento, fabricado em 2003.</i>	<i>178</i>

<i>Figura 8.19 – Simulação do valor da intensidade de corrente elétrica do motor de alto rendimento n. 1506.</i>	<i>179</i>
<i>Figura 8.20 – Premissas adotadas para a realização do estudo de viabilidade econômica.</i>	<i>180</i>
<i>Figura 8.21 – Resultados do estudo de viabilidade econômica.</i>	<i>180</i>
<i>Figura 8.22 – Tela de comparação para o cenário de substituição do motor existente. ...</i>	<i>181</i>
<i>Figura 8.23 – Tela de entrada de parâmetros para análise econômica.</i>	<i>182</i>
<i>Figura 8.24 – Tela de resultados do Motor Master.</i>	<i>182</i>
<i>Figura 8.25 – Motor de alto rendimento proposto.</i>	<i>183</i>
<i>Figura 8.26 – Resultados do módulo de análise econômica.</i>	<i>184</i>
<i>Figura 8.27 – Valores de economia anual de energia elétrica apresentados pelas metodologias em estudo em relação ao valor real.</i>	<i>185</i>
<i>Figura 8.28 – Desvios percentuais obtidos para cada Metodologia.</i>	<i>185</i>
<i>Figura 9.1 – Classificação das metodologias propostas.</i>	<i>189</i>
<i>Figura 9.2 – Bombas de água gelada – grupos 2 e 3.</i>	<i>190</i>
<i>Figura 9.3 – Bombas de água gelada – grupo 4.</i>	<i>191</i>
<i>Figura 9.4 – Bombas da torre de resfriamento – grupo 4.</i>	<i>191</i>
<i>Figura 9.5 – Compressor de ar – grupo 2.</i>	<i>192</i>
<i>Figura 9.6 – Compressor de refrigeração – grupo 1.</i>	<i>192</i>
<i>Figura 9.7 – Compressor de refrigeração – grupo 3.</i>	<i>193</i>
<i>Figura 9.8 – Concha Macintyre.</i>	<i>193</i>
<i>Figura A.1 - Equipamento Fluke 43B.</i>	<i>206</i>
<i>Figura A.2 - Medição de potência em sistemas trifásicos.</i>	<i>207</i>
<i>Figura A.3 - Tela de harmônicos de corrente do Fluke 43B.</i>	<i>208</i>
<i>Figura A.4 - Tela de sags - swells do Fluke 43B.</i>	<i>209</i>
<i>Figura A.5 - Tela de fenômenos transitórios do Fluke 43B.</i>	<i>209</i>
<i>Figura A.6 - Tela de corrente inrush do Fluke 43B.</i>	<i>210</i>
<i>Figura A.7. Analisador trifásico de potência e qualidade de energia elétrica Fluke 434. ..</i>	<i>212</i>
<i>Figura A.8. Conexão do analisador Fluke 434 ao sistema trifásico.</i>	<i>213</i>
<i>Figura A.9 - Tela 1 (Medidor).</i>	<i>213</i>
<i>Figura A.10 - Tela 2 (Tendência).</i>	<i>214</i>
<i>Figura A.11 - Tela 3 (Formas de onda).</i>	<i>215</i>
<i>Figura A.12 - Tela 4 (Fasores).</i>	<i>215</i>
<i>Figura A.13 - Tela 5 (Histograma).</i>	<i>216</i>
<i>Figura A.14 – Analisador MARH-21.</i>	<i>218</i>

<i>Figura A.15 – Aquisição de dados de consumo em motores de indução trifásicos.....</i>	<i>220</i>
---	-------------------

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Dados fornecidos pela Empresa 1.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabela 2.2 - Dados fornecidos pela Empresa 2.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabela 2.3 - Dados fornecidos pela Empresa 3.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabela 2.4 - Dados fornecidos pela Empresa 4.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 2.5 - Dados fornecidos pela Empresa 5.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 2.6 - Análise estatística dos dados da Empresa 1.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 2.7 - Análise estatística dos dados da Empresa 2.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2.8 - Análise estatística dos dados da Empresa 3.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2.9 - Análise estatística dos dados da Empresa 4.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 2.10 - Análise estatística dos dados da Empresa 5.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 3.1 - Principais perdas em um motor elétrico de indução.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 3.2 - Classificação dos harmônicos.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 5.1 - Dimensões dos motores elétricos de indução [mm]</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 6.1 – Medição da resistência elétrica dos enrolamentos para o Relatório N. 01 ...</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 6.2 – Resultados obtidos para o ensaio em vazio para o Relatório N. 01.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabela 6.3 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 01.</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 6.4 – Resultados obtidos para a determinação da elevação da temperatura para o Relatório N. 01.</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 6.5 – Resultados obtidos para o ensaio com rotor bloqueado para o Relatório N. 01</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 6.6 – Resultados obtidos para a determinação do conjugado máximo para o Relatório N. 01</i>	<i>113</i>
<i>Tabela 6.7 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 02</i>	<i>116</i>
<i>Tabela 6.8 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 03</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 6.9 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 04</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 6.10 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 05</i>	<i>123</i>
<i>Tabela 6.11 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 06</i>	<i>125</i>
<i>Tabela 7.1 - Tela de cadastro de motores WEG.....</i>	<i>163</i>

<i>Tabela 8.1 – Dados de placa do motor originalmente instalado.....</i>	<i>164</i>
<i>Tabela 8.2 – Medições realizadas no motor originalmente instalado.....</i>	<i>165</i>
<i>Tabela 8.3 – Medições realizadas no motor de alto rendimento.</i>	<i>184</i>
<i>Tabela 9.1 – Apresentação dos motores elétricos originalmente instalados.....</i>	<i>187</i>
<i>Tabela 9.2 – Economia real de energia elétrica.</i>	<i>188</i>
<i>Tabela 9.3 – Desvios percentuais médios para cada metodologia.....</i>	<i>188</i>
<i>Tabela 9.4 – Resultados do Programa de Eficiência Energética.....</i>	<i>190</i>
<i>Tabela A.1 – Tempos de registros e intervalos de plotagem do Fluke 43B.</i>	<i>211</i>
<i>Tabela A.2 – Especificações do equipamento Fluke 43B.....</i>	<i>211</i>
<i>Tabela A.3 – Especificações do equipamento Fluke 434.</i>	<i>217</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

η = rendimento do motor elétrico.

η_{cf} = rendimento do motor elétrico alimentado por conversor de frequência.

η_{graf} = rendimento do motor elétrico determinado graficamente.

η_{sh} = rendimento do motor elétrico alimentado por tensão senoidal sem conteúdo harmônico.

B_M = indução máxima.

C = conjugado.

C_{ac} = conjugado acelerador.

C_{ma} = conjugado médio acelerador.

C_{max} = conjugado máximo.

C_n = conjugado nominal.

C_m = conjugado do motor.

C_o = conjugado básico.

$\cos\phi_1$ = fator de potência (motor novo).

$\cos\phi_2$ = fator de potência (motor antigo).

C_r = conjugado resistente.

C_{rb} = conjugado com rotor bloqueado.

C_{rf} = conjugado referido ao eixo.

C_{rr} = carregamento.

e = espessura da chapa do material magnético que compõe o núcleo.

E_{AR} = consumo de energia elétrica (motor alto rendimento).

E_P = consumo de energia elétrica (motor padrão).

f = frequência.

f_1 = frequência da fundamental.

f_{h-h} = frequência harmônica de ordem h .

h = ordem dos harmônicos ímpares, não incluindo os divisíveis por 3.

I_1 = intensidade de corrente elétrica (motor novo).

I_2 = intensidade de corrente elétrica (motor antigo).

I_L = intensidade de corrente de linha.

I_N = intensidade de corrente nominal.

J_t = momento de inércia total.

K_{FC} = coeficiente que depende das propriedades do material (perdas Foucault).

K_H = coeficiente que depende das propriedades do material (perdas por Histerese).

L_{AV} = perdas por atrito e ventilação.

L_{CU1} = perdas no enrolamento do estator em carga.

L_{CU2} = perdas no rotor em carga.

L_{FC} = perdas Foucault.

L_{FE} = perdas no ferro.

L_H = perdas por Histerese.

L_{SC} = perdas suplementares em carga.

n = rotação.

n_1 = rotação (motor antigo).

n_2 = rotação (motor novo).

n_{AR} = rotação (motor alto rendimento).

n_{as} = rotação assíncrona.

n_c = rotação da carga.

n_p = rotação (motor padrão).

n_s = rotação síncrona.

O_h = ordem harmônica.

P = potência ativa.

P_{AR} = potência ativa (motor alto rendimento).

P_m = potência mecânica.

P_{m1} = potência mecânica (Situação 1).

P_{m2} = potência mecânica (Situação 2).

P_{mAR} = potência mecânica (motor alto rendimento).

P_{mP} = potência mecânica (motor padrão).

P_n = potência nominal.

P_P = potência ativa (motor padrão).

s = escorregamento.

t = tempo.

t_a = tempo de aceleração.

t_{AR} = tempo de funcionamento (motor alto rendimento).

t_P = tempo de funcionamento (motor padrão).

TD = percentual da tensão desbalanceada.

T_M = tensão média das linhas AB, BC e CA.

TM_D = tensão máxima desviada em relação à tensão média.

U = tensão.

U_{AB1} = valor da componente simétrica de tensão de sequência positiva.

U_{AB2} = valor da componente simétrica de tensão de sequência negativa.

U_h = tensão do enésimo harmônico.

U_L = tensão de linha.

V = volume.

η = rendimento.

$\eta_{\%}$ = rendimento percentual.

η_1 = rendimento (Situação 1).

η_2 = rendimento (Situação 2).

ω = velocidade angular.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EM SISTEMAS MOTRIZES	5
2.1. SELEÇÃO DAS EMPRESAS.....	5
2.1.1. INTRODUÇÃO	5
2.1.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS	6
2.2. ANÁLISE DOS DADOS.....	9
2.2.1. EMPRESA 1	9
2.2.2. EMPRESA 2	10
2.2.3. EMPRESA 3	11
2.2.4. EMPRESA 4	12
2.2.5. EMPRESA 5	13
CAPÍTULO 3 – MOTOR ELÉTRICO	15
3.1. INTRODUÇÃO.....	15
3.2. CLASSIFICAÇÃO	17
3.2.1. MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA.....	17
3.2.2. MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA.....	18
3.3. MOTOR TRIFÁSICO DE INDUÇÃO COM ROTOR DE GAIOLA.....	20
3.3.1. PRINCIPAIS PERDAS.....	20
3.4. MOTOR DE ALTO RENDIMENTO.....	23
3.4.1. FATOR DE SERVIÇO	26
3.5. TIPOS DE PARTIDA	27
3.5.1. PARTIDA DIRETA	27
3.5.2. PARTIDA ESTRELA - TRIÂNGULO	28
3.5.3. PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA	29
3.5.4. PARTIDA SOFT-STARTER.....	31
3.5.5. CONVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	32
3.6. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	33
3.6.1. AMPLITUDE DA TENSÃO	33
3.6.2. AFUNDAMENTO DE TENSÃO (SAG).....	34
3.6.3. ELEVÇÃO MOMENTÂNEA DE TENSÃO (SWELL)	34
3.6.4. SOBRETENSÃO E SUBTENSÃO	34
3.6.5. DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO	36
3.6.6. HARMÔNICOS	40
3.7. SISTEMA MECÂNICO	43
3.7.1. CARACTERÍSTICAS DE CONJUGADO E ROTAÇÃO	43
3.7.2. CONJUGADO RESISTENTE E ROTAÇÃO PARA DIVERSOS TIPOS DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS ..	44
3.7.3. TIPOS DE CONJUGADO DOS MOTORES ELÉTRICOS	48
3.7.4. PONTO DE FUNCIONAMENTO	51
3.7.5. ACELERAÇÃO.....	52
3.7.6. TEMPO DE ACELERAÇÃO - MÉTODO GRÁFICO	53
3.7.7. TEMPO DE ACELERAÇÃO - MÉTODO SIMPLIFICADO (LOBOSCO; DIAS, 1988).	55
CAPÍTULO 4 – MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DE PERFORMANCE	57
4.1. PROTOCOLO INTERNACIONAL PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DE PERFORMANCE	57
4.1.1. INTRODUÇÃO	57

4.1.2. IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM FINANCIAMENTOS DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	59
4.1.3. RISCOS DE FINANCIAMENTOS DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	59
4.1.4. CONTRATO DE DESEMPENHO	60
4.1.5. ABORDAGEM BÁSICA	61
4.1.6. ETAPAS PARA DETERMINAÇÃO DAS ECONOMIAS	61
4.1.7. METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO	62
4.1.8. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO	63
CAPÍTULO 5 – METODOLOGIAS EXISTENTES	65
5.1. INTRODUÇÃO	65
5.2. METODOLOGIA BD MOTOR	65
5.2.1. INTRODUÇÃO	65
5.2.2. PARÂMETROS DO BD MOTOR	66
5.2.5. CRITÉRIOS DE ANÁLISE	78
5.2.6. ANÁLISE ECONÔMICA	79
5.3. METODOLOGIA CONVENCIONAL	81
5.4. METODOLOGIA MARK IV	85
5.4.1. INTRODUÇÃO	85
5.4.2. FUNCIONAMENTO	87
5.4.3. RESULTADOS	90
5.4.4. CADASTRO DE NOVOS MOTORES	91
5.4.5. ANÁLISE ECONÔMICA	91
5.5. METODOLOGIA MOTOR MASTER	92
5.5.1. INTRODUÇÃO	92
5.5.2. FUNCIONAMENTO	92
5.5.3. ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA	96
CAPÍTULO 6 – ENSAIOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS	98
6.1. INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA	98
6.2. ENSAIOS REALIZADOS	101
6.3. ENSAIOS E NORMAS TÉCNICAS PARA MOTORES ELÉTRICOS	104
6.4. APRESENTAÇÃO DOS DADOS DISPONIBILIZADOS	106
6.4.1. RELATÓRIO N. 01	106
6.4.2. RELATÓRIO N. 02	115
6.4.3. RELATÓRIO N. 03	117
6.4.4. RELATÓRIO N. 04	119
6.4.5. RELATÓRIO N. 05	121
6.4.6. RELATÓRIO N. 06	123
6.5. SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS DISPONIBILIZADOS	126
CAPÍTULO 7 – METODOLOGIA MHmit	129
7.1. INTRODUÇÃO	129
7.2. DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO	132
7.2.1. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR ELÉTRICO ANTIGO EM FUNCIONAMENTO QUANDO COMPARADO AO SEU ESTADO NOVO	132
7.2.2. IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO	144
7.3. MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	147
7.3.1. INTRODUÇÃO	147
7.3.2. ETAPAS PARA MEDIÇÃO	148

7.3.3. COLETA DE DADOS DOS ACIONAMENTOS	150
7.3.4. ETAPAS PARA VERIFICAÇÃO	151
7.4. APLICATIVO MHmit	152
7.4.1. INTRODUÇÃO	152
A seguir, serão apresentados os módulos que compõem o aplicativo MHmit.	153
7.4.2. MÓDULO DE CADASTRO DO CLIENTE	153
7.4.3. IDENTIFICAÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO ORIGINALMENTE INSTALADO	153
7.4.4. CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	155
7.4.5. MÓDULO DE ENTRADA DE DADOS – MEDIÇÃO	155
7.4.6. MÓDULO DE ENTRADA DE TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA	156
7.4.7. MÓDULO PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO A PLENA CARGA DO MOTOR ELÉTRICO ORIGINALMENTE INSTALADO	157
7.4.8. MÓDULO DE REDIMENSIONAMENTO MOTRIZ	158
7.4.9. MÓDULO DE ENTRADA DE DADOS – VERIFICAÇÃO	159
7.4.10. MÓDULO DE ANÁLISE ECONÔMICA	160
7.4.11. MÓDULO DE AVALIAÇÃO DE DESVIOS	160
7.4.12. MÓDULO DE CADASTRO DE FOTOS	161
7.4.13. BANCO DE DADOS	162
7.4.14. RELATÓRIO EXECUTIVO	163
CAPÍTULO 8 - ESTUDO DE CASO	164
8.1. INTRODUÇÃO	164
8.2. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	164
8.2.1. METODOLOGIA BD MOTOR	165
8.2.2. METODOLOGIA MARK IV	167
8.2.3. METODOLOGIA CONVENCIONAL	170
8.2.4. METODOLOGIA MOTOR MASTER	171
8.2.5. METODOLOGIA MHmit	174
8.3. ESTUDOS PARA SUBSTITUIÇÃO DO MOTOR ORIGINAL	176
8.3.1. METODOLOGIA CONVENCIONAL	176
8.3.2. METODOLOGIA BD MOTOR	178
8.3.3. METODOLOGIA MOTOR MASTER	181
8.3.4. METODOLOGIA MHmit	183
8.4. SUBSTITUIÇÃO POR MOTOR DE ALTO RENDIMENTO	184
CAPÍTULO 9 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ..	186
9.1. INTRODUÇÃO	186
9.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS	187
9.3. ANÁLISE ECONÔMICA	189
9.4. SUBSTITUIÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS	190
CAPÍTULO 10 – CONCLUSÕES	194
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
ANEXO A - EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	204
A.1. INTRODUÇÃO	204
A.2. SEGURANÇA NAS MEDIÇÕES ELÉTRICAS	205
A.3. ANALISADOR DE POTÊNCIA E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA FLUKE 43B	206
A.4. ANALISADOR DE POTÊNCIA E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA FLUKE 434	212
A.5. ANALISADOR MARH-21 (993)	218

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O conceito de conservação de energia pode ser apresentado pela realização do mesmo trabalho ou quantidade de produtos produzidos com menor consumo.

Esta pode ser obtida pelo uso racional e diminuição dos desperdícios, aumento da eficiência energética de equipamentos, correta instalação e operação dos mesmos e gerenciamento energético de todo o sistema.

A eficiência energética é um conjunto de políticas e ações que tem por objetivo a redução dos custos da energia efetivamente utilizada ou ainda, o aumento da quantidade de energia oferecida sem aumento de geração (AUGUSTO JR, 2001).

Em todo o mundo, o setor que mais consome energia elétrica é o industrial. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE¹, em 2007 o Brasil apresentou o consumo de energia elétrica de 376,90 TWh.

A Figura 1.1 apresenta a participação percentual de cada setor no consumo de energia elétrica (EPE, 2008).

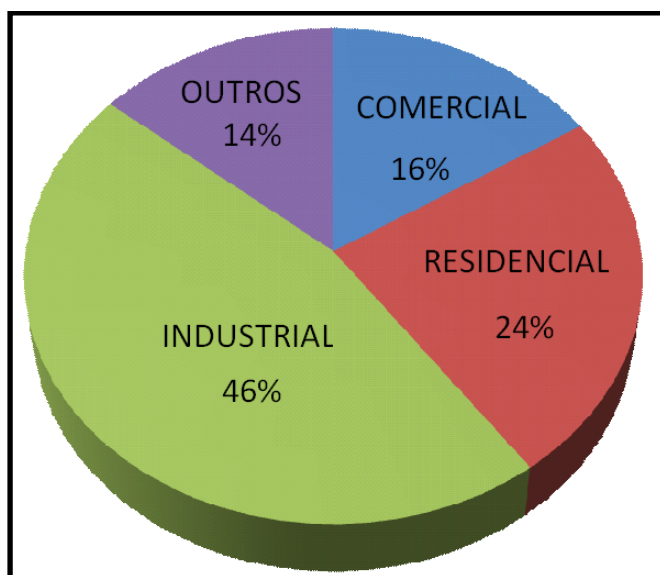


Figura 1.1 - Consumo de energia elétrica por setor no Brasil.

Fonte: (EPE, 2008).

¹ A Empresa de Pesquisa Energética tem por objetivo prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético. Sua página na internet pode ser acessada em: www.epe.gov.br

Desta maneira, o gerenciamento e a conservação de energia elétrica na indústria desempenham um papel cada vez mais importante no planejamento do setor elétrico brasileiro, pois os custos dos projetos para conservar energia são significativamente inferiores que os custos de expansão do sistema elétrico, bem como o tempo de retorno do investimento e o prazo de maturação dos projetos.

De acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, não somente pelas dificuldades encontradas na obtenção de novos investimentos (governamentais ou privados) para ampliação do setor elétrico, mas também pelos impactos ambientais que proporcionam, a conservação de energia elétrica torna-se cada vez mais um fator essencial. O PROCEL (2008) tem por objetivo a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica para que se eliminem os desperdícios e se reduzam os custos e os investimentos setoriais.

Neste contexto, por meio da criação da série de Normas ISO 14.000² surge um padrão de referência internacional no tocante às perspectivas de ações ambientalmente corretas. Essa série de Normas é um importante agente acelerador quanto às medidas que visam a preservação do meio ambiente e desenvolvimento sustentável. Neste caso, as questões de eficiência energética são extremamente importantes, pois se faz necessário políticas energéticas eficazes que combinadas às novas descobertas científicas, apresentam flexibilidade e coerência, envolvendo os setores públicos e privados.

Porém, observam-se em muitas indústrias, grandes desperdícios de energia elétrica, devido à utilização de equipamentos e processos energeticamente deficientes, que sobreviveram a um mercado internacionalmente fechado, mas que necessitam urgentemente de estudos voltados a substituições, modificações e atualizações, de forma a reduzirem seus custos internos e se tornarem mais competitivas.

Desta forma, estimar as perdas no motor elétrico de indução trifásico com rotor em gaiola é de extrema importância para a verificação de sua eficiência, objeto desta tese, que apresenta uma metodologia específica para a determinação indireta do rendimento do motor elétrico a plena carga.

² É o conjunto de Normas por meio das quais empresas ou interessados se autodeclaram em conformidade ou buscam certificação junto a terceiros. A ISO 14.000 descreve os requisitos de um sistema de gestão ambiental.

As etapas deste trabalho são apresentadas a seguir:

Primeiramente, selecionaram-se empresas de prestação de serviços na área de eficiência energética em sistemas motrizes, com o objetivo de se avaliar os resultados apresentados no tocante aos serviços prestados de eficiência energética em sistemas motrizes. Isto, devido à necessidade de se conhecer as principais dificuldades que essas empresas apresentaram em campo, antes, durante e após as substituições dos motores.

Os inúmeros dados de medições elétricas, gentilmente cedidos por empresas nacionais, foram de extrema importância para se avaliar os principais desafios enfrentados por estas, face à determinação do rendimento do motor elétrico de indução trifásico com rotor em gaiola, no seu ponto de funcionamento, em diversas aplicações industriais. Com esses dados, determinaram-se os desvios percentuais entre os valores previstos, antes das substituições dos motores, e reais, após as substituições³. Esses desvios foram comparados com os valores teóricos de economia de energia elétrica devido à substituição de motores do tipo padrão, por de alto rendimento, contidos na Norma NEMA MG1 (1998) e ELETROBRÁS (2003).

Em seguida, apresentam-se as metodologias disponíveis nos mercados nacional e internacional, que auxiliam o usuário na determinação do rendimento do motor elétrico, bem como nos estudos de viabilidade econômica. Dentre essas, destacam-se a metodologia que utiliza curvas de parâmetros dos motores elétricos, o programa BD Motor do PROCEL e o programa Motor Master, do Departamento de Energia Norte-Americano.

O pré-diagnóstico foi realizado no segmento industrial alimentício, em equipamentos de utilidades como ventiladores, bombas e exaustores. Isto, pois muitos desses acionamentos possuem um número de horas de funcionamento por ano satisfatório, no tocante a viabilidade econômica das substituições. Todas as etapas para o levantamento dos dados de medição, como condições de operação dos acionamentos, equipamentos analisadores de potência e qualidade de energia elétrica, segurança em instalações e serviços em eletricidade e análise dos valores obtidos, também serão apresentadas neste trabalho.

³ Substituições de motores do tipo padrão por de alto rendimento.

A metodologia desenvolvida neste trabalho, denominada MHmit, específica para a determinação dos parâmetros do motor elétrico de indução trifásico com rotor em gaiola a plena carga, tem por objetivo apresentar as etapas necessárias para a obtenção do valor do rendimento do motor elétrico. Essa metodologia foi desenvolvida a partir de dados coletados por meio de ensaios de motores elétricos do ano de 1979 até 2009 para motores da Marca WEG.

As substituições contemplaram motores do tipo padrão por de alto rendimento, de diversas potências, acoplados a equipamentos de utilidades. Os investimentos para a aquisição dos motores foram realizados a partir de Programas de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL⁴. Após a substituição dos motores, novas medições de parâmetros elétricos foram realizadas para a determinação dos desvios percentuais entre as metodologias apresentadas e desenvolvida.

Todos os valores previstos (antes das substituições), bem como os valores reais (medições após as substituições) foram avaliados, a fim de se validar a metodologia desenvolvida neste trabalho.

Por fim, será apresentado o aplicativo MHmit, que auxiliará o usuário no tocante à determinação do rendimento do motor elétrico, seleção de um novo motor, estudos de redimensionamento motriz e viabilidade econômica.

⁴ Criada em 1996, a ANEEL tem como atribuições regular e fiscalizar a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, atendendo reclamações de agentes e consumidores com equilíbrio entre as partes em benefício da sociedade. Sua página na internet pode ser acessada em: www.aneel.gov.br.

CAPÍTULO 2 - DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EM SISTEMAS MOTRIZES

O Diagnóstico Energético tem por objetivo proporcionar a redução de custos com energia elétrica, tanto pela redução da demanda contratada, quanto pela redução do consumo.

Sendo o motor elétrico um equipamento de uso final de forte presença industrial, é passível de novas substituições, trazendo resultados satisfatórios, quando o diagnóstico for realizado de forma consistente e seguindo procedimentos coerentes para sua validação.

Desta maneira, foi necessária a avaliação de diagnósticos energéticos realizados por empresas que visam à conservação de energia elétrica em sistemas motrizes no âmbito industrial brasileiro, para que estes dados pudessem contribuir no desenvolvimento da metodologia proposta nesta tese.

2.1. SELEÇÃO DAS EMPRESAS

2.1.1. INTRODUÇÃO

No Brasil, existem inúmeras empresas que prestam serviços de consultoria na área de conservação de energia (ESCO⁵), que diariamente realizam diagnósticos energéticos em sistemas motrizes, iluminação, aquecimento, entre outros. Dessa forma, tomou-se o devido cuidado no processo de seleção das empresas, contatando-se algumas indústrias para a averiguação da satisfação do cliente no tocante aos serviços prestados e resultados obtidos.

Alguns Programas de Eficiência Energética da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica que possuem a participação dessas empresas, também foram analisados.

Porém, dentre as empresas escolhidas, selecionaram-se algumas medições que apresentaram resultados não condizentes com o esperado, ou seja, motores elétricos do tipo padrão que foram substituídos por motores de alto rendimento, apresentando maior consumo de energia elétrica.

⁵ *Energy Service Company.*

2.1.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Os dados de medições (potência elétrica ativa trifásica) fornecidos pelas empresas que prestam serviços de conservação de energia serão apresentados a seguir, para 266 substituições realizadas. Estes abrangem alguns segmentos industriais, onde a seleção das medições foi limitada apenas para equipamentos de utilidades, ou seja, bombas, compressores e exaustores.

Deve-se salientar também que as substituições selecionadas compreendem originalmente um motor elétrico trifásico com rotor em gaiola do tipo padrão, cuja troca foi feita por um motor de alto rendimento, com o objetivo de se comparar estes dados de medições com os valores apresentados pela Norma NEMA MG1 (1998) e ELETROBRÁS (2003), onde a substituição de motores do tipo padrão por de alto rendimento pode apresentar economias de 2 a 6%, teoricamente.

A Tabela 2.1 apresenta os dados selecionados da Empresa 1, cuja substituição de 76 motores do tipo padrão por de alto rendimento da marca WEG, foi realizada no ano de 2005 em uma unidade industrial localizada na cidade de Campinas – SP.

Esses dados compreendem motores com potência de 20 a 250 cv, onde a coluna "Motor Original" se refere ao motor anteriormente instalado e a coluna "Motor Atual" se refere ao motor substituído. Para alguns casos, foram selecionados motores de mesma potência nominal, com o intuito de comparar os valores apresentados.

Tabela 2.1 - Dados fornecidos pela Empresa 1

Potência [cv]	Motor Original [kW]	Motor Atual [kW]
20	17,52	17,02
20	16,39	15,94
20	16,48	15,99
30	26,22	25,67
30	25,83	25,22
30	24,26	23,73
40	32,39	31,63
40	21,90	21,27
40	32,29	31,53
50	39,91	39,51
60	16,29	15,75
75	59,68	59,09
75	59,55	58,48
100	79,05	78,38
150	120,00	116,24
200	109,00	105,84
200	170,10	167,09
200	150,00	146,83
200	119,57	116,21
200	104,70	101,57
250	159,00	155,00

A Tabela 2.2 apresenta os dados selecionados da Empresa 2, cuja substituição de 70 motores do tipo padrão por de alto rendimento da marca WEG, foi realizada no ano de 2005 em uma unidade industrial localizada na cidade de São Paulo – SP.

Tabela 2.2 - Dados fornecidos pela Empresa 2

Potência [cv]	Motor Original [kW]	Motor Atual [kW]
12,5	10,00	9,48
15	9,30	9,00
15	12,00	11,73
20	15,69	15,28
20	12,57	12,29
25	9,24	8,94
25	13,32	12,92
25	18,24	17,73
25	5,10	4,85
40	25,00	24,27
40	28,56	27,82
40	23,25	22,52
40	35,70	34,98
40	15,72	15,07
50	16,83	16,37
50	26,85	26,37
60	25,65	24,75
75	47,40	46,14
100	30,60	29,50
100	60,30	58,87
100	80,10	78,45
125	53,40	51,35
150	118,00	114,29
200	110,40	107,24

A Tabela 2.3 apresenta os dados selecionados da Empresa 3, cuja substituição de 30 motores do tipo padrão por de alto rendimento da marca WEG, foi realizada no ano de 2004 em uma unidade industrial localizada na cidade de Araras – SP.

Tabela 2.3 - Dados fornecidos pela Empresa 3

Potência [cv]	Motor Original [kW]	Motor Atual [kW]
40	12,60	11,81
50	25,40	25,64
60	37,00	34,10
60	35,30	34,00
75	58,00	57,64
75	56,00	55,45
75	43,80	43,00
75	37,00	38,05
100	64,00	61,17
125	80,00	77,00
150	43,00	36,17
150	86,00	83,00
200	115,00	108,45
200	64,00	58,18
250	118,00	103,00

A Tabela 2.4 apresenta os dados selecionados da Empresa 4, cuja substituição de 40 motores do tipo padrão por de alto rendimento da marca WEG, foi realizada no ano de 2004 em uma unidade industrial localizada na cidade de Araçatuba – SP.

Tabela 2.4 - Dados fornecidos pela Empresa 4

Potência [cv]	Motor Original [kW]	Motor Atual [kW]
30	17,88	9,13
40	31,02	29,62
40	28,73	31,90
50	23,50	25,05
50	32,41	29,51
60	37,50	32,99
100	66,90	64,42
100	66,22	55,81
125	63,25	74,34
125	98,00	76,18
150	106,00	106,36
150	102,85	99,49
175	93,15	86,31

A Tabela 2.5 apresenta os dados selecionados da Empresa 5, cuja substituição de 50 motores do tipo padrão por de alto rendimento da marca WEG, foi realizada no ano de 2005 em uma unidade industrial localizada na cidade de São José do Rio Pardo – SP.

Tabela 2.5 - Dados fornecidos pela Empresa 5

Potência [cv]	Motor Original [kW]	Motor Atual [kW]
1,5	0,73	0,60
3	2,52	1,62
6	2,10	2,98
6	2,22	1,45
7,5	2,10	2,35
7,5	3,15	2,14
10	5,30	4,90
15	11,61	9,70
15	9,00	7,10
15	7,38	7,70
20	11,02	10,20
20	10,70	10,30
25	15,60	2,80
40	9,30	8,90
100	70,60	69,00
175	50,34	48,50
250	67,20	64,00

2.2. ANÁLISE DOS DADOS

2.2.1. EMPRESA 1

Para a Empresa 1, foram selecionados 21 casos. Como se pode observar, 16 casos (76%) apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os ganhos teóricos de 2 a 6%.

Porém, 5 casos (24%) apresentaram resultados de economia de energia com valores inferiores ao esperado.

A Figura 2.1 apresenta o comparativo entre as economias de energia elétrica obtidas pela Empresa 1 e os valores esperados.

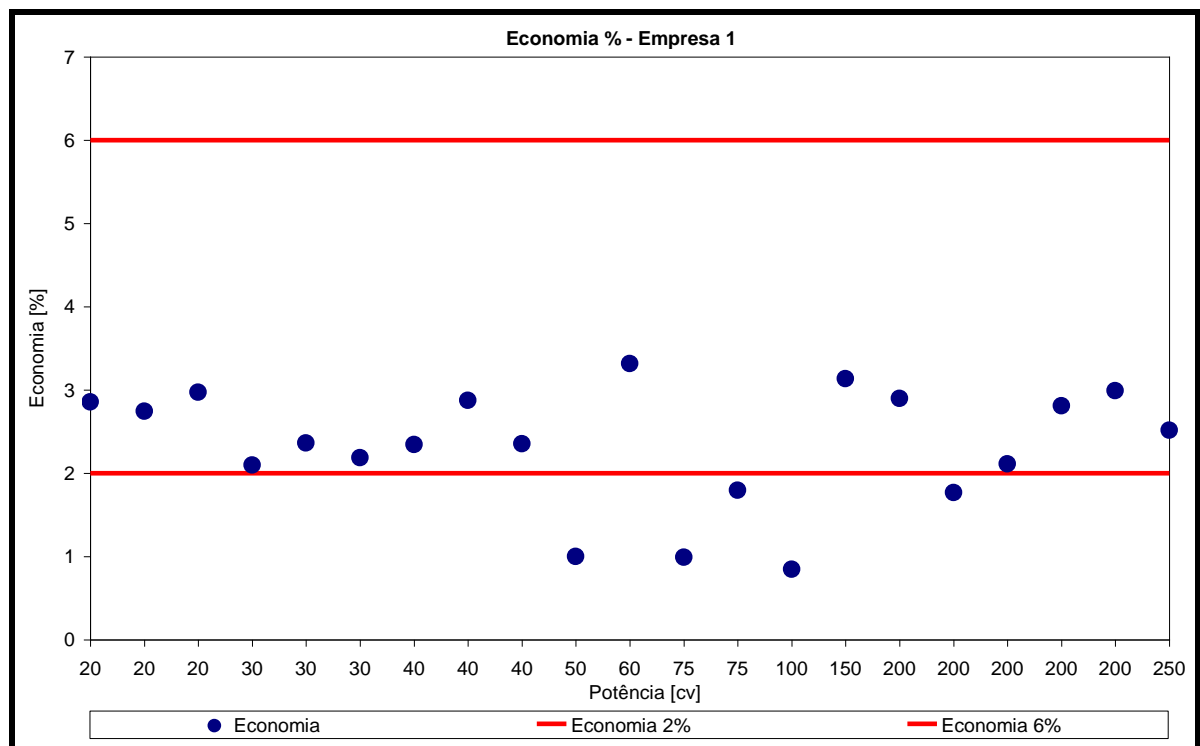


Figura 2.1 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 1.

A Tabela 2.6 apresenta a análise estatística dos dados da Empresa 1.

Tabela 2.6 - Análise estatística dos dados da Empresa 1.

ECONOMIA %	
Máximo	3,31
Mínimo	0,85
Média	2,33
Desvio Padrão	0,72

2.2.2. EMPRESA 2

Para a Empresa 2 foram selecionados 24 casos. Dentre esses, 23 casos (96%) apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os ganhos teóricos apresentados anteriormente.

Apenas 1 caso (4%) apresentou resultado de economia de energia elétrica com valor inferior ao esperado.

A Figura 2.2 apresenta o comparativo entre as economias de energia elétrica obtidas pela Empresa 2 e os valores esperados.

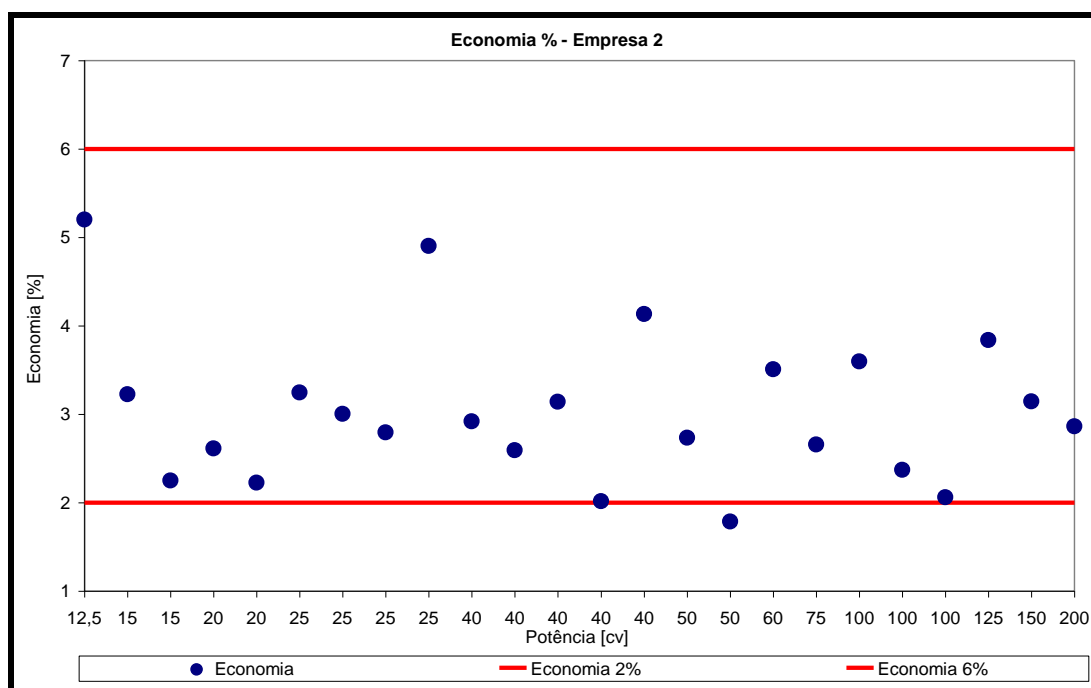


Figura 2.2 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 2.

A Tabela 2.7 apresenta a análise estatística dos dados da Empresa 2.

Tabela 2.7 - Análise estatística dos dados da Empresa 2.

ECONOMIA %	
Máximo	5,20
Mínimo	1,79
Média	3,03
Desvio Padrão	0,85

2.2.3. EMPRESA 3

Para a Empresa 3 foram selecionados 15 casos. Desses, 5 casos (33%) apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os ganhos teóricos apresentados anteriormente.

Porém, 10 casos (67%) apresentaram resultados de economia de energia com valores diferentes aos esperados.

Como se pode observar, uma substituição resultou em economia superior a 15%, enquanto outra resultou em consumo maior de energia elétrica de 2,84%.

A Figura 2.3 apresenta o comparativo entre as economias de energia elétrica obtidas pela Empresa 3 e os valores esperados.

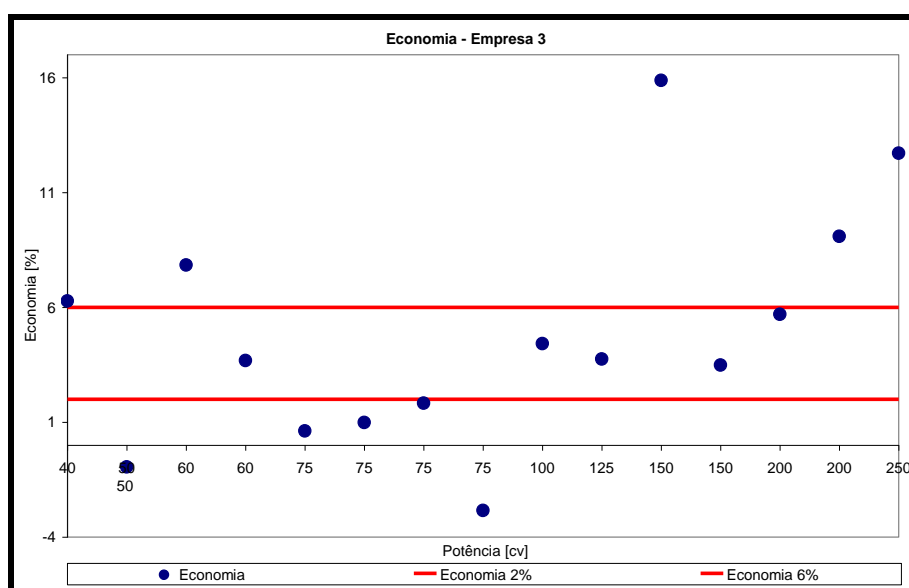


Figura 2.3 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 3.

A Tabela 2.8 apresenta a análise estatística dos dados da Empresa 3.

Tabela 2.8 - Análise estatística dos dados da Empresa 3.

ECONOMIA %	
Máximo	15,88
Mínimo	-2,84
Média	4,83
Desvio Padrão	5,02

2.2.4. EMPRESA 4

Para a Empresa 4 foram selecionados 13 casos. Desses, apenas 3 (23%) apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os ganhos teóricos.

Entretanto, 10 casos (77%) apresentaram resultados de economia de energia elétrica com valores diferentes aos esperados.

Como se pode observar, um caso apresentou economia de 48,94% devido à substituição motriz, enquanto que outro caso apresentou um aumento no consumo de 17,53%.

A Figura 2.4 apresenta o comparativo entre as economias de energia elétrica obtidas pela Empresa 4 e os valores esperados.

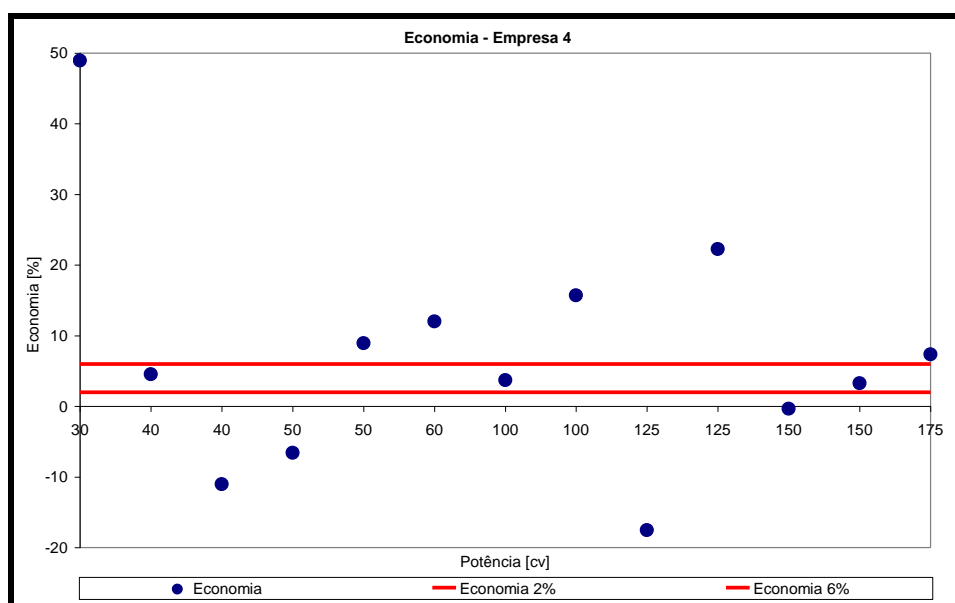


Figura 2.4 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 4.

A Tabela 2.9 apresenta a análise estatística dos dados da Empresa 4.

Tabela 2.9 - Análise estatística dos dados da Empresa 4.

ECONOMIA %	
Máximo	48,94
Mínimo	-17,53
Média	7,02
Desvio Padrão	16,57

2.2.5. EMPRESA 5

Para a Empresa 5 foram selecionados 17 casos. Desses, 5 (29%) apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os ganhos teóricos.

O restante, compreendido em 12 casos (71%), apresentou resultados de economia de energia elétrica com valores diferentes aos esperados.

Como se pode notar, vários casos resultaram em economias superiores a 20%, dentre eles, um caso em especial com economia de 82,05%.

De forma contrária, alguns casos apresentaram um aumento no consumo de energia elétrica devido à substituição motriz. Um caso em especial resultou num aumento de 41,90%.

A Figura 2.5 apresenta o comparativo entre as economias de energia elétrica obtidas pela Empresa 5 e os valores esperados.

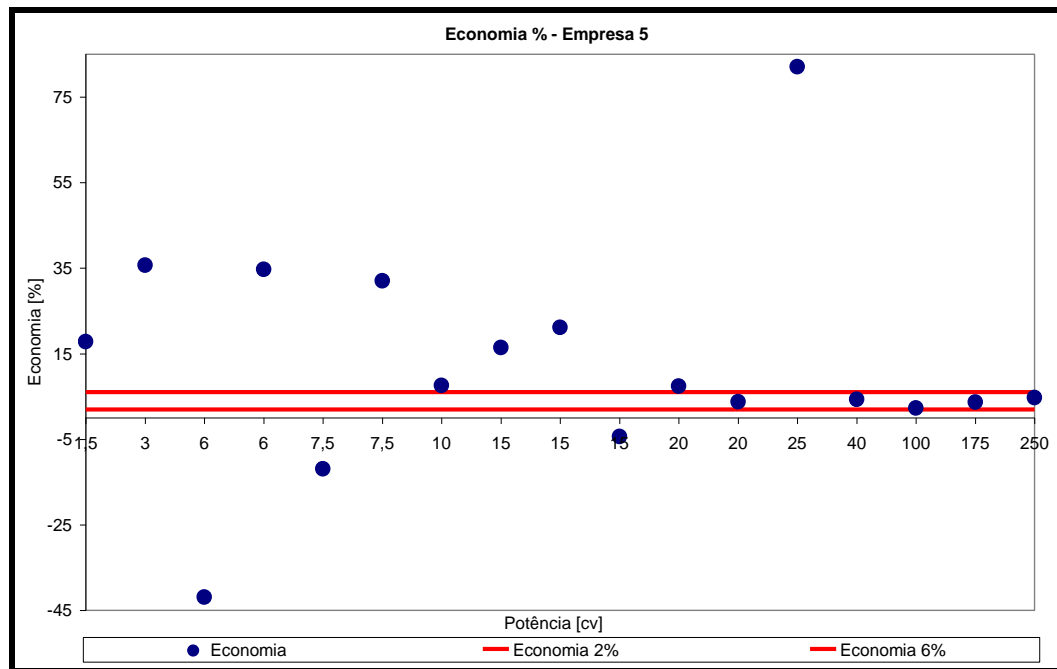


Figura 2.5 - Comparativo entre as economias de energia elétrica e os valores esperados para a Empresa 5.

A Tabela 2.10 apresenta a análise estatística dos dados da Empresa 5.

Tabela 2.10 - Análise estatística dos dados da Empresa 5.

ECONOMIA %	
Máximo	82,05
Mínimo	-41,90
Média	12,67
Desvio Padrão	25,79

CAPÍTULO 3 – MOTOR ELÉTRICO

3.1. INTRODUÇÃO

Desde o descobrimento do campo girante por Nicola Tesla em 1887, os motores elétricos possuem uma longa história de desenvolvimento.

Com objetivo de se obter potência e conjugado para atender diversos tipos e condições de cargas, e posteriormente na competição dos mercados, o desenvolvimento tecnológico produziu motores com menores quantidades de materiais e de custos reduzidos (AUGUSTO JR, 2001).

O motor elétrico, conversor eletromecânico desenvolvido por Dolivo Dobrovolsky em 1890, veio ao longo dos anos sofrendo inúmeras transformações devido ao desenvolvimento de materiais com melhores propriedades magnéticas, novos isolantes elétricos e sistemas de ventilação mais eficientes (KUHLMANN, 1950).

No ano de 1891, o motor elétrico possuía uma relação de massa/potência de 88 kg/kW. Já em 1984, possuía 6,8 kg/kW.

Atualmente, os novos motores visam à eficiência energética, contribuindo na economia de energia elétrica. Para isto, são necessárias algumas modificações em seu projeto. Desta maneira, o aumento da eficiência tem como consequência um motor com maior relação massa/potência. A Figura 3.1 apresenta a relação massa/potência de um motor elétrico ao longo dos anos (ELETROBRÁS, 2003).

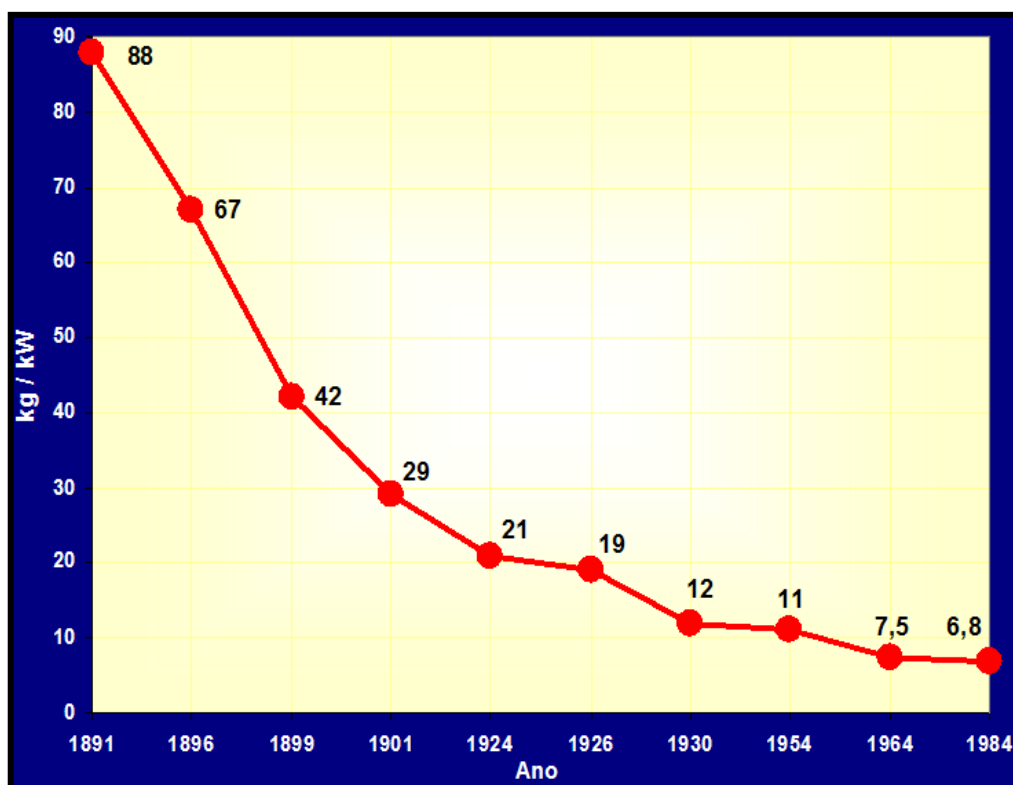


Figura 3.1 - Relação massa / potência de um motor elétrico ao longo dos anos.

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2003).

O setor industrial representa 46% do consumo de energia elétrica no País. Deste percentual, 55% devido à utilização de motores elétricos. A Figura 3.2 apresenta essa situação (WEG, 2009).

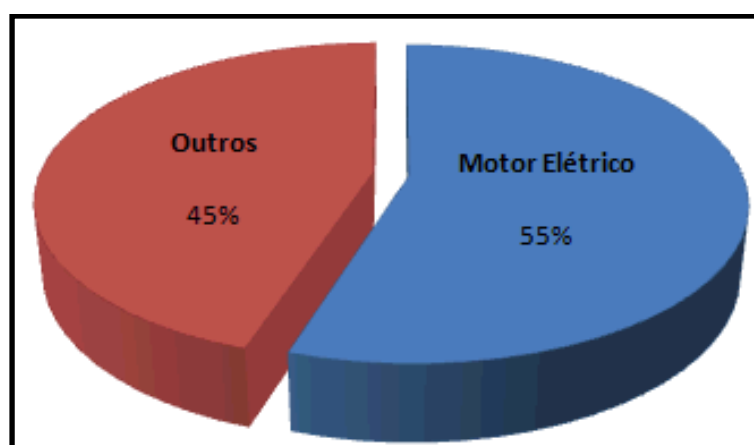


Figura 3.2 - Participação percentual dos motores elétricos no ambiente industrial brasileiro.

Fonte: Adaptado de (WEG, 2009).

Do total de motores elétricos instalados, 25% são responsáveis pelo acionamento de compressores, 22% pelo acionamento de bombas, 16% pelo acionamento de ventiladores e 2% pelo acionamento de correias transportadoras. A Figura 3.3 apresenta a participação dos motores elétricos nos acionamentos industriais (WEG, 2009).

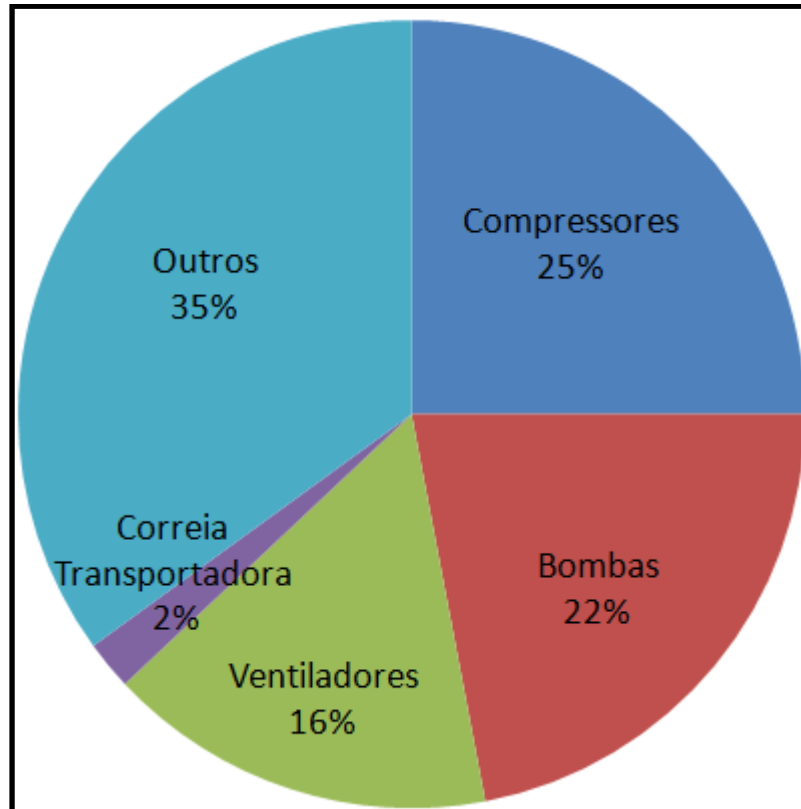


Figura 3.3 - Participação dos motores elétricos nos acionamentos industriais.

Fonte: Adaptado de (WEG, 2009).

3.2. CLASSIFICAÇÃO

Os motores elétricos são divididos em dois grandes grupos: motores de corrente contínua e motores de corrente alternada.

3.2.1. MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

Os motores de corrente contínua são utilizados na indústria quando se faz necessário um controle fino da velocidade em determinado processo. São divididos em:

- **Motor série:** onde a corrente de carga também é utilizada como corrente de excitação, sendo que as bobinas de campo são ligadas em série com as bobinas do induzido.
- **Motor em derivação:** onde o campo está diretamente ligado à fonte de alimentação e em paralelo com o induzido.
- **Motor composto:** onde o campo é constituído de duas bobinas, uma ligada em série e outra em paralelo com o induzido. Este motor acumula as vantagens do motor série e em derivação, pois seu conjugado de partida é elevado e possui velocidade praticamente constante no acionamento de cargas variáveis (FITZGERALD *et al*, 1991).

3.2.2. MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA

Os motores de corrente alternada são utilizados na maioria das aplicações industriais. Possuem construção simples e custos de manutenção reduzidos, quando comparados aos motores de corrente contínua. São divididos em síncronos ou assíncronos.

Os motores síncronos são de pequena utilização na indústria. Funcionam aplicando-se uma tensão alternada no estator e uma tensão contínua no rotor, por meio de anéis coletores (BROWN, 1927).

Se a corrente de excitação possuir um valor reduzido, a força eletromotriz induzida também será de valor reduzido. Neste caso, o estator absorve da rede elétrica determinado valor de potência reativa necessária à formação do seu campo magnético. Neste momento, a corrente está atrasada em relação à tensão da rede (GRAY, 1989).

Aumentando-se o valor da corrente de excitação, a corrente estatórica estará em fase com a tensão da rede de alimentação, significando fator de potência unitário. Aumentando-se ainda mais a corrente de excitação, a corrente do estator ficará adiantada em relação à tensão de alimentação. Neste caso, o motor fornece potência reativa à rede.

Já os motores assíncronos de indução podem ser com rotor bobinado (anéis) ou rotor em gaiola.

O motor assíncrono de anéis é construído com o rotor envolvido por um conjunto de bobinas, normalmente interligadas em configuração estrela, com os terminais conectados a anéis presos ao eixo do motor, porém isolados eletricamente deste e ligados por meio de escovas condutoras a uma resistência trifásica com cursor rotativo. O motor assíncrono de anéis foi muito utilizado em ambientes com exigências de controle adequado à movimentação de cargas (CATHEY, 2001).

O motor assíncrono de indução com rotor de gaiola é o mais empregado atualmente nas indústrias, sendo objeto de estudo desta tese.

A Figura 3.4 apresenta a árvore da família dos motores elétricos, de acordo com Lobosco e Dias (1988).

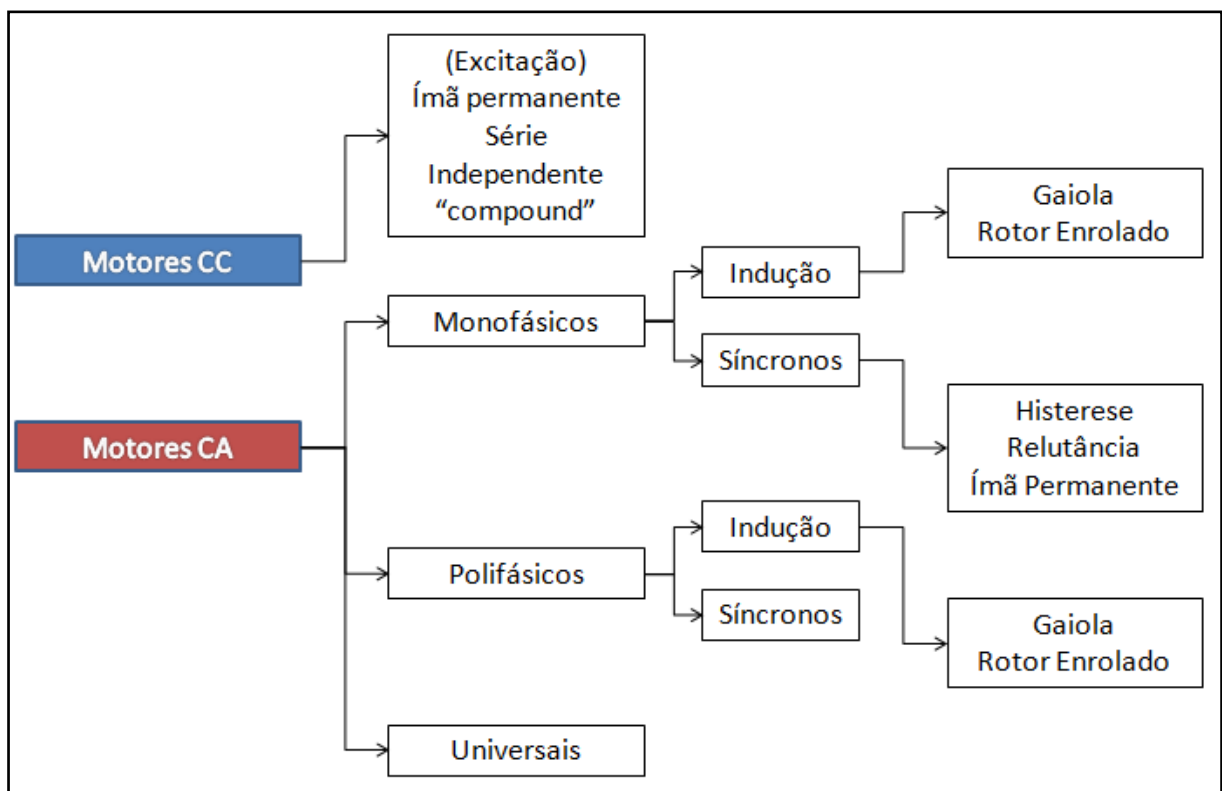


Figura 3.4 - Árvore da Família dos Motores Elétricos.

Fonte: Adaptado de (LOBOSCO; DIAS, 1988).

3.3. MOTOR TRIFÁSICO DE INDUÇÃO COM ROTOR DE GAIOLA

O motor trifásico de indução com rotor de gaiola é o mais empregado atualmente nas indústrias. Seu rotor é formado por um conjunto de barras que são interligadas por meio de anéis condutores, tendo como característica velocidade de operação praticamente constante, variando ligeiramente, conforme o valor da carga solicitado ao eixo (FITZGERALD *et al*, 1991).

O funcionamento deste motor baseia-se no princípio de formação do campo magnético girante, que é produzido no estator devido à passagem de corrente elétrica em suas bobinas, cujo fluxo se desloca em torno do rotor (por efeito de sua variação), gerando neste correntes induzidas que tendem a se opor ao campo girante, sendo no entanto, arrastado por ele (LIWSCHITZ-GARIK, 1946) (EL-HAWARY, 1986).

Para o motor girando em vazio e sem perdas, o rotor teria velocidade bem próxima à síncrona. Entretanto, ao ser aplicado um conjugado externo ao motor, o seu rotor diminui de velocidade na proporção necessária para que a corrente induzida, pela diferença de rotação entre o campo girante e o rotor, passe a produzir um conjugado eletromagnético igual e oposto ao conjugado externamente aplicado. Este conjugado é proporcional ao fluxo produzido pelo campo girante e à corrente e fator de potência do rotor (LOBOSCO; DIAS, 1988) (CATHEY, 2001).

3.3.1. PRINCIPAIS PERDAS

O motor elétrico é um conversor de energia baseado em princípios eletromagnéticos. Desta forma, é impossível que esta conversão seja perfeita, por causa das perdas que ocorrem no interior da máquina (BROWN, 1927).

Devido à tensão aplicada no motor ser do tipo alternada, as correntes que circulam no enrolamento do estator produzem um campo magnético variável no núcleo ferromagnético, ocasionando dois tipos de perdas: Foucault e Histerese.

As perdas Foucault ocorrem devido às correntes induzidas dentro do material magnético, produzindo perdas na forma de calor. Essas perdas podem ser determinadas de acordo com a Equação 3.1 (AUGUSTO JR, 2001).

$$L_{FC} = K_{FC} \cdot f^2 \cdot B_M^2 \cdot e \cdot V \quad (3.1)$$

Onde:

L_{FC} = perdas Foucault [kW].

K_{FC} = coeficiente que depende das propriedades do material.

B_M = indução máxima [Wb/m²].

f = frequência [Hz].

e = espessura da chapa do material magnético que compõe o núcleo [mm].

V = volume [m³].

As perdas por Histerese decorrem da orientação alternada do campo magnético sobre o pacote de lâminas de aço-silício. Estas podem ser determinadas de acordo com a Equação 3.2 (AUGUSTO JR, 2001).

$$L_H = K_H \cdot f \cdot B_M^{n_{ph}} \cdot V \quad (3.2)$$

Onde:

L_H = perdas por Histerese [kW].

K_H = coeficiente que depende das propriedades do material.

B_M = indução máxima [Wb/m²].

f = frequência [Hz].

n_{ph} = expoente para determinação das perdas por histerese.

V = volume [m³].

As perdas por Foucault e Histerese ocorrem tanto no estator como no rotor, sendo que as perdas no ferro podem ser determinadas de acordo com a Equação 3.3 (AUGUSTO JR, 2001).

$$L_{FE} = L_{FC} + L_H \quad (3.3)$$

Onde:

L_{FE} = perdas no ferro [kW].

L_{FC} = perdas Foucault [kW].

L_H = perdas por Histerese [kW].

As perdas mecânicas estão relacionadas com o atrito nos rolamentos, bem como o arraste aerodinâmico e geometria irregular do rotor.

As perdas suplementares ocorrem devido ao efeito pelicular (enrolamentos do estator) e aos campos magnéticos de alta frequência (entreferro).

Por fim, têm-se as perdas Joule, que ocorrem nos enrolamentos do estator e no rotor, resultantes da passagem da corrente elétrica. Essas perdas variam com o quadrado da corrente eficaz (GUILBERT, 1934).

A Tabela 3.1 apresenta as principais perdas em um motor elétrico de indução, segundo ELETROBRÁS (2003).

Tabela 3.1 - Principais perdas em um motor elétrico de indução

PERDAS	[%]
Estator	40,0
Rotor	20,0
Ferro	20,0
Mecânicas	7,5
Suplementares	12,5

Fonte: (ELETROBRÁS, 2003).

3.4. MOTOR DE ALTO RENDIMENTO

Há mais de uma década, os fabricantes de motores elétricos desenvolvem equipamentos mais eficientes, de forma que, além de fabricarem motores do tipo padrão, apresentam também uma linha de produtos denominada alto rendimento.

Aumentando os custos de fabricação, foi possível desenvolver equipamentos mais eficientes (diminuindo as perdas no motor elétrico), de forma que, um motor de alto rendimento gasta menos energia elétrica do que um motor do tipo padrão, para a mesma aplicação industrial, desde que bem dimensionado à carga.

Desta forma, o custo adicional de aquisição é compensado pelo menor custo operacional, sendo que, em muitos casos, o Tempo de Retorno do Investimento possui valor atrativo, considerando que um motor pode durar mais de 12 anos.

A Figura 3.5 apresenta uma comparação entre motores do tipo padrão e alto rendimento (WEG, 2009).

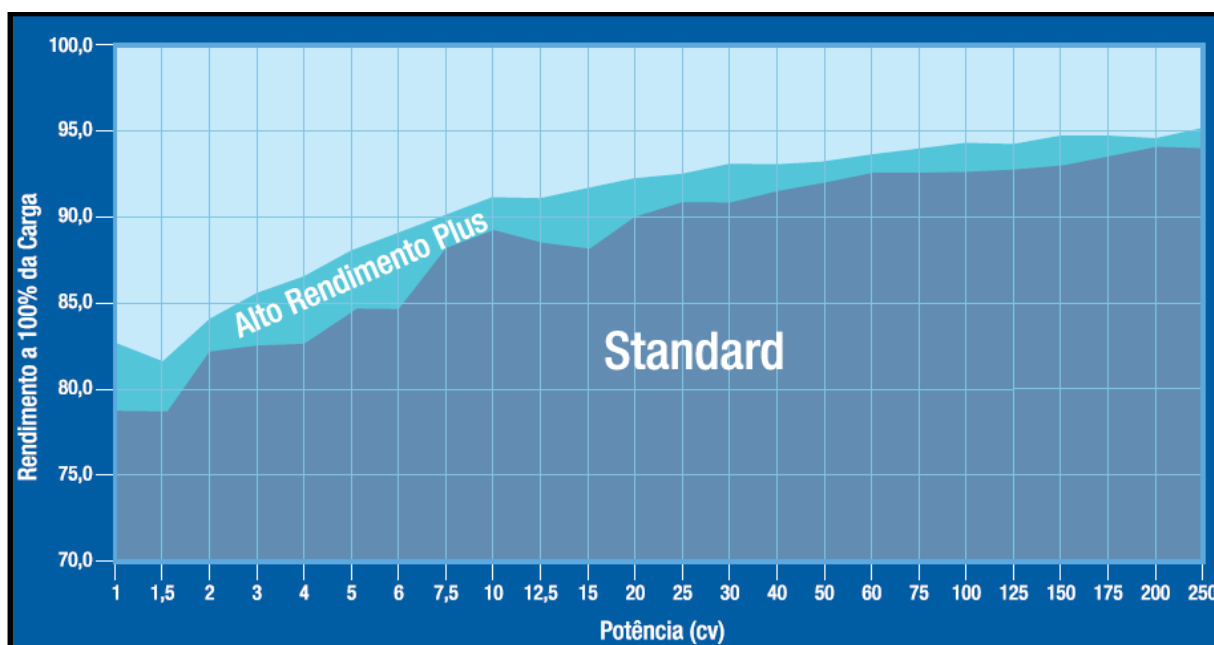


Figura 3.5 - Comparação entre motores do tipo padrão e alto rendimento.

Fonte: (WEG, 2009).

Uma das causas mais comuns de operação ineficiente é o superdimensionamento de motores elétricos. Os motivos mais frequentes para essa ocorrência são:

- Desconhecimento das características da carga.
- Desconhecimento de métodos para dimensionamento adequado.
- Expectativa de aumento de carga.
- Não especificação de fator de serviço maior que 1 para motores que trabalham esporadicamente sobrecarregados.
- Aplicação de sucessivos fatores de segurança.

A utilização de motores superdimensionados leva ao aumento de custos de aquisição (maior potência), maior consumo de energia elétrica (motor trabalhando com baixo carregamento) e baixo fator de potência.

Desta maneira, em condições nominais de funcionamento, o motor deve adequar-se à máquina, operando com carregamento entre 75% e 100% (BD MOTOR, 2008).

De acordo com a WEG (2003), o motor de alto rendimento pode ser especificado da mesma forma que outro motor da linha padrão. Geralmente, ambos possuem a mesma carcaça padronizada, sendo desnecessárias modificações especiais para a substituição dos motores.

Segundo o GUIA TÉCNICO (1998), o valor do rendimento deve ser um fator determinante na seleção de um motor elétrico.

Para pequenos valores de carregamento, o rendimento do motor é baixo, já que as perdas fixas tornam-se grandes comparadas com a potência fornecida. Quando o carregamento do motor aumenta, o rendimento do mesmo se eleva. De acordo com a Figura 3.6, quando o motor opera com carregamento maior do que 50%, o rendimento é muito próximo dos valores nominal e máximo (GUIA TÉCNICO, 1998).

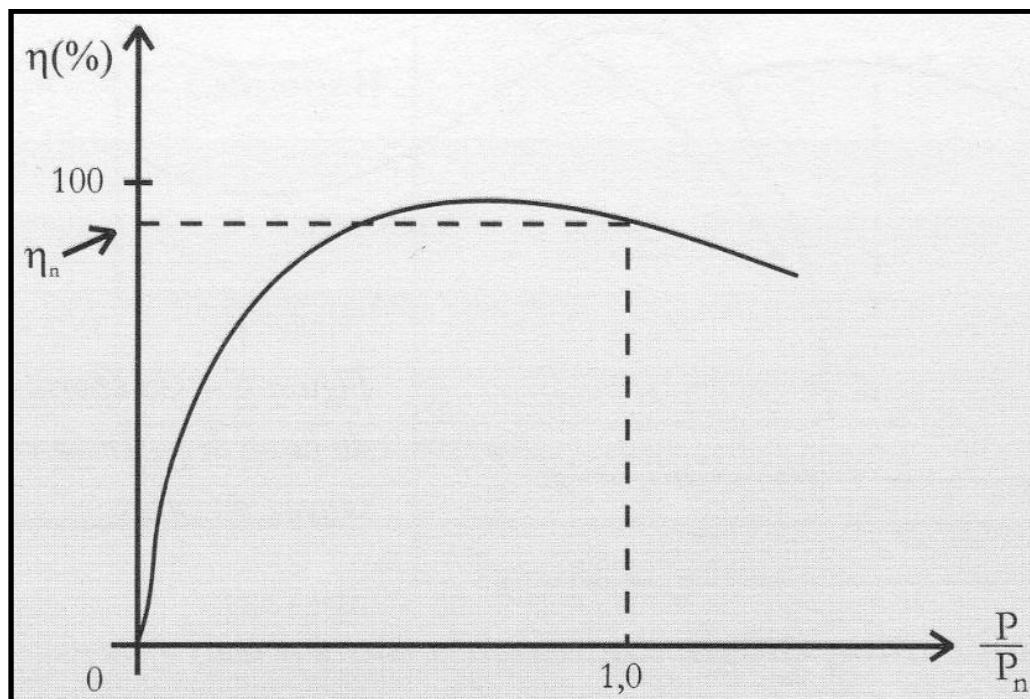


Figura 3.6 - Comportamento do rendimento do motor elétrico em função do carregamento.

Fonte: (GUIA TÉCNICO, 1998).

Já o fator de potência relaciona a potência que o motor necessita para acionar a carga e suprir suas perdas internas (potência ativa) e a potência total solicitada à rede elétrica (potência aparente⁶).

De acordo com a RESOLUÇÃO N. 456 (2000), as indústrias devem operar com fator de potência mínimo de 0,92, sendo que abaixo deste valor, existem penalizações financeiras aos consumidores.

A Figura 3.7 mostra que em vazio, o fator de potência do motor elétrico é baixo (potência ativa é necessária somente para suprir as perdas), sendo que seu valor aumenta proporcionalmente ao carregamento do motor, atingindo valores satisfatórios quando este opera a partir de 75% da sua potência nominal (GUIA TÉCNICO, 1998).

⁶ A potência aparente engloba a potência ativa relacionada ao trabalho mecânico e perdas e a potência reativa, necessária para a magnetização.

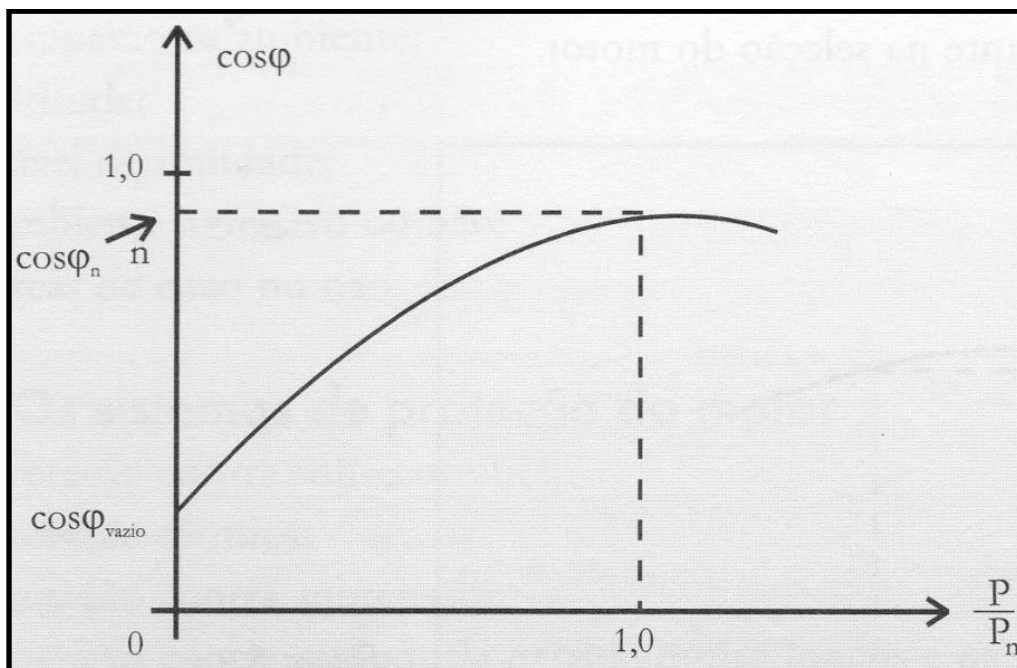


Figura 3.7 - Comportamento do fator de potência do motor elétrico em função do carregamento.

Fonte: (GUIA TÉCNICO, 1998).

3.4.1. FATOR DE SERVIÇO

O fator de serviço é um multiplicador que, aplicado à potência nominal, indica o valor da carga que o motor pode acionar continuamente, sob tensão e frequência nominais. Este permite que o motor elétrico atenda picos de carga esporádicos, sendo que neste caso, os valores de rendimento e fator de potência não são garantidos pelo fabricante quando o motor opera acima da sua potência nominal.

De acordo com a ABNT NBR 17094-1 (2008), o fator de serviço quando especificado, deve ser igual a 1,15. Caso não seja especificado, o fator de serviço do motor possui valor unitário.

3.5. TIPOS DE PARTIDA

3.5.1. PARTIDA DIRETA

A corrente absorvida pelo motor elétrico trifásico com rotor em gaiola durante a fase de partida atinge valores bem superiores ao valor de sua corrente nominal, sendo que este deve suportar esforços térmicos e dinâmicos em suas bobinas (HARWOOD, 1948).

Os valores máximos limites de corrente absorvida com o rotor bloqueado à tensão nominal, estão especificados na Norma ABNT NBR 17094-1 (2008). A Norma também exige que conste na placa de identificação do motor a relação entre a corrente de rotor bloqueado e a corrente nominal.

A partida direta deve ser feita por meio de contadores, considerando que as curvas de conjugado e corrente para um determinado motor não variam, para uma tensão constante.

O motor Categoria N deve permitir a frio duas partidas consecutivas e mais uma partida a quente, estando o motor nas condições nominais de funcionamento (ABNT NBR 17094-1, 2008).

Para a utilização deste tipo de partida, quando o sistema elétrico de alimentação não estiver bem dimensionado, o elevado valor da corrente de partida pode trazer consequências prejudiciais à rede elétrica, como por exemplo, uma queda brusca no valor da tensão de alimentação, impedindo o correto funcionamento de equipamentos que estejam ligados ao circuito.

A Figura 3.8 apresenta o comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor (SCHNEIDER ELECTRIC, 2004).

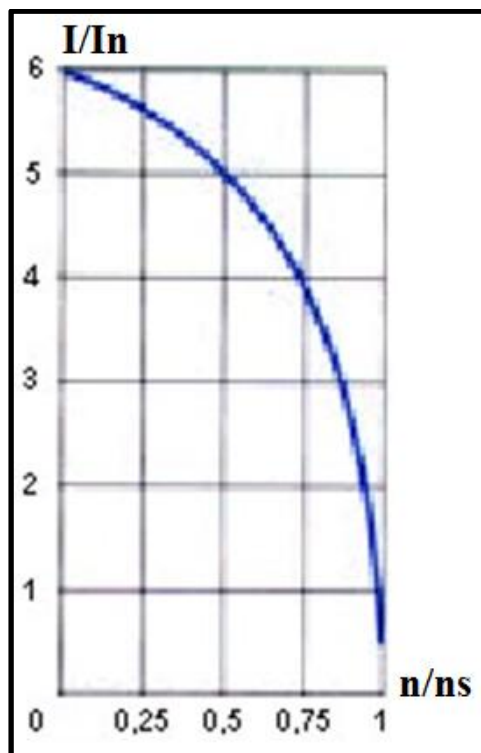


Figura 3.8. Comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor.

Fonte: Adaptado de (SCHNEIDER ELECTRIC, 2004).

3.5.2. PARTIDA ESTRELA - TRIÂNGULO

Durante a fase de partida, a chave estrela-triângulo interliga os terminais do motor em estrela e após sua aceleração (próximo da rotação nominal), comuta para triângulo, onde o motor é alimentado diretamente pela rede elétrica.

Para utilizar este método de partida, é necessário que o motor possua 6 ou 12 terminais de saída. A grande maioria dos motores elétricos possui terminais do enrolamento interligáveis, permitindo o funcionamento do mesmo em redes de pelo menos duas tensões diferentes (WEG, 2003).

Durante a partida, a corrente e o conjugado do motor são reduzidos a $1/3$ dos valores nominais. Desta forma, este sistema pode ser utilizado somente em casos onde o conjugado do motor em estrela for maior que o conjugado da carga.

A Figura 3.9 apresenta o comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor para a chave estrela-triângulo (SCHNEIDER ELECTRIC, 2004).

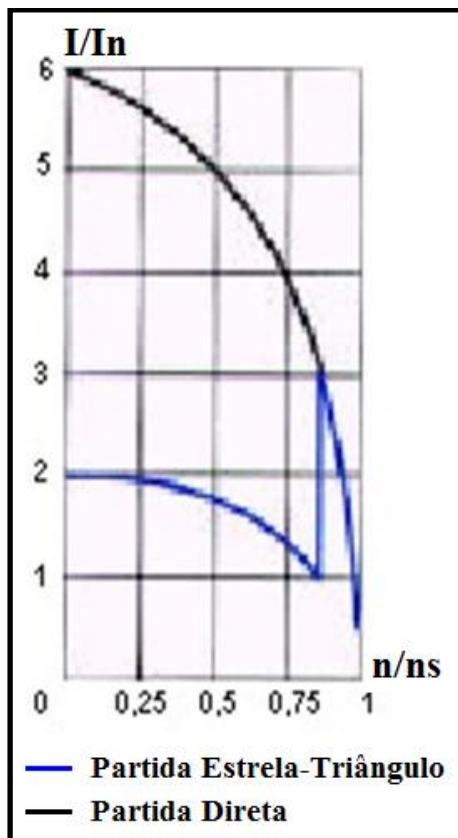


Figura 3.9. Comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor para a chave estrela-triângulo.

Fonte: Adaptado de (SCHNEIDER ELECTRIC, 2004).

3.5.3. PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA

A chave compensadora é um dispositivo que alimenta o motor elétrico com tensão reduzida durante a fase de partida, por meio da utilização de um autotransformador.

Após a aceleração do motor, o autotransformador é desconectado, sendo o mesmo alimentado à plena tensão.

Para a utilização da partida com chave compensadora, não existe restrição quanto ao número de bornes de saída do motor, pois o mesmo é conectado diretamente à rede de alimentação.

Este dispositivo de partida pode ser utilizado para acionar motores elétricos sob carga com valor reduzido da corrente de partida, evitando sobrecargas no sistema elétrico. Os autotransformadores possuem vários terminais para que se possa selecionar o valor da tensão reduzida, de 50, 65 e 80% do valor nominal, obtendo-se conjugado suficiente para a partida e aceleração do conjunto.

Durante a partida, um contator aciona o autotransformador ligado em estrela, sendo que após a aceleração do motor, este é conectado diretamente à rede de alimentação. Neste caso, a comutação não acarreta a elevação da corrente, pois a chave de partida se comporta como uma reatância indutiva.

A Figura 3.10 apresenta o comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor para chave compensadora (SCHNEIDER ELECTRIC, 2004).

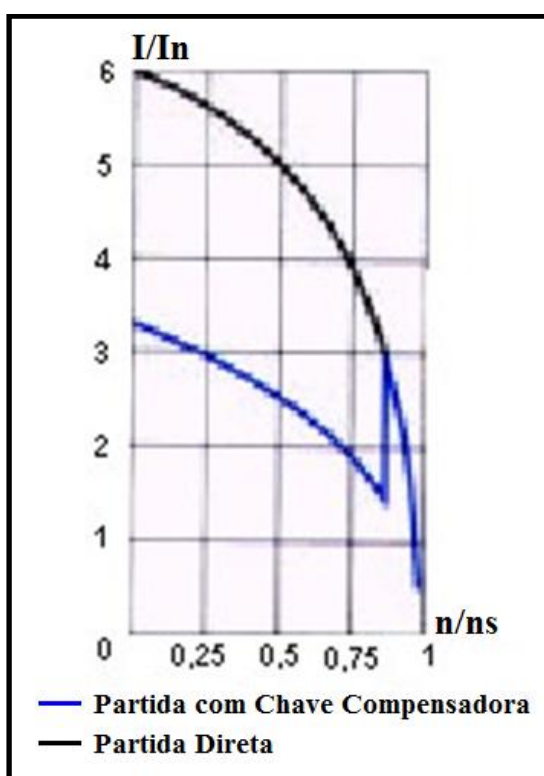


Figura 3.10 - Comportamento da corrente de partida em relação à rotação do motor para a chave compensadora.

Fonte: Adaptado de (SCHNEIDER ELECTRIC, 2004).

3.5.4. PARTIDA SOFT-STARTER

O Soft-Starter é uma chave de partida microprocessada que controla o ângulo de disparo de um conjunto de tiristores, aplicando uma tensão variável nos terminais do motor durante a sua aceleração. Desta forma, conseguem-se reduzir os elevados conjugados de aceleração do motor e o valor da corrente de partida, protegendo a máquina de desgastes mecânicos e a rede elétrica de afundamentos momentâneos de tensão.

A chave eletrônica proporciona maiores intervalos entre manutenções, maior segurança operacional e redução de paradas inesperadas devido a defeitos mecânicos.

Em alguns modelos mais sofisticados, vários modos de programação são disponibilizados tanto na partida, quanto na parada:

- Partida: rampa de tensão, limite de corrente e impulso de tensão.
- Parada: rampa de tensão e frenagem utilizando corrente contínua.
- Em regime de funcionamento: economia de energia e controle do fator de potência.

A Figura 3.11 apresenta o comportamento do conjugado em relação à rotação do motor para o Soft-Starter (SCHNEIDER ELECTRIC, 2004).

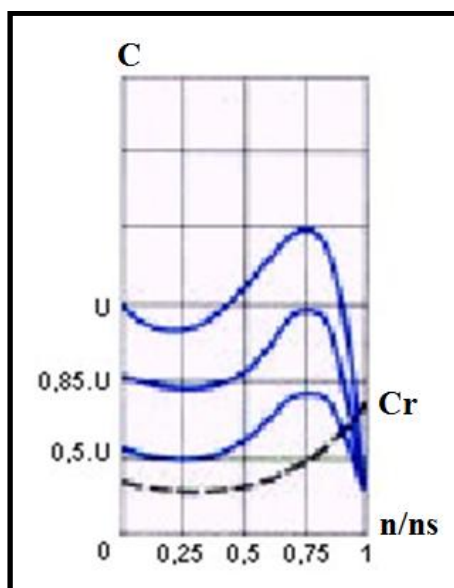


Figura 3.11 - Comportamento do conjugado em relação à rotação do motor para o Soft-Starter.

Fonte: Adaptado de (SCHNEIDER ELECTRIC, 2004).

3.5.5. CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

A utilização de motores elétricos alimentados por conversores de frequência em acionamentos que exigem velocidade variável tem aumentado significativamente nos últimos anos.

Capaz de efetuar a partida de grandes motores com carga acoplada ao eixo, sem quedas de tensão e correntes elevadas, o conversor de frequência também pode ser utilizado em processos que possuem vários tipos de carga.

Os conversores de frequência são divididos em dois grupos:

- **Controle Escalar:** impõe determinado valor de tensão e frequência no motor elétrico, com o objetivo de manter constante a relação “V/f”, responsável pelo controle do torque do motor.
- **Controle Vetorial:** possuem alta precisão de controle da velocidade e do torque do motor. Por meio da decomposição vetorial, possibilitam a variação independente do torque e do fluxo. O conversor de frequência com controle vetorial pode ser do tipo normal, que necessita de um motor com sensor de velocidade e *sensorless*, que não necessita de sensor, sendo que sua precisão é considerada satisfatória, com algumas limitações, principalmente em baixas rotações.

A Figura 3.12 apresenta a estrutura de um conversor de frequência (WEG, 2003).

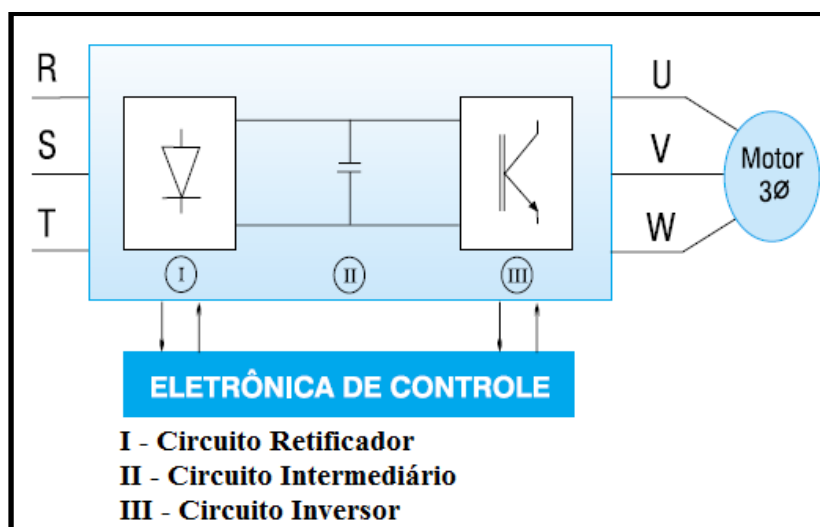


Figura 3.12 - Estrutura de um conversor de frequência.

Fonte: Adaptado de (WEG, 2003).

3.6. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A Qualidade de Energia Elétrica pode ser definida de acordo com as perturbações elétricas em um sinal de tensão ou de corrente, em uma instalação elétrica (MIGUEL, 1999). Para a Concessionária de Energia Elétrica, a ausência de variações de tensão, bem como desligamentos é muito importante. Já para o consumidor, a Qualidade de Energia Elétrica está muitas vezes relacionada à ausência de variações de tensão no ponto de entrega. Muitas vezes, as perturbações podem ser causadas pelo próprio consumidor, por meio da utilização de equipamentos com tecnologias modernas ou por cargas não lineares, que possuem funcionamento baseado em eletrônica de potência.

Após 1990, com o aumento da utilização de equipamentos eletrônicos nos setores residencial, comercial e industrial, a situação tornou-se ainda mais grave. À medida que estes equipamentos exigem uma rede elétrica de boa qualidade para o seu correto funcionamento, também são os principais causadores de perturbações (ALVES, 1996).

As principais perturbações elétricas em um sinal de tensão ou de corrente são àquelas relacionadas com as variações na amplitude de tensão, frequência do sinal, desequilíbrios de tensão ou de corrente em sistemas trifásicos e perturbações na forma de onda do sinal.

Apresentam-se a seguir, as principais perturbações elétricas em um sinal de tensão ou corrente, em uma instalação elétrica.

3.6.1. AMPLITUDE DA TENSÃO

A variação na amplitude da tensão ocorre quando, sobre um sinal senoidal são produzidos afundamentos ou elevações momentâneas de tensão, sobretensão e subtensão, interrupções de tensão, flutuações de tensão e cintilações.

3.6.2. AFUNDAMENTO DE TENSÃO (SAG)

Os afundamentos de tensão são definidos como sendo uma diminuição no valor da amplitude do sinal de forma brusca, entre 0,1 a 0,9 p.u., restabelecendo-se após um curto período de tempo. Em alguns países, inclusive no Brasil, busca-se melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica por meio de programas essenciais para a redução do número e da duração de interrupções.

Muitos equipamentos com tecnologias modernas, comumente utilizados em instalações industriais, são extremamente sensíveis aos afundamentos de tensão, uma vez que podem deixar de exercer corretamente suas funções.

3.6.3. ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE TENSÃO (SWELL)

As elevações momentâneas de tensão podem ser causadas por comutação de bancos de capacitores, operação de retificadores controlados, variadores de velocidade, atuação de dispositivos de proteção, descargas atmosféricas, entre outros.

Para ser considerada elevação momentânea de tensão, o valor da sobretensão transitória deve estar na faixa de 1,1 a 1,8 p.u.

Os motores elétricos podem suportar impulsos transitórios de tensão, porém, dependendo da intensidade e número de eventos, sua vida útil pode ser afetada (WEG, 2003).

3.6.4. SOBRETENSÃO E SUBTENSÃO

Sendo uma perturbação de tensão com valor eficaz superior ao valor nominal (10%), a sobretensão pode ser de curta ou longa duração, podendo ocorrer principalmente devido à entrada de grupo geradores ou rejeição de cargas (MIGUEL, 1999).

A subtensão pode ocorrer em instalações que possuam circuitos em sobrecarga, ocasionando, por exemplo, perda de conjugado em motores elétricos.

Já as perturbações de frequência do sinal são causadas geralmente por problemas em sistemas de geração de energia elétrica, bem como sistemas que utilizam grupos geradores.

Para os motores de indução, as variações de tensão e de frequência são classificadas em Zona A ou Zona B.

Um motor de indução deve ser capaz de desempenhar sua função continuamente na Zona A, podendo não atender completamente as suas características de desempenho à tensão e frequência nominais, além de sofrer elevações de temperatura.

O motor de indução também deve desempenhar sua função na Zona B, mas pode apresentar desvios superiores aos da Zona A, no tocante às características de desempenho à tensão e frequência nominais. As elevações de temperatura são superiores as da Zona A, sendo que o funcionamento prolongado do motor não é recomendado (ABNT NBR 17094-1, 2008).

A Figura 3.13 apresenta os limites das variações de tensão e frequência em funcionamento.

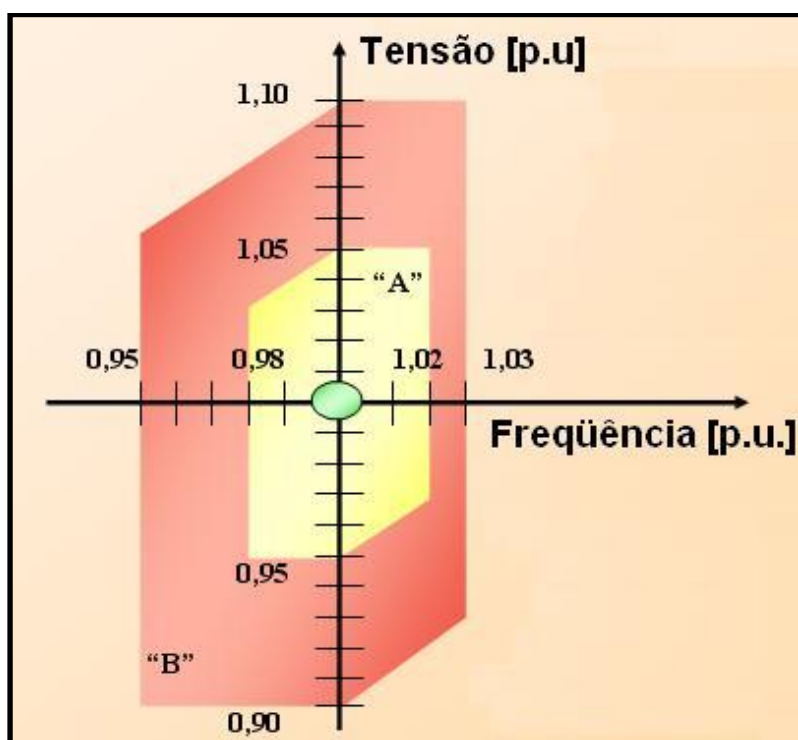


Figura 3.13 - Limites das variações de tensão e frequência em funcionamento.

Fonte: Adaptado de (ABNT NBR 17094-1, 2008).

3.6.5. DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

O desbalanceamento das tensões é responsável por sobreaquecimentos no enrolamento do estator devido à circulação de correntes fortemente desequilibradas.

Desta forma, limitar o valor da temperatura do enrolamento do motor, com o objetivo de preservar sua vida útil, é possível por meio da redução de potência do mesmo, quando alimentado por tensões desequilibradas.

De acordo com a NEMA (1998), recomenda-se a utilização de um fator de redução de potência no motor, quando este é alimentado com tensões desequilibradas, de acordo com as Equações 3.4 e 3.5.

$$T_M = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3} \quad (3.4)$$

$$TD = \frac{TM_D - T_M}{T_M} \quad (3.5)$$

Onde:

T_M = tensão média das linhas AB, BC e CA [V].

TD = percentual da tensão desbalanceada [%].

TM_D = tensão máxima desviada em relação à tensão média [V].

A Figura 3.14 indica o fator de redução de potência que deve ser aplicado ao motor elétrico em função do percentual de desequilíbrio de tensão (GUIA TÉCNICO, 1998).

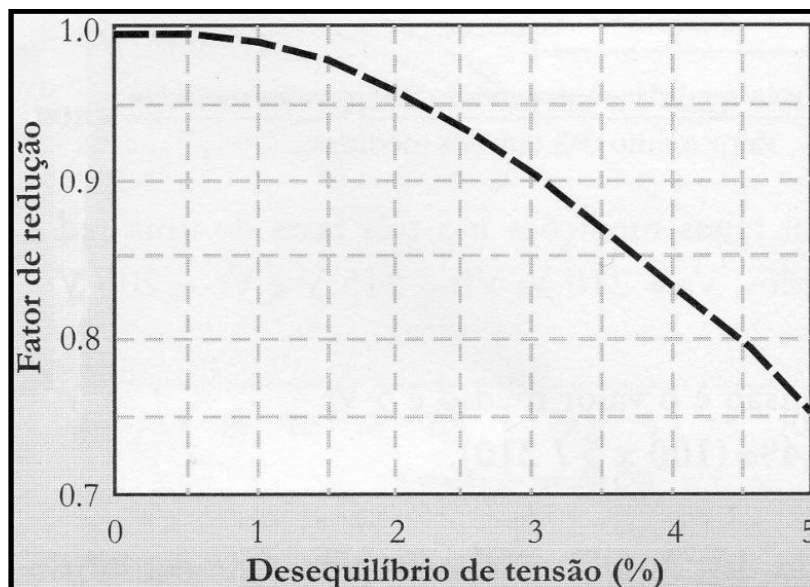


Figura 3.14 - Fator de redução de potência em função do percentual de desequilíbrio de tensão.

Fonte: Adaptado de (GUIA TÉCNICO, 1998).

Produtos devido à existência de diferenças significativas entre os valores das tensões e correntes presentes em um sistema trifásico, os desequilíbrios de tensão podem ocorrer devido à abertura de uma das fases de um sistema de alimentação trifásico, ou devido a cargas monofásicas desigualmente distribuídas.

No motor elétrico, a presença de tensões ligeiramente desbalanceadas pode provocar alterações nas características de desempenho do mesmo, devido ao desequilíbrio de corrente, conforme apresenta a Figura 3.15 (GUIA TÉCNICO, 1998).

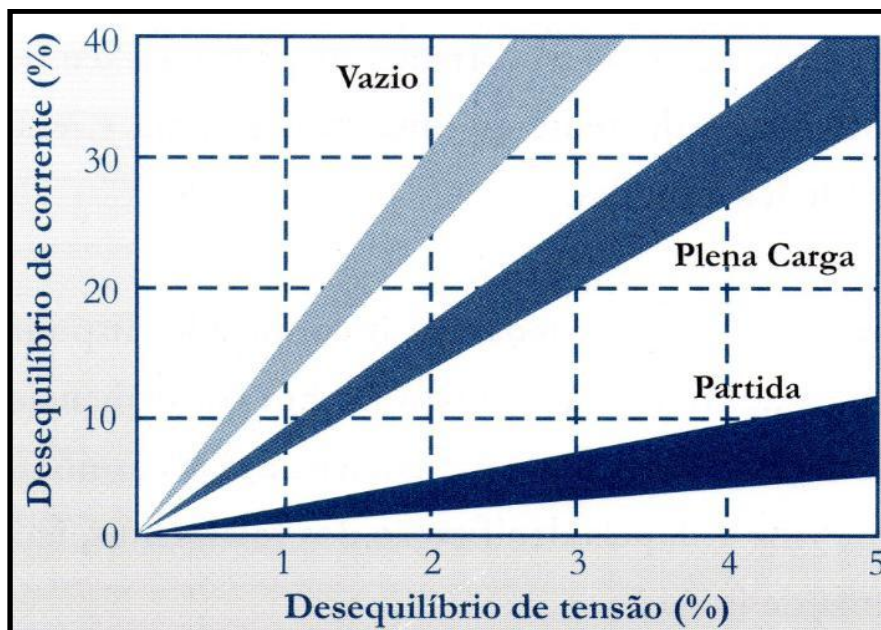


Figura 3.15 - Desequilíbrio de corrente em função do desequilíbrio de tensão.

Fonte: (GUIA TÉCNICO, 1998).

Dependendo do valor do grau de desequilíbrio de tensão, podem ocorrer no motor elétrico aumento significativo das perdas internas, redução do conjugado, rendimento e aumento dos níveis de vibração e ruídos. Desta forma, os desequilíbrios de tensão são considerados uma das causas da queima do motor elétrico de indução.

Uma forma de se analisar a operação de um motor elétrico de indução trifásico submetido às tensões desbalanceadas é por meio do método denominado componentes simétricas. Neste, as tensões de cada seqüência atuam de forma independente, sendo que seus efeitos são adicionados segundo o princípio da superposição.

As tensões de seqüência positiva e negativa estão relacionadas a escorregamentos diferentes, devido ao sentido do campo magnético girante para cada seqüência. Desta forma, o motor elétrico pode ser representado por dois circuitos equivalentes, um de seqüência positiva e outro de seqüência negativa. A componente de seqüência zero é nula para sistemas sem neutro.

Assim, faz-se necessária a determinação do valor do Grau de Desequilíbrio de Tensão antes do início das medições no motor elétrico, principalmente quando forem utilizados

equipamentos monofásicos. O GDT pode ser determinado de acordo com a Equação 3.6 (STEVENSON JR, 1962).

$$GDT = \frac{U_{AB2}}{U_{AB1}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

Onde:

GDT = Grau de Desequilíbrio de Tensão [%].

U_{AB1} = valor da componente simétrica de tensão de sequência positiva [V].

U_{AB2} = valor da componente simétrica de tensão de sequência negativa [V].

Um sistema elétrico trifásico pode ser considerado equilibrado se a componente de sequência zero não exceder 1% da componente de sequência positiva e se a componente de sequência negativa não exceder 1% da componente de sequência positiva por longo período, ou 1,5% durante alguns minutos (ABNT NBR 17094-1, 2008).

Segundo Lamoglia (1993), o Grau de Desequilíbrio de Tensão pode ser determinado de maneira mais simples, de acordo com a equação 3.7.

$$\text{Desequilíbrio de tensão} = \frac{\text{Máximo valor da tensão} - \text{Valor médio das tensões}}{\text{Valor médio das tensões}} \cdot 100 \quad (3.7)$$

De acordo com a ABNT NBR 17094-1 (2008), os efeitos de um sistema com tensões desequilibradas sobre as características de funcionamento de um motor elétrico de indução, são os seguintes:

- As correntes à rotação nominal possuem desequilíbrios da ordem de 6 a 10 vezes o valor do desequilíbrio de tensão.
- Os valores dos conjugados de rotor bloqueado, mínimo e máximo diminuem quando as tensões são desequilibradas. Se o valor do grau de desequilíbrios de tensão for elevado (valor não especificado na Norma), os valores de conjugados do motor elétrico podem não atender a determinadas aplicações.
- A rotação a plena carga diminui levemente (valor não especificado) quando o motor é alimentado por um sistema com tensões desequilibradas.

- De acordo com o valor do grau de desequilíbrios de tensão, os níveis de ruído e vibração podem aumentar. A vibração pode ser destrutiva para o motor elétrico e para o sistema de acionamento (ABNT NBR 17094-1, 2008).

3.6.6. HARMÔNICOS

As cargas denominadas lineares, como por exemplo, motores elétricos, possuem corrente proporcional a tensão (senoidais), mesmo estando defasadas ou não, em função de sua natureza resistiva, indutiva ou capacitiva.

As perturbações ocasionadas por correntes harmônicas tornaram-se importantes na década de 1980, quando se iniciaram as substituições de equipamentos elétricos e eletromecânicos por equipamentos eletrônicos. Nas cargas não lineares, a proporcionalidade entre tensão e corrente não existe.

De acordo com Edminister (1971), a ordem de um harmônico é um número inteiro obtido pelo quociente entre a frequência deste harmônico e a frequência da componente fundamental, de acordo com a Equação 3.8.

$$O_h = \frac{f_{h-h}}{f_1} \quad (3.8)$$

Onde:

O_h = ordem harmônica.

f_{h-h} = frequência harmônica de ordem h [Hz].

f_1 = frequência da fundamental [Hz].

Segundo Miguel (1999), os harmônicos são classificados de acordo com a sua ordem, frequência e sequência, de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Classificação dos harmônicos

Ordem	Frequência [Hz]	Seqüência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
h	h.60	

Fonte: (Miguel,1999).

A situação desejada para um sistema elétrico de potência é a existência de somente o harmônico de primeira ordem (60 Hz), chamada de fundamental. Porém, observa-se a existência de harmônicos de ordem ímpares (instalações elétricas em geral) e de ordem pares (casos de assimetrias).

Graças ao desenvolvimento da eletrônica de potência, foi possível controlar máquinas elétricas com bastante precisão, aumentando seu desempenho, tornando-se uma opção eficiente em termos de conservação de energia elétrica.

Porém, as tensões harmônicas geradas na tensão de alimentação afetam diretamente a dinâmica de magnetização do núcleo dos motores elétricos, provocando significativo aumento nas perdas magnéticas. Os harmônicos de quinta ordem produzem no motor um conjugado de sentido oposto ao de rotação, reduzindo o valor do conjugado resultante e a capacidade de acionamento da carga. Neste caso, há um aumento no valor da corrente de alimentação, podendo muitas vezes ocasionar a queima do motor, sendo que o aumento das perdas Joule no estator provoca a estabilização da temperatura em valor superior à classe térmica do enrolamento (ABNT NBR 17094-1, 2008).

A Figura 3.16 apresenta o fator de redução do conjugado em função do fator de harmônicos de tensão (motor elétrico de indução alimentado por conversor de frequência) (RAMOS, 2002).

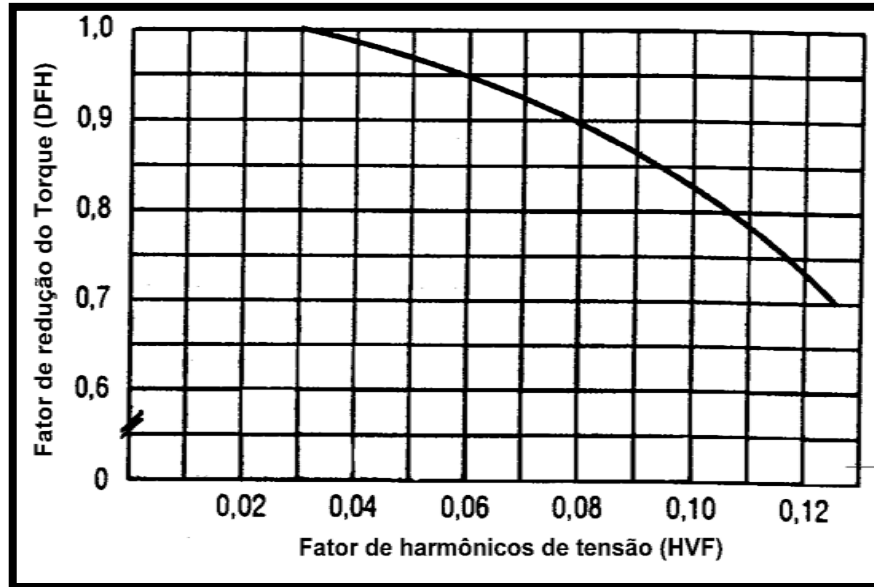


Figura 3.16 - Fator de redução de conjugado em função do fator de harmônicos de tensão.

Fonte: (RAMOS, 2002).

Os motores de indução são projetados de forma a funcionar sob uma tensão de alimentação com limites de harmônicos. De acordo com a ABNT NBR 17094-1 (2008), os motores de indução trifásicos (exceto motores de categoria N) devem ser capazes de funcionar sob tensão de alimentação cujo fator de harmônicos de tensão seja igual ou inferior a 2 %. O motor de categoria N deve ser capaz de funcionar sob tensão de alimentação com fator de harmônicos de tensão igual ou inferior a 3 %.

O Fator de Harmônicos de Tensão é definido segundo a Equação 3.9.

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=5}^{\infty} \frac{U_h^2}{h}} \quad (3.9)$$

Onde:

HVF = fator de harmônicos de tensão [%].

h = ordem dos harmônicos ímpares, não incluindo os divisíveis por 3.

U_h = tensão do enésimo harmônico [p.u.].

O rendimento do motor de indução, quando alimentado por conversor de frequência, diminui em função das perdas devido às correntes harmônicas. De acordo com a NEMA (1998), o

novo valor do rendimento do motor elétrico submetido às correntes harmônicas pode ser determinado de acordo com a Equação 3.10.

$$n_{cf} = \frac{FRC^2}{\frac{1}{n_{sh}} + FRC^2 - 1} \quad (3.10)$$

Onde:

η_{cf} = rendimento do motor elétrico alimentado por conversor de frequência [%].

η_{sh} = rendimento nominal do motor alimentado por tensão senoidal sem conteúdo harmônico [%].

FRC = fator de redução de conjugado.

3.7. SISTEMA MECÂNICO

O acionamento elétrico é um sistema capaz de converter energia elétrica em mecânica, produzindo trabalho e mantendo o controle sobre o processo de conversão.

Um acionamento compreende o motor elétrico, os equipamentos de comando ou controle, a transmissão mecânica, e a própria máquina acionada, que realiza a função desejada.

O motor elétrico selecionado deve ter condições de acionar a máquina, dentro das exigências de conjugado, potência e velocidade, atendendo ainda as características de confiabilidade, segurança, eficiência energética, vida útil elevada, entre outras.

3.7.1. CARACTERÍSTICAS DE CONJUGADO E ROTAÇÃO

Para um sistema mecânico dotado de movimento de rotação, apresenta-se a Equação 3.11 (LOBOSCO; DIAS, 1988).

$$P_m = C.\omega \quad (3.11)$$

Onde:

P_m = potência mecânica [W].

C = conjugado [N.m].

ω = velocidade angular [rad/s].

Quando uma carga mecânica necessita de determinada potência, afirma-se que essa carga requer um determinado valor de conjugado a uma dada velocidade de rotação.

Matematicamente existem inúmeras combinações de C e ω de modo a resultar no mesmo valor de P_m . Porém, fisicamente, a carga mecânica associa a um único par (C , ω) a carga da potência P_m . A curva de conjugado em função da rotação apresenta tal dependência, sendo uma característica fundamental para o processo de seleção do motor adequado ao acionamento, visando um funcionamento estável, econômico e satisfatório ao sistema.

3.7.2. CONJUGADO RESISTENTE E ROTAÇÃO PARA DIVERSOS TIPOS DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

De acordo com as características de conjugado resistente em função da rotação, as cargas mecânicas podem ser divididas em 6 grandes grupos.

Grupo 1 – Conjugado Constante

O conjugado resistente é praticamente constante e independente da rotação, sendo a potência proporcional à rotação. É o caso de: máquinas de levantamento de carga como guindastes, guinchos, gruas, pontes rolantes, correias transportadoras com carga constante, compressores de pistão atuando com pressão constante, laminadores, máquinas de rompimento de fibras na indústria têxtil, máquinas-ferramentas com esforço de corte constante, entre outras.

A Figura 3.17 apresenta a curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado constante (LOBOSCO; DIAS, 1988).

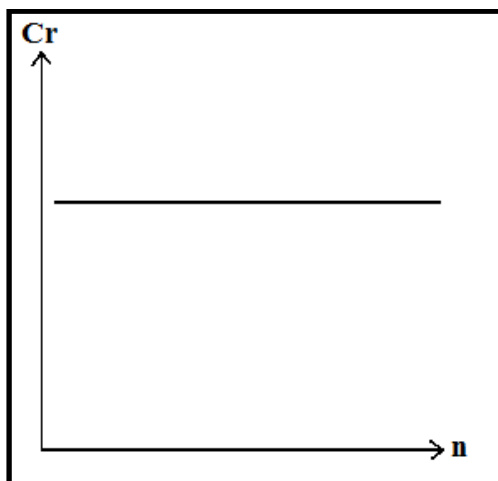


Figura 3.17 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado constante.

Fonte: Adaptado de (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Grupo 2 – Conjugado Linear

O conjugado resistente varia linearmente com a rotação, sendo que a potência é proporcional ao quadrado da rotação. É o caso de moinhos de rolos, bombas de pistão, plainas e serras para madeira.

A Figura 3.18 apresenta a curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado linear (LOBOSCO; DIAS, 1988).

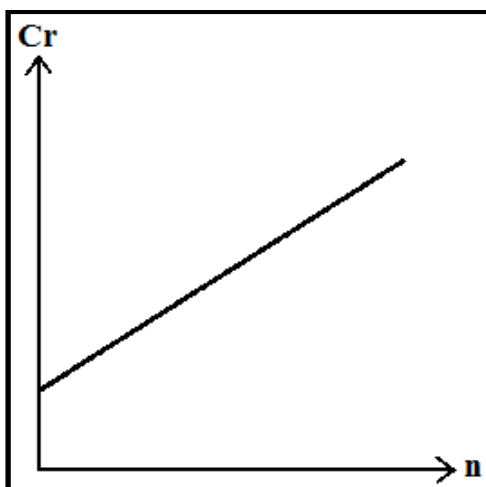


Figura 3.18 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado linear.

Fonte: Adaptado de (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Grupo 3 – Conjugado Parabólico

O conjugado resistente varia na proporção do quadrado da rotação, sendo que a potência é proporcional ao cubo da rotação. É o caso de bombas centrífugas, misturadores, ventiladores, exaustores e compressores centrífugos.

A Figura 3.19 apresenta a curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado parabólico (LOBOSCO; DIAS, 1988).

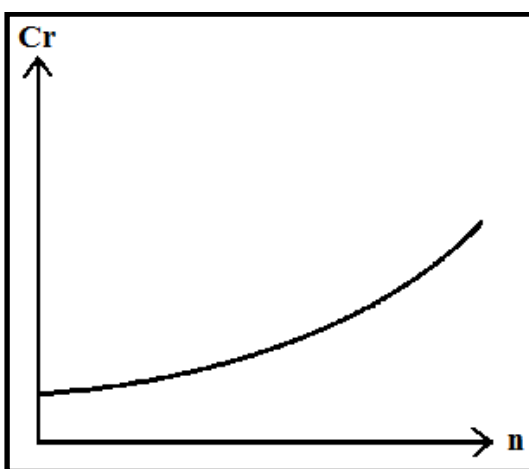


Figura 3.19 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado parabólico.

Fonte: Adaptado de (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Grupo 4 – Conjugado Hiperbólico

O conjugado resistente varia na proporção inversa da rotação, sendo a potência constante. É o caso de máquinas operatrizes, tais como frezadoras e sistemas de regulação de velocidade em enroladeiras e bobinadeiras.

A Figura 3.20 apresenta a curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado hiperbólico (LOBOSCO; DIAS, 1988).

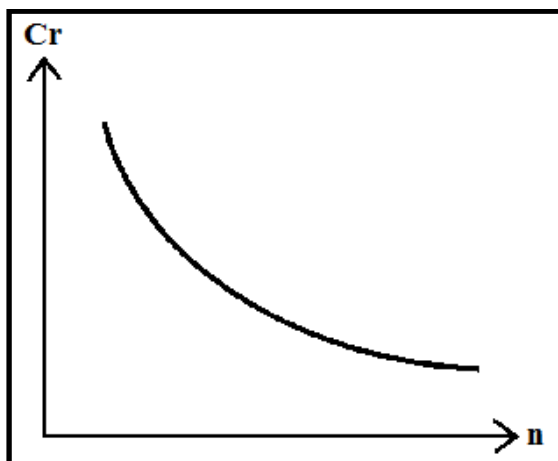


Figura 3.20 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado hiperbólico.

Fonte: Adaptado de (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Grupo 5 – Conjugado não Uniforme

O conjugado resistente varia de forma não uniforme com a rotação, onde dificilmente consegue-se expressar a variação por equação matemática. É o caso de fornos rotativos ou de máquinas que trabalham em regime de carga variável.

A Figura 3.21 apresenta a curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado não uniforme (LOBOSCO; DIAS, 1988).

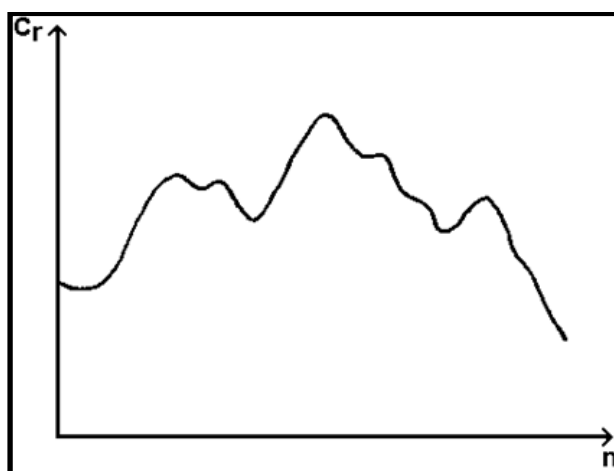


Figura 3.21 - Curva de conjugado resistente em função da rotação para cargas do tipo conjugado não uniforme.

Fonte: Adaptado de (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Grupo 6 – Cargas que não solicitam conjugado

São cargas que não solicitam conjugado, pois operam com volante de inércia. Este fornece energia cinética para suprir os picos de carga, devendo o motor restaurar a velocidade original do volante entre as solicitações. As prensas de perfuração não hidráulicas constituem exemplos de cargas que utilizam volantes dentro deste princípio.

3.7.3. TIPOS DE CONJUGADO DOS MOTORES ELÉTRICOS

Os motores de indução com rotor de gaiola são aqueles cujo conjugado disponível no eixo varia de acordo com a rotação, conforme apresenta a Figura 3.22 (WEG, 2003).

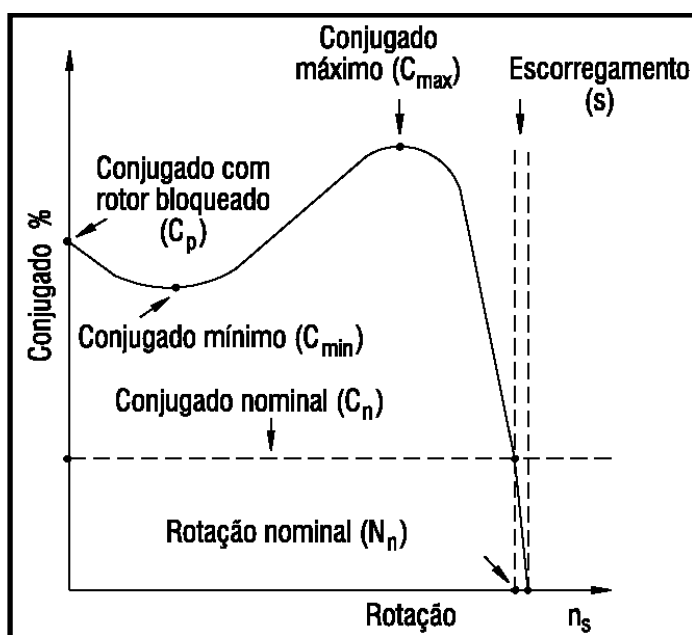


Figura 3.22. Curva de conjugado x rotação para motores de indução com rotor do tipo gaiola.

Fonte: (WEG, 2003).

A seguir serão apresentados os principais conceitos sobre conjugados (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Conjugado Básico

Expressa os diversos valores do conjugado motor como percentuais deste valor. É definido como sendo a relação entre a potência nominal e a velocidade síncrona. No caso do motor de indução, esta situação fisicamente não existe, pois quando este fornece potência nominal, possui rotação abaixo da síncrona.

O valor do conjugado básico pode ser determinado de acordo com a Equação 3.12.

$$C_o = \frac{716.P_n}{n_s} \quad (3.12)$$

Onde:

C_o = conjugado básico [kgf.m].

P_n = potência nominal [cv].

n_s = rotação síncrona [rpm].

Conjugado Nominal

Também denominado de conjugado a plena carga, é desenvolvido pelo motor quando este é alimentado por rede elétrica com tensão e frequência nominais.

O motor de indução possui conjugado igual a zero à velocidade síncrona. À medida que o valor da carga aumenta, a rotação do motor diminui gradativamente, até o ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver. Se houver uma solicitação de carga ainda maior, a rotação do motor diminui bruscamente, podendo chegar ao travamento do eixo.

O conjugado nominal do motor elétrico de indução pode ser determinado de acordo com a Equação 3.13.

$$C_n = \frac{716.P_n}{n} \quad (3.13)$$

Onde:

C_n = conjugado nominal [kgf.m].

P_n = potência nominal [cv].

n = rotação [rpm].

Conjugado Mínimo

É o menor valor de conjugado desenvolvido pelo motor elétrico durante a partida. Este valor não deve ser muito baixo para que a partida não seja muito demorada, causando sobreaquecimento no motor, especialmente nos casos de alta inércia ou partidas com tensão reduzida.

Conjugado Máximo

É o maior valor de conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominais, sem a diminuição brusca de velocidade. O conjugado máximo deve ser o mais elevado possível, pois o motor deve vencer eventuais picos de carga, não permitindo que sua rotação diminua na ocorrência de quedas de tensão transitórias.

Conjugado com Rotor Bloqueado

É o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor elétrico travado, para todas as posições angulares do rotor, sob tensão e frequências nominais. Este conjugado pode ser expresso em percentagem do conjugado nominal, de acordo com a Equação 3.14.

$$C_{rb\%} = \frac{C_{rb}}{C_n} \cdot 100 \quad (3.14)$$

Onde:

$C_{rb\%}$ = conjugado com rotor bloqueado [%].

C_{rb} = conjugado com rotor bloqueado [kgf.m].

C_n = conjugado nominal [kgf.m].

De acordo com a ABNT NBR 17094-1 (2008), o conjugado de partida é definido como sendo aquele que o motor desenvolve na ponta de eixo desde a velocidade zero até a velocidade de funcionamento, sob tensão e frequência nominais. De acordo com esta definição, o conjugado de partida é uma curva e não um ponto, incluindo todos os conjugados já apresentados.

3.7.4. PONTO DE FUNCIONAMENTO

O encontro das curvas de conjugado em função da rotação, do motor elétrico e da carga, define o ponto de funcionamento. Para cargas que operam em regime variado, com picos de conjugado, o sistema se ajustará às novas condições, ou perderá sua estabilidade.

As Figuras 3.23 e 3.24 apresentam os casos de estabilidade e instabilidade do acionamento, respectivamente (LOBOSCO; DIAS, 1988).

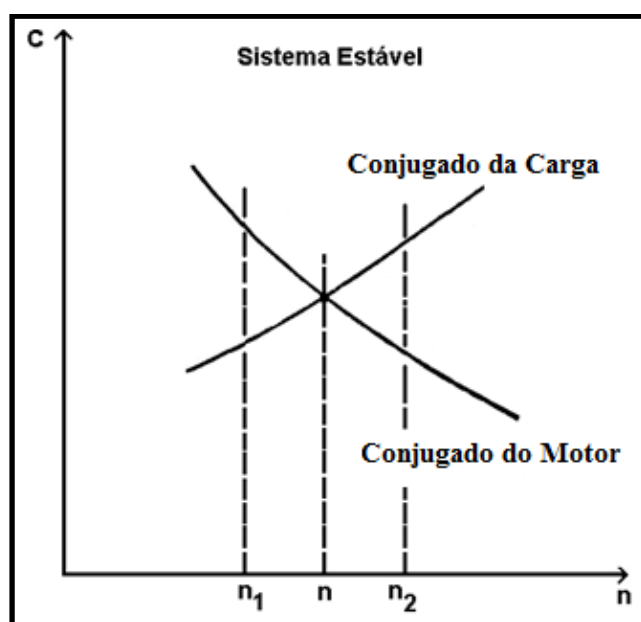


Figura 3.23 - Curvas de conjugado do motor e da carga em função da rotação para um sistema estável.

Fonte: Adaptado de (LOBOSCO; DIAS, 1988).

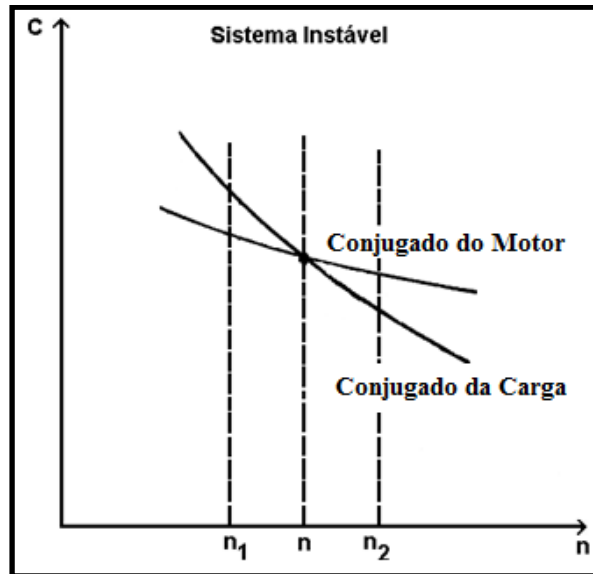


Figura 3.24 - Curvas de conjugado do motor e da carga em função da rotação para um sistema instável.

Fonte: Adaptado de (LOBOSCO; DIAS, 1988).

3.7.5. ACELERAÇÃO

A Equação 3.15 relaciona o tempo que leva uma carga sujeita a um conjugado C , e que possui um momento de inércia J , para ser acelerada a uma velocidade angular ω_1 até ω_2 .

$$C_{ac} = Jt \cdot \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (3.15)$$

Onde:

C_{ac} = conjugado acelerador [N.m].

Jt = momento de inércia total [kg.m²].

ω = velocidade angular [rad/s].

t = tempo [s].

Na prática, o conjugado acelerador é definido como sendo a diferença entre o Conjugado Motor (C_m) e a somatória de todos os conjugados resistentes, como atrito do motor e da máquina (C_r).

Desta maneira, o conjugado de aceleração (C_{ac}) efetivamente utilizado é apresentado na Equação 3.16.

$$C_{ca} = C_m - C_r \quad (3.16)$$

3.7.6. TEMPO DE ACELERAÇÃO - MÉTODO GRÁFICO

Para verificar se o motor elétrico é capaz de acionar uma carga desde a velocidade zero até a velocidade de funcionamento, ou mesmo para dimensionar equipamentos de partida e sistemas de proteção, faz-se necessário determinar o tempo de aceleração.

O tempo de aceleração pode ser determinado de acordo com a Equação 3.17.

$$t_a = \frac{J_t \cdot n}{93,63 \cdot C_{ma}} \quad (3.17)$$

Onde:

t_a = tempo de aceleração [s].

J_t = momento de inércia total [kg.m^2].

n = rotação [rpm].

C_{ma} = conjugado médio acelerador [kgf.m].

O conjugado médio acelerador pode ser obtido por meio da diferença entre o conjugado do motor e o conjugado da carga, sendo que este valor deveria ser determinado para cada intervalo de rotação. Neste caso, a somatória dos intervalos forneceria o tempo total de aceleração.

Na prática, é suficiente calcular graficamente o conjugado médio, ou seja, a diferença entre a média do conjugado do motor e a média do conjugado da carga. A média pode ser determinada graficamente, observando-se que a soma das áreas A_1 e A_2 seja igual à área A_3 , bem como a área B_1 seja igual a área B_2 .

A Figura 3.25 apresenta o método para a determinação do conjugado médio acelerador, utilizando-se de recursos gráficos (WEG, 2003).

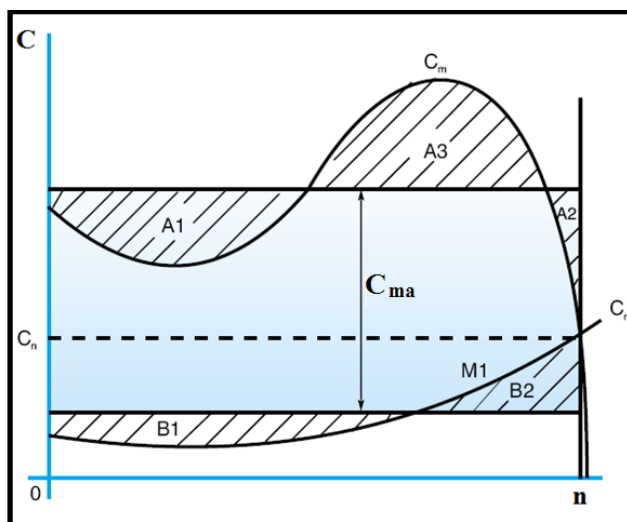


Figura 3.25 - Curva do motor e da carga acionada.

Fonte: Adaptado de (WEG, 2003).

Onde:

C_n = conjugado nominal [N.m].

C_m = conjugado do motor [N.m].

C_r = conjugado resistente [N.m].

C_{ma} = conjugado médio acelerador [N.m].

n = rotação [rpm].

O momento de inércia é característica fundamental para se verificar, por meio do tempo de aceleração, se o motor elétrico é capaz de acionar uma determinada carga dentro das condições exigidas pelo ambiente ou pela estabilidade térmica do material isolante. O momento de inércia pode ser definido como sendo a medida de resistência que um corpo oferece à mudança em seu movimento de rotação em torno de um dado eixo.

Em caso de grandes momentos de inércia e elevados conjugados resistentes, deve-se optar por motores com categorias de conjugado superior (H ou D), ou motores de anéis, ao invés de utilizar motores com potências maiores que a necessária, apenas para atender às condições de partida, o que representaria um investimento desnecessário.

O momento de inércia total pode ser determinado de acordo com a Equação 3.18 (LOBOSCO; DIAS, 1988).

$$J_t = \frac{93,63.C_{ma}.t_a}{n} \quad (3.18)$$

Onde:

J_t = momento de inércia total [kg.m²].

C_{ma} = conjugado médio acelerador [N.m].

t_a = tempo de aceleração [s].

n = rotação [rpm].

3.7.7. TEMPO DE ACELERAÇÃO - MÉTODO SIMPLIFICADO (LOBOSCO; DIAS, 1988).

Quando não se dispõe das curvas de conjugado do motor e da carga, pode-se determinar o tempo de aceleração utilizando os valores dos conjugados de rotor bloqueado e máximo, a característica de conjugado resistente em função da velocidade da carga, as rotações do motor e da carga e a inércia total do sistema.

Desta forma, o conjugado médio acelerador pode ser determinado de acordo com a Equação 3.19 para cargas do tipo conjugado constante.

$$C_{ma} = 0,45.(C_{rb} + C_{\max}) - C_{rf} \cdot \frac{n_c}{n} \quad (3.19)$$

Para cargas do tipo conjugado linear, de acordo com a Equação 3.20.

$$C_{ma} = 0,45.(C_{rb} + C_{\max}) - 0,5.C_{rf} \cdot \frac{n_c}{n} \quad (3.20)$$

Para cargas do tipo conjugado parabólico, de acordo com a Equação 3.21.

$$C_{ma} = 0,50.(C_{rb} + C_{\max} - C_{rf} \cdot \frac{n_c}{n}) \quad (3.21)$$

Onde:

C_{ma} = conjugado médio de acelerador [N.m].

C_{rb} = conjugado de rotor bloqueado [N.m].

C_{\max} = conjugado máximo [N.m].

C_{rf} = conjugado referido ao eixo [N.m].

n_c = rotação da carga [rpm].

n = rotação [rpm].

Para casos onde o conjugado resistente varia de forma hiperbólica, a utilização deste método para determinação do tempo de aceleração é problemático, sendo que neste caso, não se consegue chegar a uma equação matemática. Para cargas onde o conjugado resistente não pode ser aproximado por função matemática, é impossível determinar o tempo de aceleração por este método.

O tempo de aceleração deve ser menor do que o tempo de rotor bloqueado, para que a carga seja acelerada, sem causar danos ao motor.

CAPÍTULO 4 – MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DE PERFORMANCE

4.1. PROTOCOLO INTERNACIONAL PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO DE PERFORMANCE

4.1.1. INTRODUÇÃO

O Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance fornece uma visão geral das práticas atualmente utilizadas para a verificação de resultados obtidos em projetos de eficiência energética (DOE, 1997).

O Protocolo encontra-se na segunda versão. A primeira foi disponibilizada no ano de 1996, e a segunda e mais recente versão, no ano de 2001.

O Protocolo recebeu apoio do Governo e da indústria internacional, sendo amplamente utilizado nos Estados Unidos. Foi publicado em 10 idiomas e está se tornando modelo industrial em países como Brasil, Coréia do Sul e Ucrânia. O Banco Mundial, por exemplo, utiliza o Protocolo de forma a assegurar a padronização de projetos, garantindo a confiabilidade e ampliando a capacidade de financiamentos.

A finalidade do Protocolo Internacional é aumentar os investimentos em eficiência energética, da seguinte maneira:

- a) Aumento das economias com energia.
- b) Redução do custo de financiamentos de projetos.
- c) Realização de bons projetos de engenharia.
- d) Redução da emissão de gases de efeito estufa.
- e) Gerenciamento de energia.
- f) Eficiência nos recursos e objetivos ambientais (IPMVP, 2000).

O Protocolo Internacional é dividido da seguinte maneira:

- Volume 1 – Conceitos e Opções para Determinar Economias.
- Volume 2 – Questões sobre Qualidade Ambiental Interna.

- Volume 3 – Aplicações.

O Volume 1 define os procedimentos gerais para a determinação de economias confiáveis e custo efetivo, destinando-se a aplicações gerais para medição e verificação de desempenho de projetos de eficiência energética em plantas industriais.

O Volume 2 diz respeito às questões de qualidade ambiental interna, que podem ser facilmente influenciadas por um projeto de eficiência energética. Descreve práticas para a implementação de projetos associadas à manutenção de condições internas aceitáveis, com recomendações relacionadas à medição e verificação de performance, bem como contratos de desempenho.

O Volume 3 apresenta questões sobre medição e verificação de resultados específicos para projetos em processos industriais. Esta publicação teve contribuição de mais de 100 especialistas internacionais.

O Protocolo Internacional fornece aos que trabalham com projetos de eficiência energética:

- Conjunto de termos sobre Medição e Verificação.
- Métodos que podem ser utilizados em contratos de desempenho.
- Técnicas para a quantificação da economia de energia elétrica de toda a instalação (por exemplo, prédios residenciais, comerciais, institucionais e industriais) bem como de uma tecnologia em particular.
- Procedimentos para aplicação das metodologias em projetos similares situados em todas as regiões geográficas, sendo internacionalmente aceitos, imparciais e confiáveis.
- Diferentes níveis de exatidão e custo para medição e verificação, como por exemplo, condições de base, instalação do projeto e economias de energia em longo prazo.

- Abordagem para assegurar a verificação das questões de qualidade ambiental interna em todas as fases do plano de ação, implementação e manutenção.

O Protocolo Internacional pode ser utilizado por gerentes de energia de instalações, incorporadores de projetos, empresas que prestam serviços em conservação de energia, organizações não-governamentais, instituições financeiras, consultores e pesquisadores (DOE, 1997).

4.1.2. IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM FINANCIAMENTOS DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

As boas práticas de medição e verificação permitem que os riscos da realização de um projeto de eficiência energética sejam entendidos e gerenciados de forma que possam garantir economias suficientes para o pagamento de financiamentos.

Desta maneira, faz-se necessário que cada plano de medição e verificação apresente claramente as tolerâncias associadas a cada método no tocante a determinação das economias, pois em alguns casos, podem existir desvios percentuais significativos.

Atualmente os investimentos podem ser provenientes de uma alocação interna de recursos, de Projetos de Eficiência Energética da ANEEL⁷, ou por meio de acordo contratual com uma empresa que presta serviços de conservação de energia (ESCO⁸) e outro financiador (INEE, 2003).

4.1.3. RISCOS DE FINANCIAMENTOS DE PROJETOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Todos os projetos de eficiência energética possuem um objetivo comum denominado retorno do investimento. Desta maneira, a viabilidade econômica de um projeto pode ser determinada pelo Tempo de Retorno do Investimento e pela Taxa Interna de Retorno.

⁷ Agência Nacional de Energia Elétrica.

⁸ Energy Service Company.

Essas figuras de mérito econômico estão relacionadas ao risco de um projeto. Normalmente, quanto maior o risco de um projeto, maior o retorno desejado. O Protocolo Internacional de Medição e Verificação fornece informações necessárias para a diminuição de incertezas na medição, permitindo a estruturação de um contrato de performance.

Deve-se salientar que cada investimento requer medidas de desempenho diferentes. Desta forma, o Protocolo Internacional oferece quatro opções de metodologias com o objetivo de suprir as necessidades de uma variedade de acordos de performance.

4.1.4. CONTRATO DE DESEMPENHO

Todo projeto de eficiência energética visa uma garantia de desempenho, sendo que um Contrato de Desempenho possui dois instrumentos distintos: a garantia e o contrato de empréstimo. A garantia compreende o valor de energia que será economizado, que combinado com as tarifas de energia elétrica é suficiente para quitar as obrigações do financiamento. Já o empréstimo é realizado entre o financiador e o cliente, ou a empresa de conservação de energia.

Após a criação de um contrato de empréstimo, as partes definem os riscos entre elas. Na maioria das vezes quem realiza o financiamento procura uma alocação mais segura dos riscos. A maior parte dos riscos de um projeto de eficiência energética está relacionada ao desempenho esperado.

Quem realiza o empréstimo deseja que o risco do desempenho seja apenas entre a empresa de conservação de energia e o cliente. É difícil para o financiador avaliar o merecimento de crédito, pois a receita mensal proveniente de um projeto de eficiência energética pode ser alterada por inúmeras variáveis (INEE, 2003).

4.1.5. ABORDAGEM BÁSICA

A redução de demanda e economia de energia elétrica são determinadas por meio da diferença entre os valores medidos no Ano Base⁹ e Pós-Retrofit¹⁰, de acordo com a Equação 4.1.

$$\text{Economias} = \text{Uso Energia Ano Base} - \text{Uso Energia Pós-Retrofit} \pm \text{Ajustamentos} \quad (4.1)$$

O termo ajustamentos faz-se necessário para criar um mesmo conjunto de condições de uso de energia em dois períodos de tempo. Esses ajustes compreendem fatores físicos identificáveis, que podem ser verificados rotineiramente ou quando há mudanças climáticas, adição de segundo turno, inclusão de novos ocupantes e aumento da utilização de equipamentos elétricos.

Os ajustes podem ser positivos ou negativos e ocorrem na maioria das vezes com o objetivo de estabelecer o uso da energia no Ano Base sob condições Pós-Retrofit.

Os ajustes também podem ser realizados de acordo com condições fixas pré-estabelecidas. As economias (ou uso evitado de energia) não são afetadas pelas condições do período Pós-Retrofit, mas refletem a operação sob um conjunto de condições já estabelecidas (IPMVP, 2000).

4.1.6. ETAPAS PARA DETERMINAÇÃO DAS ECONOMIAS

A determinação das economias de maneira adequada requer uma estrutura de ações. O Protocolo Internacional de Medição e Verificação recomenda uma abordagem básica por meio das seguintes etapas:

- a) Escolha de metodologia de medição e verificação que esteja de acordo com os objetivos pretendidos do projeto.

⁹ Período definido de qualquer extensão antes da implementação das ações para conservação/eficiência de energia.

¹⁰ Qualquer período de tempo seguinte ao comissionamento da ação.

- b) Registro de dados relevantes de consumo de energia elétrica e número de horas de operação no Ano Base.
- c) Projeto do Programa de Economias de Energia.
- d) Elaboração dos Planos de Medição e Verificação.
- e) Projeto, instalação e teste de qualquer equipamento de medição especial e necessário ao Plano de Medição e Verificação.
- f) Após implementação do programa, inspeção do equipamento instalado e revisão dos procedimentos de operação, assegurando que estes estejam de acordo com os objetivos do projeto.
- g) Aquisição de dados de consumo e operação do período Pós-Retrofit que estejam de acordo com o Ano Base e conforme definido no Plano de Medição e Verificação.
- h) Registro das economias de acordo com o Plano de Medição e Verificação (IPMVP, 2000).

4.1.7. METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO

Medição parcial de retrofit isolado

A determinação das economias é realizada por meio de medições parciais em campo do sistema onde foi realizado ações de eficiência energética, sendo que esse sistema deve obrigatoriamente estar separado do uso de energia elétrica do restante da instalação. Essas medições podem ser de curto prazo ou contínuas.

O termo parcial significa que apenas alguns parâmetros podem ser medidos, desde que o impacto total dos possíveis erros não seja tão significativo para as economias resultantes. Esses valores devem ser apresentados no Plano de Medição e Verificação junto com a análise da importância do erro que podem provocar.

Retrofit Isolado

As economias provenientes das ações de eficiência energética são determinadas por meio de medições em campo. O sistema onde foi aplicado essas ações deve estar separado do uso de energia do restante das instalações.

Toda Instalação

As economias provenientes de ações de eficiência energética são determinadas pela medição do uso de energia elétrica em toda a instalação. As medições são realizadas durante o período Pós-Retrofit e podem ser contínuas ou de curto prazo.

Simulação Calibrada

As economias provenientes de Projetos de Eficiência Energética são determinadas por meio da simulação do uso de energia de equipamentos ou de toda a instalação. Todas as etapas da simulação devem ser apresentadas para a validação da energia medida na instalação. Esta opção requer considerável habilidade em simulação calibrada. Essa simulação considera dados horários ou mensais da fatura da concessionária de energia elétrica e/ou medidor de uso final (INEE, 2003)

4.1.8. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO

De acordo com o Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance, a forma mais comum de registrar corrente alternada para aplicação de eficiência e economia de energia é por meio da utilização de um transformador de corrente (TC). Esse equipamento é conectado a um medidor de corrente ou potência, onde a tensão é verificada por uma conexão direta à fonte.

O Protocolo recomenda a utilização de medidores digitais de potência, pois muitas vezes dispositivos que produzem harmônicos pertencem ao mesmo circuito de medição, resultando em tensões com conteúdo harmônico no local de medição, como por exemplo, nos terminais de um motor elétrico.

Medições diretas de potência e energia são recomendadas devido à facilidade do equipamento digital em medir precisamente formas de onda distorcidas. Segundo o Protocolo Internacional, os equipamentos utilizados devem atender o padrão IEEE 519 (1992), com taxa de amostragem de 3 kHz onde houver presença de harmônicos. Os medidores de potência

também devem atender à Norma ANSI C12.16 (1991). Este padrão aplica-se a medidores de watt-hora, normalmente exigindo uma precisão de 1 a 2%, baseado na variação de carga, fator de potência e tensão.

De acordo com o Protocolo Internacional, motores elétricos com cargas constantes são exemplos de equipamentos que não precisam ser medidos com analisadores de potência de forma contínua para a determinação do consumo de energia elétrica (INEE, 2003).

Os equipamentos de medição utilizados nesta tese apresentam-se no Anexo A.

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIAS EXISTENTES

5.1. INTRODUÇÃO

As principais metodologias utilizadas na realização de estudos para substituição de motores elétricos dos tipos padrão e alto rendimento foram analisadas e serão apresentadas a seguir:

A metodologia denominada Convencional, que utiliza curvas de motores elétricos para a determinação do rendimento do motor, a metodologia que utiliza o programa BD Motor, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica da Eletrobrás - CEPEL, a metodologia que utiliza o programa denominado Mark IV, desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Itajubá, em parceria com o Procel / Eletrobrás e o *Software Motor Master*, desenvolvido pelo Departamento de Energia Norte-Americano - DoE.

Atualmente, todos os programas utilizados nesta tese estão disponíveis gratuitamente para *download* no site do Procel Info / Eletrobrás - www.procelinfo.com.br.

5.2. METODOLOGIA BD MOTOR

5.2.1. INTRODUÇÃO

O programa de simulação BD Motor possui um banco de dados com o cadastro de 1989 motores das marcas WEG, Kohlbach e Eberle, nas potências de 0,25 a 250 cv.

Este programa, criado pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica da Eletrobrás, tem por objetivo viabilizar a economia de energia elétrica em motores de indução trifásicos.

Para cada motor, o programa apresenta uma série de parâmetros, de acordo com a Figura 5.1 (BD Motor, 2003).

CADASTRO DE MOTORES = > 1989 Motores Cadastrados.

Sigla do Fabricante	Tipo	RPM	Grau de Proteção	Fabricante
EBERLE	Alto Rendimento	900	IP55	Cadastrar >>

Num. 1989

Potencia(CV)	150	Rendimento 50%	93.5	Momento de Inércia (kgm²)	23
Carcapa	315S/M	Rendimento 75%	94.8	Tempo com Rotor Bloqueado (s)	10
RPM Assinc.	890	Rendimento 100%	94.9	Nível de Ruído (dB)	74
Corrente Nominal (A)	398.6	Fator de Potência 50%	0.69	Peso(kg)	1149
Corrente Rotor Bloqueado	6.67	Fator de Potência 75%	0.75	Preço (R\$)	18385.9
Conjugado Nominal (kgfm)	121	Fator de Potência 100%	0.77	Garantia (Anos)	2
Conjugado Rotor Bloqueado	2	Fator de Serviço	1.15	Ano de Fabricação	2003
Conjugado Máximo	2.5				

Número do Motor |<|<| 1989 |>|>|

[AJUDA](#)
[Excluir](#)
[Incluir](#)
[Alterar](#)
[Aplicar](#)
[Retornar](#)

Figura 5.1 - Parâmetros apresentados pelo programa BD Motor para cada unidade selecionada.

Fonte: (BD Motor, 2003).

5.2.2. PARÂMETROS DO BD MOTOR

A seguir, serão descritos os parâmetros do programa BD Motor e seus respectivos significados:

a) Potência Nominal

Segundo a ABNT NBR 17094-1 (2008), a potência nominal pode ser definida como sendo aquela que o motor elétrico pode fornecer, dentro de suas características nominais, em regime contínuo.

Desta forma, se o motor acionar cargas maiores do que a sua potência nominal, sofre sobrecargas. Estas contribuem para a ultrapassagem do limite da temperatura do material isolante, tendo como conseqüências a diminuição drástica de sua vida útil e a possível queima do mesmo. Estudos demonstram que um aumento de 8 a 10 °C na temperatura de isolação é suficiente para reduzir a vida útil do motor pela metade (WEG, 2003).

b) Carcaça

O programa fornece as dimensões do motor elétrico, padronizadas de acordo com a ABNT NBR 15623 (2008).

Cada altura H da ponta de eixo está associada a uma dimensão C e várias dimensões B, podendo-se ter motores mais curtos ou mais longos.

A Figura 5.2 apresenta as dimensões de um motor elétrico de indução (WEG, 2003).

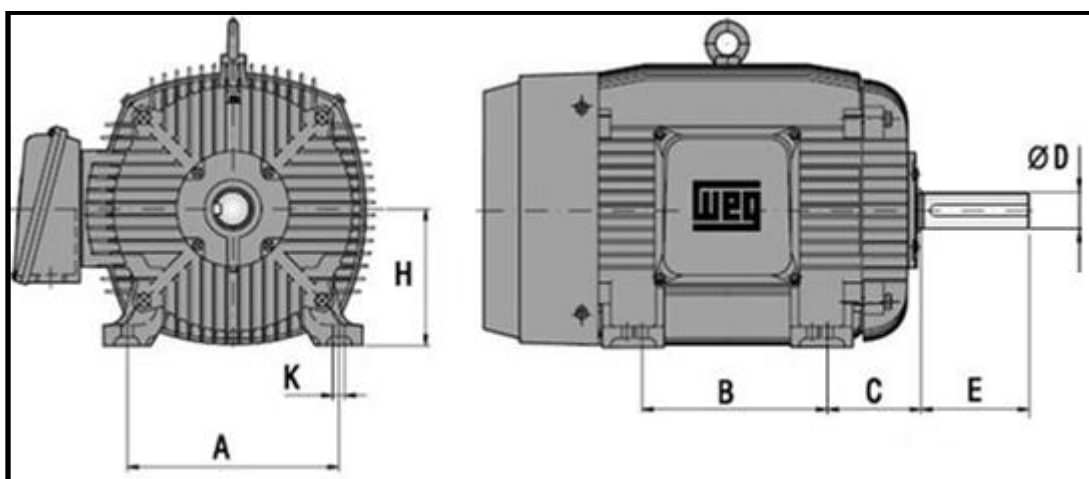


Figura 5.2 - Dimensões de um motor elétrico de indução.

Fonte: (Adaptado de WEG, 2003).

A Tabela 5.1 apresenta as dimensões, em milímetros, dos motores elétricos de indução.

Tabela 5.1 - Dimensões dos motores elétricos de indução [mm]

CARCAÇA	H	A	B	C	K	ϕD	E
63	63	100	80	40	7	11j6	23
71	71	112	90	45	7	14j6	30
80	80	125	100	50	10	19j6	40
90 S	90	140	100	56	10	24j6	50
90 L	90	140	125	56	10	24j6	50
100 L	100	160	140	63	12	28j6	60
112 S	112	190	114	70	12	28j6	60

112 M	112	190	140	70	12	28j6	60
132 S	132	216	140	89	12	38k6	80
132 M	132	216	178	89	12	38k6	80
160 M	160	254	210	108	15	42k6	110
160 L	160	254	254	108	15	42k6	110
180 M	180	279	241	121	15	48k6	110
180 L	180	279	279	121	15	48k6	110
200 M	200	318	267	133	19	55m6	110
200 L	200	318	305	133	19	55m6	110
225 S	225	356	286	149	19	60m6	140
225 M	225	356	311	149	19	60m6	140
250 S	250	406	311	168	24	65m6	140
250 M	250	406	349	168	24	65m6	140
280 S	280	457	368	190	24	75m6	140
280 M	280	457	419	190	24	75m6	140
315 S	315	508	406	216	28	80m6	170
315 M	315	508	457	216	28	80m6	170
355 M	355	610	560	254	28	100m6	210
355 L	355	610	630	254	28	100m6	210

c) Rotação Assíncrona

Conforme apresentado, o funcionamento do motor elétrico de indução baseia-se na formação de um campo girante, ocasionando a formação de correntes induzidas no rotor, que são responsáveis pelo trabalho mecânico do mesmo. Quando o motor está em vazio, este desenvolve uma velocidade angular próxima a do campo girante, velocidade esta que diminui à medida que se adiciona carga mecânica ao eixo.

Desta forma, o valor da velocidade assíncrona apresentado pelo BD Motor corresponde ao valor à plena carga, ou seja, carregamento¹¹ igual a 100 %.

¹¹ Carregamento = (Potência de Saída / Potência Nominal) x 100

A diferença entre as rotações síncrona e assíncrona é denominada de escorregamento e pode ser determinada de acordo a Equação 5.1.

$$s = \frac{n_s - n_{as}}{n_s} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Onde:

s = escorregamento [%].

n_s = rotação síncrona [rpm].

n_{as} = rotação assíncrona [rpm].

d) Corrente Nominal

Valor da intensidade de corrente elétrica solicitada pelo motor da rede de alimentação, à potência nominal, com frequência e tensão nominais. A intensidade de corrente para motores trifásicos pode ser determinada de acordo com a Equação 5.2.

$$I_N = \frac{736 \cdot P_N}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (5.2)$$

Onde:

I_N = corrente nominal [A].

P_N = potência nominal [cv].

U = tensão de linha [V].

η = rendimento.

$\cos \varphi$ = fator de potência.

e) Corrente com Rotor Bloqueado

O programa BD Motor apresenta a relação I/I_N da corrente de partida do motor elétrico. Esta relação é válida somente para partida direta, onde o motor é alimentado diretamente pela rede elétrica. Neste caso, deve-se considerar que as curvas de conjugado e corrente são fixas, para uma tensão constante.

A Figura 5.3 exemplifica a relação I/I_N e C/C_N para partida direta.

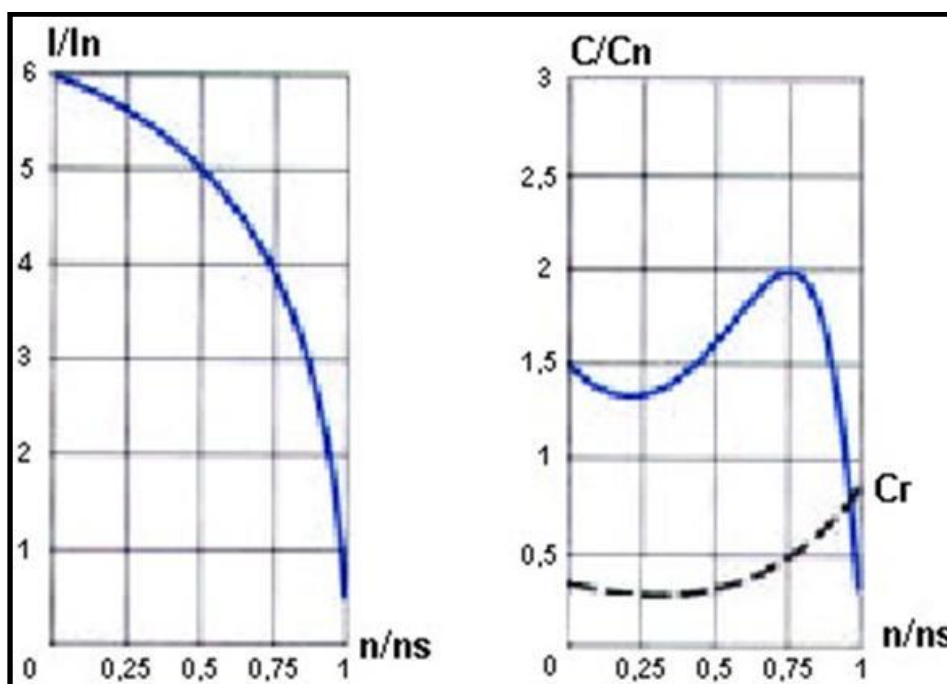


Figura 5.3 - Corrente e conjugado do motor para partida direta.

Fonte: (SCHNEIDER, 2004).

f) Conjugado Nominal

Definido como sendo a medida de esforço necessário para girar um eixo. O motor elétrico de indução possui valor de conjugado nominal quando alimentado sob tensão e frequência nominais.

g) Conjugado com Rotor Bloqueado

A ABNT NBR 17094-1 (2008) define o conjugado com rotor bloqueado como sendo aquele desenvolvido pelo motor quando este se encontra bloqueado, para todas as posições angulares do rotor sob tensão e frequência nominais. O valor do conjugado com rotor bloqueado deve ser o mais alto possível para que o motor seja capaz de vencer a inércia da carga rapidamente. O programa BD Motor apresenta o valor do conjugado com rotor bloqueado como múltiplo do conjugado nominal.

h) Conjugado Máximo

É definido como sendo o maior valor de conjugado desenvolvido pelo motor elétrico, sob tensão e frequência nominais. O valor do conjugado máximo é apresentado pelo programa BD Motor como múltiplo do conjugado nominal.

A Figura 5.4 apresenta uma curva de conjugado em função da rotação para um motor Categoria N.

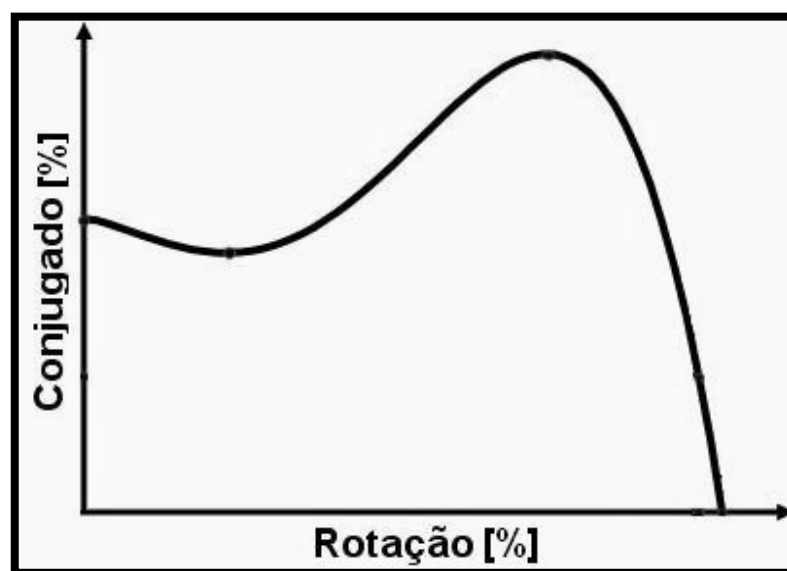


Figura 5.4 - Conjugado em função da rotação para um motor Categoria N.

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2003).

i) Rendimento 50 %

O rendimento de um motor elétrico pode ser definido como sendo a relação entre a potência mecânica e a potência elétrica¹². O programa BD Motor apresenta para este item o valor do rendimento do motor elétrico, quando este possui um carregamento de 50 %.

j) Rendimento 75 %

O programa BD Motor apresenta para este item o valor do rendimento do motor elétrico, quando este possui um carregamento de 75 %.

k) Rendimento 100 %

O programa BD Motor apresenta para este item o valor do rendimento do motor elétrico, quando este possui um carregamento de 100 %.

l) Fator de Potência 50 %

O programa BD Motor apresenta para este item o valor do fator de potência do motor elétrico, quando este possui um carregamento de 50 %.

m) Fator de Potência 75 %

O programa BD Motor apresenta para este item o valor do fator de potência do motor elétrico, quando este possui um carregamento de 75 %.

¹² $\eta = (\text{Potência de Saída} / \text{Potência de Entrada}) \times 100$

n) Fator de Potência 100 %

O programa BD Motor apresenta para este item o valor do fator de potência do motor elétrico, quando este possui um carregamento de 100 %.

o) Fator de Serviço

Fator que, ao ser multiplicado pela potência nominal do motor elétrico, indica o valor da carga que pode ser aplicada continuamente, sem causar danos no mesmo. O fator de serviço com valor unitário indica que o motor não foi projetado para funcionar com valores acima de sua potência nominal.

p) Momento de Inércia

Definido como sendo a resistência que os corpos oferecem à mudança de seu movimento de rotação em torno de um determinado eixo. O valor do momento de inércia é utilizado em estudos de redimensionamento motriz.

q) Tempo com Rotor Bloqueado

Apresenta o valor do tempo em que o motor pode ficar com seu rotor bloqueado, sem que o mesmo sofra danos. Este valor é utilizado em estudos de redimensionamento motriz, onde é comparado com o tempo de aceleração do conjunto motor-máquina.

r) Nível de Ruído

O programa BD Motor apresenta para cada unidade, o valor do nível de ruído sonoro do motor elétrico.

s) Massa

O BD Motor apresenta para cada unidade, o valor da massa do motor elétrico.

t) Preço

Valor monetário de cada unidade, atualizado para o ano de 2008. Este valor pode ser alterado a qualquer momento pelo usuário.

u) Garantia

Prazo de garantia de cada unidade fornecido pelo fabricante.

5.2.3. Seleção dos Motores Elétricos

Os motores elétricos podem ser selecionados por fabricante, rotação síncrona, tipo (padrão ou alto rendimento), potência, grau de proteção ou pela combinação destes.

O programa BD Motor permite a análise de um motor por vez ou a comparação de dois motores, como por exemplo, um motor em uso e um novo, ou um motor que necessita de reparos e um novo.

A Figura 5.5 apresenta a lista de alguns motores disponíveis para análise (BD MOTOR, 2003).

Dados:

Listar

Editar

Imprimir

Análise:

Comparar

Dimensionar

Fecha

AJUDA

Selecionar por:

Fabricante

rpm Sincrono

Tipo

Potência (cv)

Grau de Proteção

Todos

1800

Todos

100

Todos

Ordenar por:

Título

NUM

↓

↑

Num	Fabrica	Tipo	Gr. Prot.	rpm	cv	Carcaça	rpm Assinc.	In(A)	Icc(A)
183	EBERLE	Alto Rend.	IP54	1800	100	250 S/M	1780	233.4	8.2
184	EBERLE	Alto Rend.	IP54	1800	100	250 S/M	1780	233.4	8.2
185	EBERLE	Alto Rend.	IP54	1800	100	250 S/M	1780	233.4	8.2
344	EBERLE	Padrão	IP54	1800	100	250 S/M	1770	236	5.9
444	KOHLBACH	Padrão	IP54	1800	100	250 S/M	1775	241	7
532	WEG	Alto Rend.	IP54	1800	100	250 S/M	1775	230	8
637	WEG	Padrão	IP54	1800	100	250 S/M	1775	240	8.8
768	KOHLBACH	Padrão	IP56	1800	100	250S/M	1775	228	8.8
876	KOHLBACH	Alto Rend.	IP56	1800	100	250S/M	1780	226	9.2
988	WEG	Padrão	IP55	1800	100	250S/M	1775	245	8.8
1100	WEG	Alto Rend.	IP55	1800	100	250S/M	1780	242	7.8
1217	EBERLE	Padrão	IP55	1800	100	250S/M	1770	237.4	7
1318	EBERLE	Alto Rend.	IP55	1800	100	250S/M	1780	233.1	8.2
1398	WEG	Padrão	IP55	1800	100	250S/M	1775	243	8.8
1506	WEG	Alto Rend.	IP55	1800	100	250S/M	1780	245	8.4
1614	KOHLBACH	Padrão	IP56	1800	100	250S/M	1775	228	8.8
1722	KOHLBACH	Alto Rend.	IP56	1800	100	250S/M	1780	226	9.2
1832	EBERLE	Padrão	IP55	1800	100	250S/M	1770	238.5	6.98

Figura 5.5 - Lista de motores elétricos.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

5.2.4. Dimensionamento

As condições de operação do motor elétrico podem ser obtidas por meio da opção "Dimensionar por", utilizando os parâmetros de entrada intensidade de corrente elétrica, potência elétrica ativa e escorregamento.

Comparando esses dados de entrada com os parâmetros elétricos e mecânicos fornecidos pelos fabricantes, o programa faz uma análise e apresenta as condições de operação do motor elétrico, por meio dos valores da potência mecânica de saída e do carregamento.

A Figura 5.6 apresenta as condições de operação de um motor de 100 cv na opção de dimensionamento por potência de entrada (BD MOTOR, 2003).

Dimensionamento por Potência >>> Motor 1398 - WEG

Potência de Saída cv Kw

	Rendimento [%]	Potência Entrada	Potência Saída
50 %	<input type="text" value="91.50"/>	<input type="text" value="40.22"/> Kw	<input type="text" value="36.80"/> Kw
75 %	<input type="text" value="92.50"/>	<input type="text" value="59.68"/> Kw	<input type="text" value="55.20"/> Kw
100 %	<input type="text" value="93.20"/>	<input type="text" value="78.97"/> Kw	<input type="text" value="73.60"/> Kw

Potência de Entrada Medida >>> Kw

Potência de Saída Kw P. saída/P.nominal %

Figura 5.6 - Condições de operação de um motor de 100 cv para dimensionamento por potência de entrada.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

A Figura 5.7 apresenta as condições de operação de um motor de 100 cv na opção de dimensionamento por intensidade de corrente (BD MOTOR, 2003).

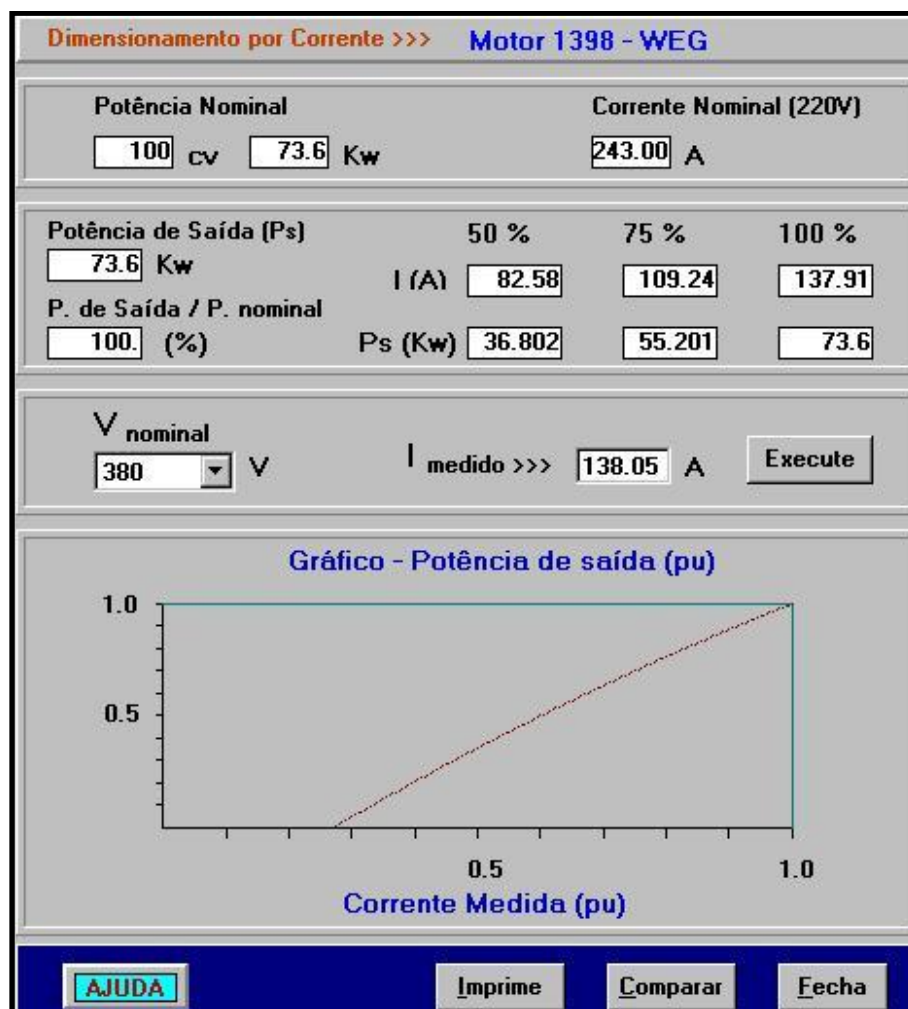


Figura 5.7 - Condições de operação de um motor de 100 cv para dimensionamento por intensidade de corrente.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

A Figura 5.8. apresenta as condições de operação de um motor de 100 cv na opção de dimensionamento por escorregamento (BD MOTOR, 2003).

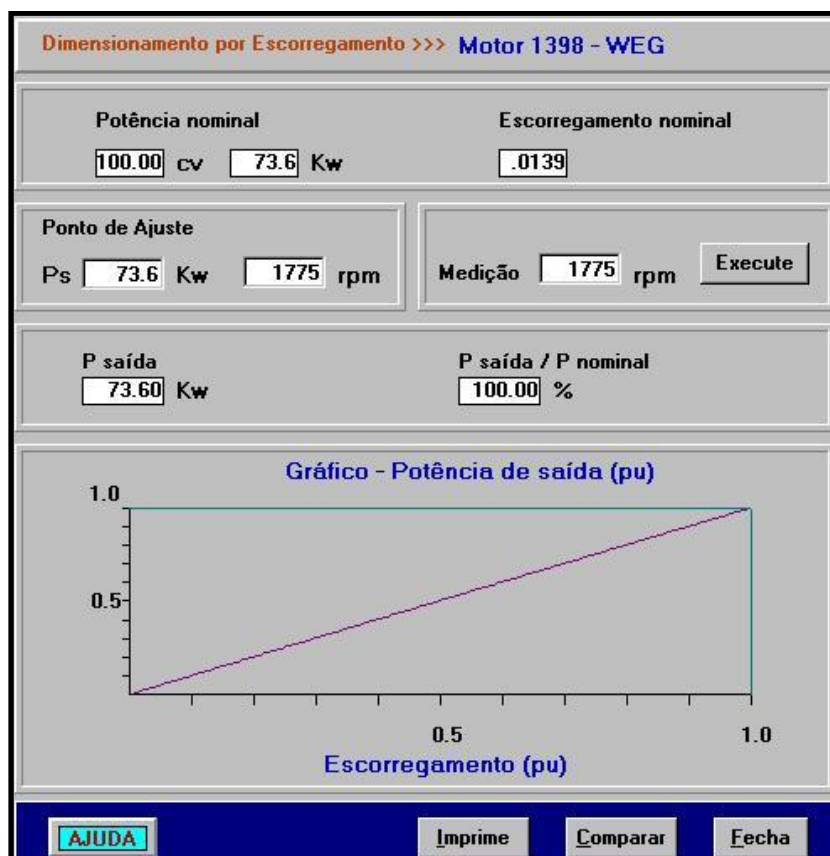


Figura 5.8 - Condições de operação de um motor de 100 cv para dimensionamento por escorregamento.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

5.2.5. CRITÉRIOS DE ANÁLISE

O programa BD Motor utiliza os seguintes critérios para análise das condições de operação do motor.

Carregamento < 40%

Motor sobredimensionado. Neste caso, o usuário pode optar pela seleção de um motor mais adequado a carga, disponível no banco de dados.

Carregamento entre 50 e 75 %

A substituição deve ser analisada criteriosamente pelo usuário. Neste caso, o programa recomenda o dimensionamento por potência de entrada.

Carregamento entre 75 e 100 %

O programa considera o motor bem dimensionado.

Carregamento entre 100 e 125 %

O programa considera o motor subdimensionado. Neste caso, o usuário deve verificar se este possui fator de serviço, analisando a necessidade ou não de substituição.

Carregamento entre 125 e 150 %

O BD Motor considera o motor subdimensionado sendo que o usuário deve selecionar um motor de maior potência.

5.2.6. ANÁLISE ECONÔMICA

Para a realização da análise econômica, o programa solicita ao usuário o preenchimento dos seguintes dados (condição válida somente quando há seleção de dois motores):

- a) **Carregamento:** opções de 50, 75, 100 %.
- b) **Funcionamento:** número de horas estimado de operação do motor por ano.
- c) **Carga centrífuga:** opção de seleção de análise considerando cargas centrífugas (ventiladores, bombas e compressores centrífugos). Isto, devido ao fato do consumo de

energia elétrica ser influenciado pela rotação. Para estas cargas, a potência de saída varia com o cubo da velocidade do motor (WEG, 2003).

- d) Tarifa de consumo:** o usuário deve fornecer o valor médio das tarifas de consumo de energia elétrica disponibilizadas pela concessionária ou por meio das Resoluções Homologatórias da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

Como resultados, o programa apresenta os valores de consumo anual de energia elétrica, tempo de retorno do investimento e o custo anual de energia economizada.

A Figura 5.9 apresenta os resultados fornecidos pelo BD Motor para comparação entre dois motores de 100 cv, dos tipos padrão e alto rendimento (BD MOTOR, 2003).

Motor 1398 - WEG		Motor 1506 - WEG	
Potência (cv)	100	Potência (cv)	100
Carga (%)	75	Carga (%)	75
Rendimento (%)	92.5	Rendimento (%)	94.2
Perda Rend. (%)	3	Preço (R\$)	8422.67
Total Horas (Ano)	8000	Desconto (%)	0
Tarifa média de energia 0.200 (R\$/kWh)		Carga Centrífuga <input checked="" type="radio"/> Sim <input type="radio"/> Não	
		<input type="button" value="Execute"/>	
		<input type="button" value="Fecha"/>	
Consumo Ativo no Ano (kWh - R\$)			
493407.82 kWh		471756.82 kWh	
98681.56 R\$		94351.36 R\$	
Retorno da diferença do investimento (Payback) - Motor 1506			
23 meses			
Diferença Invest. : 8422.67 R\$		Economia por Ano : 21651.00 Kwh 4330.20 R\$	
		<input type="button" value="Imprime"/>	

Figura 5.9 - Análise econômica entre motores de 100 cv, padrão e alto rendimento.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

5.3. METODOLOGIA CONVENCIONAL

O método denominado convencional utiliza as curvas dos motores elétricos disponibilizadas pelos fabricantes a fim de determinar as condições de operação do mesmo em regime de funcionamento.

Esta metodologia resulta em muitas imprecisões, pois a leitura das curvas é realizada pelo usuário. Outro problema está relacionado com a não disponibilidade por parte do fabricante das curvas antigas dos motores elétricos, sendo este fato relevante do ponto de vista da determinação do rendimento do motor, pois o mesmo pode apresentar perda de rendimento devido ao elevado tempo de funcionamento, más condições ambientes ou mesmo rebobinagens.

O fabricante nacional de motores elétricos WEG, disponibiliza em seu *site* na *internet*, as curvas de desempenho dos seus motores. Para esta tese, serão utilizadas somente as curvas específicas de motores elétricos de indução de baixa tensão com rotor do tipo gaiola, dos tipos padrão e alto rendimento, abrangendo as potências de 0,16 cv a 350 cv, para motores de 2 pólos; 0,16 cv a 500 cv, para motores de 4 pólos; 0,16 cv a 450 cv, para motores de 6 pólos e 0,16 cv a 350 cv, para motores de 8 pólos.

As curvas de desempenho de um motor de indução de gaiola, 400 cv - 4 pólos, 380 V, do tipo padrão, são apresentadas na Figura 5.10, segundo WEG (2006).

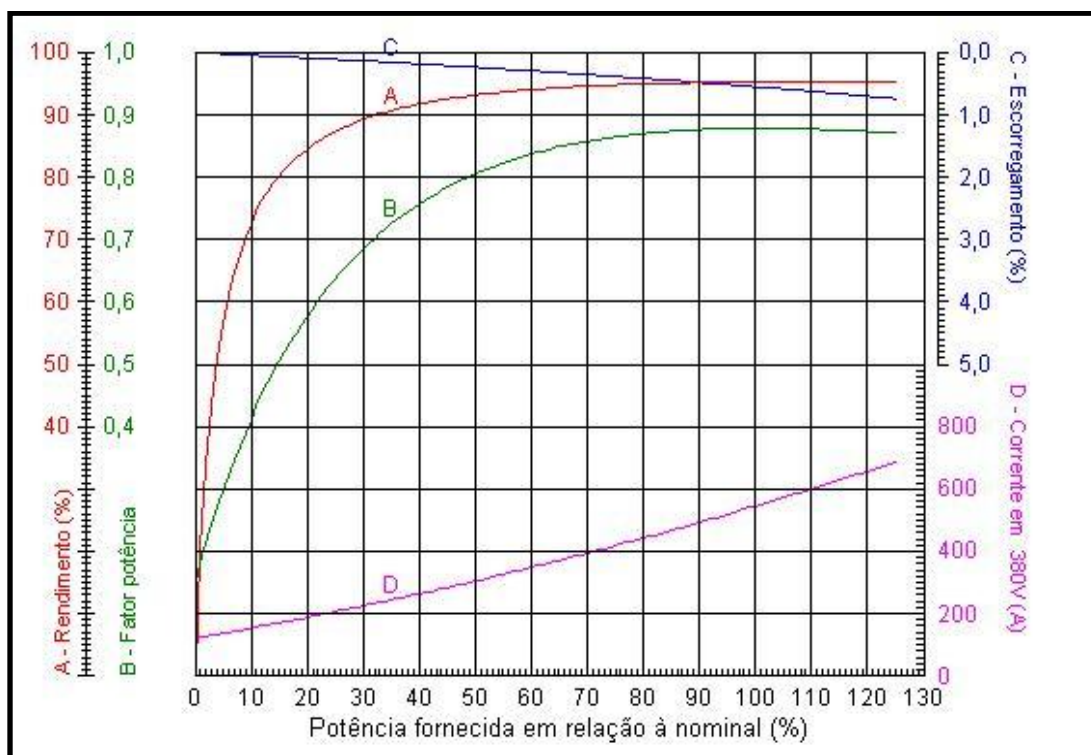


Figura 5.10 - Curvas de desempenho de um motor de indução de gaiola (400 cv, 4 pólos - Tipo Padrão - 380 V).

Fonte: (WEG, 2006).

Analisando a Figura 5.10, pode-se observar que todos os parâmetros do motor elétrico variam em função do carregamento.

Primeiramente, por meio da utilização de um alicate amperímetro, mede-se a intensidade de corrente elétrica do motor nas condições nominais de operação.

Através das curvas de desempenho disponibilizadas pelo fabricante especificamente para o motor em análise, determinam-se os valores do rendimento e fator de potência, conforme apresenta a Figura 5.11 (WEG, 2006).

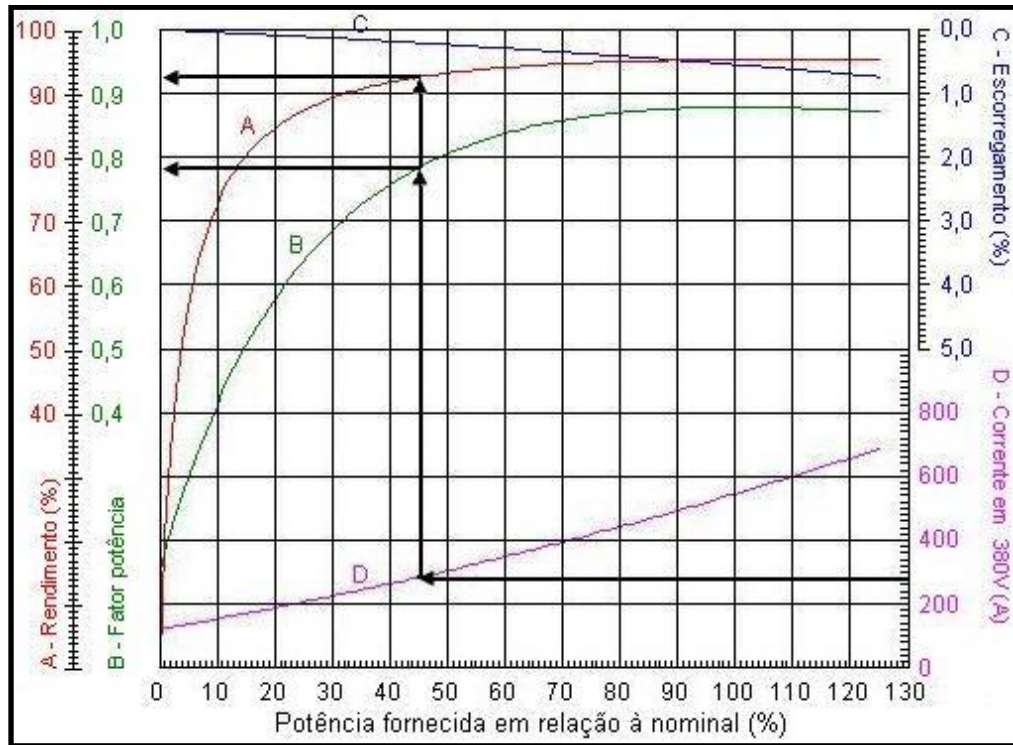


Figura 5.11 - Determinação do rendimento e fator de potência de um motor elétrico de indução (400 cv, 4 pólos - Tipo Padrão - 380 V).

Fonte: (Adaptado de WEG, 2006).

Com esses valores, pode-se determinar a potência ativa trifásica do motor, de acordo com a Equação 5.3.

$$P = \sqrt{3}.U_L.I_L.\cos \varphi_{graf} \quad (5.3)$$

Onde:

P = Potência ativa [kW].

U_L = Tensão de linha [V].

I_L = Intensidade de corrente de linha [A].

$\cos \varphi_{graf}$ = Fator de potência, determinado graficamente.

Por meio dos valores de potência ativa e rendimento, determina-se a potência mecânica exigida pela carga, de acordo com a Equação 5.4.

$$P_m = \frac{P \cdot \eta}{0,736} \quad (5.4)$$

Onde:

P_m = potência mecânica exigida pela carga [cv].

P = potência ativa [kW].

η = rendimento do motor elétrico, determinado graficamente.

Em seguida, verifica-se o carregamento, ou seja, a condição de operação do motor elétrico, de acordo com a Equação 5.5.

$$C_{rr} = \frac{P_m}{P_n} \cdot 100 \quad (5.5)$$

Onde:

C_{rr} = carregamento [%].

P_m = potência mecânica exigida pela carga [cv].

P_n = potência nominal do motor elétrico [cv].

Valores superiores a 75 % representam um bom dimensionamento motriz. Valores abaixo de 75 % deve-se selecionar um motor com potência inferior ao valor determinado de potência mecânica.

Caso o motor selecionado tenha um valor de carregamento satisfatório, utilizam-se as curvas de desempenho do novo motor para se determinar a intensidade de corrente elétrica e o fator de potência, conforme apresenta a Figura 5.12 (WEG, 2006).

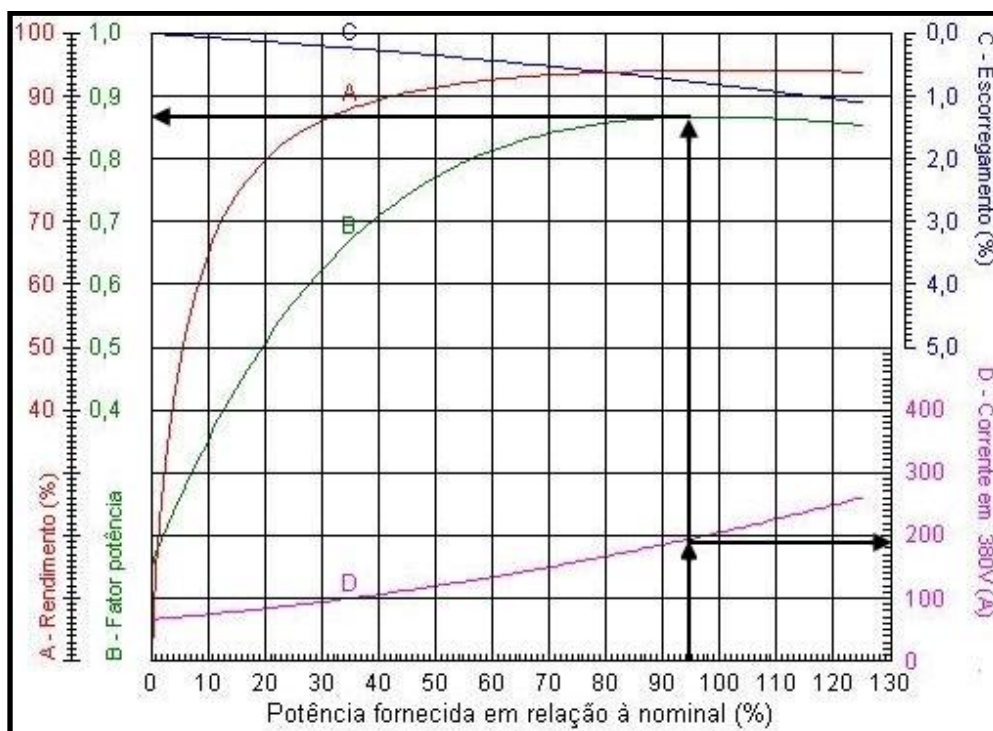


Figura 5.12 - Determinação da intensidade de corrente elétrica e fator de potência de um motor elétrico trifásico de indução (250 cv, 4 pólos - Tipo Padrão - 380 V).

Fonte: (Adaptado de WEG, 2006).

Em seguida, calcula-se o novo valor da potência ativa, conforme Equação 5.3.

Finalmente, determinam-se a redução de potência decorrente da substituição do motor elétrico e a economia de energia elétrica proporcionada, conhecendo-se o regime de funcionamento.

5.4. METODOLOGIA MARK IV

5.4.1. INTRODUÇÃO

O programa Mark IV Plus foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, em parceria com o PROCEL / ELETROBRÁS.

Este programa tem por objetivo auxiliar usuários no tocante à verificação de suas instalações industriais, bem como análise das condições de operação de vários equipamentos de uso final. Nesta tese, será focado apenas o módulo de motores elétricos de indução trifásicos.

Este módulo possui um banco de dados com vários motores cadastrados, com a opção de inserção de novos motores, auxiliando o usuário na hora de avaliar seu equipamento de uso final.

A tela de apresentação do Mark IV é apresentada na Figura 5.13 (MARK IV, 2002).



Figura 5.13 - Tela de apresentação do programa Mark IV.

Fonte: (MARK IV, 2002).

O módulo de motores elétricos é dividido em etapas, onde o usuário deve preencher alguns dados de placa do motor ou catálogo do fabricante, bem como dados de medições efetuadas em campo.

Após a avaliação dos dados, o programa apresenta as condições de funcionamento do motor elétrico e também uma análise econômica.

5.4.2. FUNCIONAMENTO

Na etapa inicial, o programa oferece a opção de identificação do motor elétrico, onde o usuário tem a possibilidade de preencher os valores de placa do equipamento que está sendo analisado.

Dentre as opções, tem-se a marca do motor, tensão de operação, intensidade de corrente nominal, potência nominal, número de fases, rotação assíncrona e fator de serviço. A Figura 5.14 apresenta a etapa de identificação do motor elétrico (MARK IV, 2002).

Identificação do Motor

Motor Exemplo

Dados de Placa

Marca	Produção
Tensão [V]	440
Corrente Nominal (In) [A]	19
Potência Nominal (Pn)	15
Unidade da Potência	cv
Fases	Trifásico
Rotação [rpm]	1755
Fator de Serviço [pu]	1.15

< Retornar Avançar >

Figura 5.14 - Identificação do motor elétrico.

Fonte: (MARK IV, 2002).

Em seguida, o programa solicita dados adicionais, como o estado de conservação do motor, com opções para condições precárias ou boas condições. O programa também solicita as condições da conexão e o estado do isolamento dos cabos.

O usuário também deve escolher o tipo de transmissão (acoplamento direto, engrenagem, polia/correia, eletromagnética e outros), bem como informar o estado em que a mesma se encontra (normal, danificada, desalinhada ou precária).

A Figura 5.15 apresenta a tela para o preenchimento de dados adicionais (MARK IV, 2002).



Figura 5.15 - Tela para preenchimento de dados adicionais.

Fonte: (MARK IV, 2002).

Na etapa seguinte, o usuário deve completar os dados de rendimento do motor elétrico, em relação às opções de carregamentos de 50, 75 e 100%. Esses dados podem ser retirados do catálogo do fabricante.

Deve-se também completar os dados do fator de potência para carregamentos de 50, 75 e 100%. Esses valores também podem ser retirados do catálogo do fabricante.

Nesta mesma etapa, tem-se a opção de funcionamento (permanente ou intermitente) e o tipo de acionamento (bombas, ventiladores, compressores, esteiras, guinchos, elevadores, compressores de pistão, bobinadeiras e máquinas operatrizes).

A Figura 5.16 apresenta a etapa de entrada de dados para rendimento, fator de potência e características da carga (MARK IV, 2002).



The screenshot shows a software window titled 'Motores' with a vertical orange bar on the left containing the word 'Motores' and a smiley face icon. The main area is divided into three sections:

- Rendimento pela Carga**: A table with three rows for load percentages and their corresponding efficiency values.

Carga [%]	Rendimento [%]
A 100% de Carga	93.2
A 75% de Carga	92.5
A 50% de Carga	91.5
- Fator de Potência pela Carga**: A table with three rows for load percentages and their corresponding power factor values.

Carga	Fator de Potência
A 100% de Carga	0.87
A 75% de Carga	0.83
A 50% de Carga	0.74
- Característica da Carga**: Two dropdown menus. The first is labeled 'Funcionamento' and has 'Permanente' selected. The second is labeled 'Tipo' and has 'Bombas, Ventiladores, Com' selected.

At the bottom right, there are two buttons: '< Retornar' and 'Avançar >'.

Figura 5.16 - Entrada de dados para rendimento, fator de potência e características da carga.

Fonte: (Mark IV, 2002).

Na tela seguinte, o usuário deve entrar com os dados verificados em campo: tensão de linha, rotação ou intensidade de corrente elétrica. Deve-se preencher também, o número de dias de funcionamento no mês, bem como o número de funcionamento no horário de ponta e fora de ponta.

A Figura 5.17 apresenta a tela para entrada de dados de medições realizadas em campo (MARK IV, 2002).



The screenshot shows a software window titled 'Motores' with a vertical orange bar on the left containing the word 'Motores' and a smiley face icon. The main area is divided into three sections: 'Medições', 'Funcionamento', and 'Horas por Dia'. Each section contains input fields for specific data points.

Medições	
Tensão no Motor [V]	380
Medida Escolhida	Rotação com Carga [rpm]
Valor da Medição	1770

Funcionamento	
Dias por Mês [dias]	30

Horas por Dia	
Fora de Ponta [horas]	21
Na Ponta [horas]	3

At the bottom right, there are two buttons: '< Retornar' and 'Salvar'.

Figura 5.17 - Tela de entrada de dados coletados em campo.

Fonte: (MARK IV, 2002).

5.4.3. RESULTADOS

Os resultados do motor em análise apresentados pelo programa MARK IV dizem respeito às condições de operação do mesmo. O carregamento é apresentado em valor percentual da plena carga.

O programa também fornece o valor do rendimento do motor no ponto de funcionamento, bem como o valor do fator de potência.

Por fim, o MARK IV disponibiliza ao usuário um relatório que descreve os principais problemas encontrados e as possíveis melhorias, como também a situação de carregamento do motor elétrico (adequada ou não).

5.4.4. CADASTRO DE NOVOS MOTORES

O programa oferece a opção de cadastro de novos motores, por meio da inserção de dados disponíveis em catálogos de fabricantes.

Os dados solicitados para o cadastro são os seguintes: tipo do motor (monofásico ou trifásico), rotação, potência nominal, rendimento (para carregamentos de 50, 75 e 100 %) e fator de potência (para carregamentos de 50, 75 e 100 %).

5.4.5. ANÁLISE ECONÔMICA

O programa auxilia o usuário disponibilizando um relatório de análise econômica, apresentando a viabilidade ou não para a substituição motriz.

Como dados de entrada, o programa solicita o valor da taxa anual de juros, taxa mínima anual de atratividade e o período de análise.

Em seguida, o MARK IV solicita o preenchimento dos dados do investimento, vida útil do motor elétrico, valor residual do equipamento substituído, valor residual de troca após a vida útil e custos com manutenção durante a vida útil.

Como resultado, o programa apresenta a análise econômica com as seguintes figuras de mérito: Valor Presente Líquido, Tempo de Retorno do Investimento e Taxa Interna de Retorno.

Como conclusão, o MARK IV apresenta a situação de investimento viável ou não.

5.5. METODOLOGIA MOTOR MASTER

5.5.1. INTRODUÇÃO

O programa Motor Master foi desenvolvido pelo Departamento de Energia Norte-Americano, sendo utilizado em diversos países.

A tela principal do programa é apresentada na Figura 5.18 (MOTOR MASTER, 2005).

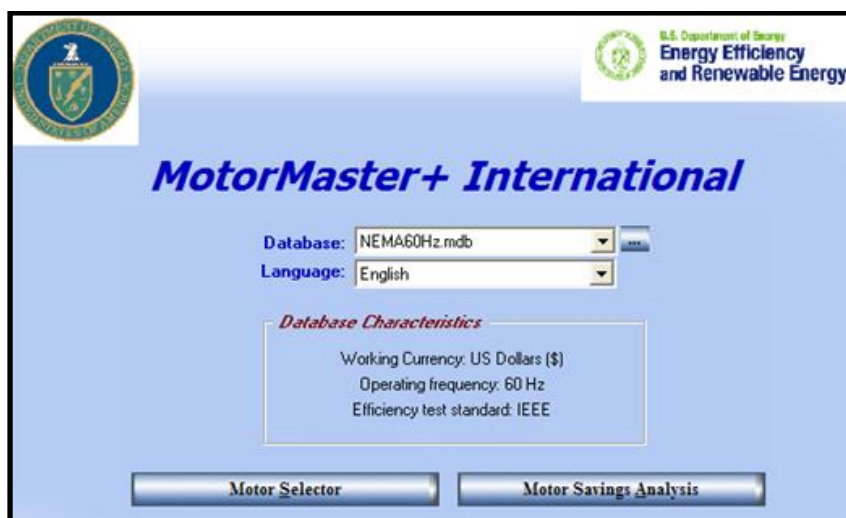


Figura 5.18 - Tela inicial do Motor Master.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

5.5.2. FUNCIONAMENTO

Primeiramente, o programa Motor Master solicita ao usuário o preenchimento de dados relacionados à empresa onde serão realizadas as simulações. Dentre os dados mais importantes solicitados nessa etapa estão o segmento industrial, setores que a empresa possui e unidades produzidas de determinado produto onde estão instalados os motores que serão analisados.

Em seguida, o usuário deverá selecionar um motor que seja compatível ao que está atualmente instalado, fornecendo os seguintes dados:

- a. Norma (IEC, NEMA).
- b. Rotação.

- c. Potência.
- d. Tensão.
- e. Tipo de construção (totalmente fechado, protegido contra respingos d'água, a prova de explosão, não ventilado e protegido contra jatos d água).

A seleção do motor também pode ser feita por: fabricante, fator de potência, preço e conjugado com rotor bloqueado.

A Figura 5.19 apresenta a tela do programa com alguns motores selecionados (MOTOR MASTER, 2005).

The screenshot shows the 'Motor Catalog Query - LIST' window. It has a menu bar with 'Query' and 'Help'. Below the menu are buttons for 'Search', 'Select', 'Clear', 'Detail', 'Reset Cols', a printer icon, a help icon, and an 'Exit' button. The 'Motor Characteristics' section includes dropdowns for 'Motor type' (IEC (Metric)), 'Enclosure' (Totally Enclosed Fan-Cooled), 'Speed' (1800 RPM), 'Size' (55 - 75 kW - HP), and 'Voltage' (440). There are also checkboxes for 'U-Frame', 'C-Face', 'Vertical shaft', and 'D-Flange'. The 'Definite Purpose' is set to '- General purpose motors -'. The 'Manufacturers (1 selected)' list shows 'WEG Electric Motors' selected. The 'Sort Column' is 'Efficiency', with 'Ascending' selected. The 'Utility Rebate Schedule' is 'No rebate selection'. A status bar indicates '1 motor found'. The table below lists the selected motors.

Manufacturer	Model	List Price	Catalog	Voltage	Enclosure	Eff 100%
Energy Policy Act 1992	FL Energy Efficiency		Standard		TEFC	941.0
WEG Electric Motors	Tru Metric - Cast Iron	5.286	05518EP3E250	230/460 volts	TEFC	941.0
Premium Efficiency	NEMA Table 12-12		MG 1-2003		TEFC	954.0

Figura 5.19 - Lista de motores selecionados no programa Motor Master.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

Após a seleção do motor, o usuário pode ver em detalhes os dados de catálogo. Esses dados são os seguintes:

- a. Fabricante.
- b. Modelo.
- c. Norma.
- d. Potência [hp].
- e. Rotação síncrona [rpm].
- f. Rotação assíncrona [rpm].
- g. Tipo de construção.
- h. Fator de serviço.
- i. Massa [lb]¹³
- j. Preço [US\$].
- k. Garantia [anos].
- l. Rendimento (Carregamentos de 25, 50, 75 e 100%).
- m. Fator de potência (Carregamentos de 25, 50, 75 e 100%).
- n. Conjugado [ft.lb]¹⁴.
- o. Tempo com rotor bloqueado [s].

A Figura 5.20 apresenta os dados de catálogo disponíveis no Motor Master, para um motor da marca WEG (MOTOR MASTER, 2005).

The screenshot shows the 'Motor Catalog Detail' window with the following data:

Manufacturer		Efficiency (%)		Power Factor (%)	
WEG Electric Motors		Full Load	94.1	Full Load	88.0
Model: Tru Metric - Cast Iron		75% Load	94.1	75% Load	84.0
Catalog: 05518EP3E2505		50% Load	93.0	50% Load	75.0
Motor type: IEC (Metric)		25% Load		25% Load	
Size (kW - HP): 55 - 75	Full load speed (RPM): 1780	Torque (ft-lbs)		Amperage (amps)	
Speed (RPM): 1800		Full Load	218.2	Full Load	83.4
Enclosure type: TEFC	Frame No.: 250S/M	Breakdown	763.7	Idle	31.0
Voltage rating: 230/460 volts		Locked Rotor	676.4	Locked Rotor	683.9
Definite purpose:		Stalled rotor time (sec.)		Peak voltage	
U-Frame <input type="checkbox"/>	C-Face <input type="checkbox"/>	Hot	20.0	@ 0 ms.	
Vertical shaft <input type="checkbox"/>	D-Flange <input type="checkbox"/>	Cold	44.0	@ 5 ms.	
Service factor: 1.15	Insulation Class: F	Rotor bars: 0		Stator slots: 0	
Weight (lbs.): 1063.0	List Price (\$): 5286				
Winding resistance (mOhms@25C):	Warranty (yrs): 2.0				

Figura 5.20 - Tela de dados de um motor elétrico da marca WEG.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

¹³ 1 [lb] = 0,45359237 [kg]

¹⁴ 1 [ft.lb] = 0,138 [kgf.m]

Na etapa seguinte, o programa apresenta um comparativo entre o motor atual e um motor novo. Nesta etapa, o usuário deve obrigatoriamente preencher os seguintes dados:

- a. Empresa.
- b. Regime de funcionamento.
- c. Setor de produção.
- d. Preço da energia [US\$/kWh].
- e. Preço da demanda [US\$/kW].
- f. Potência [hp].
- g. Rotação [rpm].
- h. Tipo de construção.
- i. Funcionamento [horas/ano].
- j. Carregamento [%].
- k. Taxa de desconto [%].
- l. Preço do motor novo [US\$].
- m. Preço de instalação do motor novo [US\$].

A Figura 5.21 apresenta a tela de entrada de dados para a opção de comparação entre dois motores (MOTOR MASTER, 2005).

Motor Description and Features		Existing <Avg Std Efficiency>	Premium Efficiency <Avg Premium Efficiency>
Size/Speed	50 hp 1800 RPM	50 hp 1800 RPM	50 hp 1800 RPM
Enclosure/Voltage	TEFC 440 Volts	TEFC 440 Volts	TEFC 440 Volts
Hours use/yr	8760	8760	8760
Load (%)	75.0	75.0	75.0
Efficiency (%)	91.6	91.6	94.9
Full load RPM			
Old Motor Effic Loss			25.0
Dealer discount (%)			3183
Purchase Price (\$)			200
Installation Cost (\$)			
Motor Rebate (\$)			
Peak Months			

Figura 5.21 - Tela de comparação entre dois motores.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

5.5.3. ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA

O programa de simulação também oferece análise econômica e financeira.

Para a análise econômica, é necessário que o usuário informe os custos de investimento, custos com a instalação do motor e custos com operação e manutenção durante o ano.

Para a análise financeira, o usuário deve informar dados referentes à taxa de desconto, empréstimo e atratividade do mercado.

Outros dados como ano base da simulação, ano de operação, vida útil do motor e depreciação, também devem ser considerados.

Como resultados, o programa apresenta uma análise das economias obtidas por meio da substituição motriz, como por exemplo:

- Economia de energia elétrica [kWh/ano].
- Redução de demanda [kW].

Por fim, o Motor Master apresenta um relatório abrangendo dados de economia de energia elétrica e redução de demanda, bem como um relatório global sobre redução do consumo de energia.

A Figura 5.22 apresenta a tela de relatórios de economias do programa Motor Master (MOTOR MASTER, 2005).

CAPÍTULO 6 – ENSAIOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

6.1. INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA

O Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo foi fundado oficialmente em 11 de dezembro de 1940, por meio do Decreto-Lei N° 11.684.

Porém, nesta data o IEE emitia o relatório de ensaio oficial N° 765, comprovando que sua história começou anteriormente a data de fundação.

Em 1911, a Escola Politécnica criou o curso para a formação de engenheiro na área elétrica, devido à preocupação em apoiar técnico-cientificamente o segmento industrial, nos primeiros passos da eletricidade. Nesta época, a Escola Politécnica foi marcada por forte presença de catedráticos responsáveis pela estruturação dos cursos e pelas aulas teóricas, sendo que seus assistentes, engenheiros de muita experiência prática devido à atuação em indústrias privadas ou órgãos técnicos do governo, conheciam os problemas enfrentados pelo segmento na época.

Assim, empresas em número crescente procuravam o “Gabinete de Eletrotechnica” para pesquisas e ensaios. Este era o começo do que depois viria a ser a característica principal do Instituto.

No ano de 1920 as aulas de mecânica aplicada e eletricidade começaram a ser ministradas no recém inaugurado edifício Ramos de Azevedo, localizado ao lado do edifício Paula Souza. Este edifício, projetado inicialmente para ser um grupo escolar, foi adaptado às necessidades dos cursos da Escola Politécnica e também para receber o pequeno laboratório especializado em eletrotécnica.

A Figura 6.1 apresenta a vista do edifício Ramos de Azevedo na década de 1940 (CASELLA, s.d.).



Figura 6.1 - Edifício Ramos de Azevedo - São Paulo.

Fonte: (CASELLA, s.d.).

Em 1960 a Escola Politécnica desocupou o edifício Ramos de Azevedo, mudando-se para as novas instalações no campus da Cidade Universitária, sendo que o IEE passou a utilizá-lo até que, em 1988, também foi transferido para o mesmo local.

O ensaio N° 1, realizado em 18 de janeiro de 1927, marco importante na história do IEE, foi datilografado em papel timbrado da “Escola Polytechnica”, cuja capa impressa especialmente para esse tipo de documento, continha em seu cabeçalho “Gabinete de Eletrotechnica”. O primeiro ensaio realizado pelo “Gabinete” consistiu na determinação do rendimento de um aquecedor de água da “Electro Thermo Brasileiro”, solicitado pela empresa “Francisco Chiappazzo & Cia”. Neste documento, consta o valor de 99,943 % de rendimento para o referido equipamento.

O laboratório de máquinas elétricas do IEE iniciou suas atividades no início da década de 1950, e tinha condições de ensaiar qualquer tipo de equipamento fabricado no país.

A Figura 6.2 apresenta o salão de ensaios de máquinas do IEE no ano de 1950, ainda instalado no edifício Ramos de Azevedo.

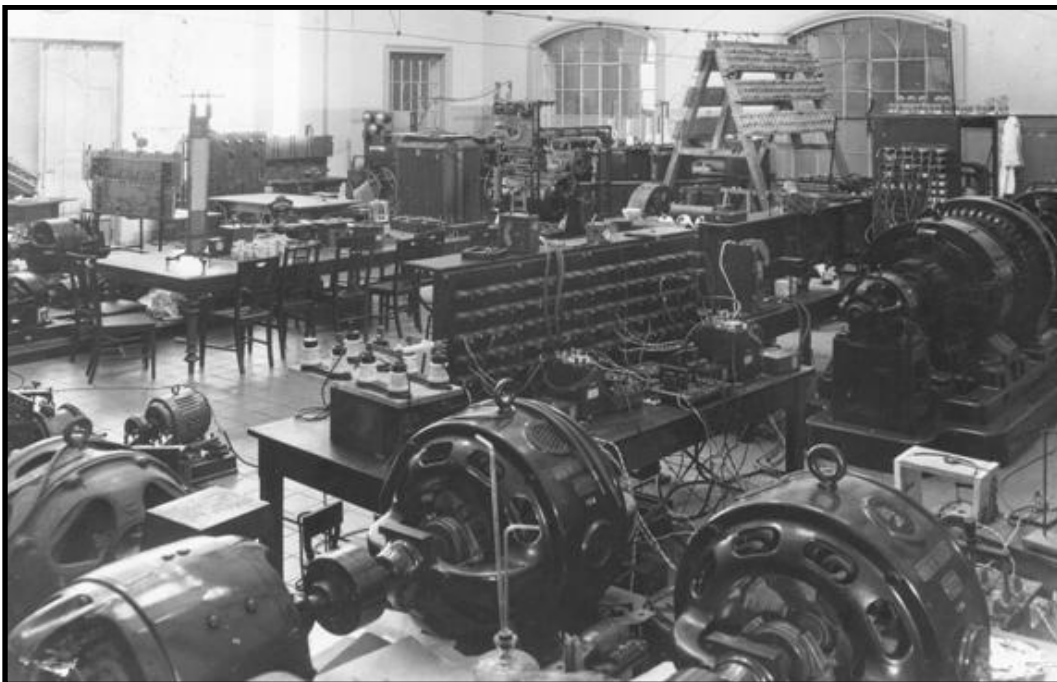


Figura 6.2 - Salão de ensaio de máquinas elétricas.

Fonte: (CASELLA, s.d.).

Em 25 de abril de 1966, foi inaugurado no campus da Cidade Universitária, em comemoração aos 25 anos do IEE, o laboratório de máquinas elétricas. Este laboratório, que sempre realizou ensaios em diversos motores de diferentes fabricantes, cedeu gentilmente alguns relatórios, contribuindo na validação da metodologia proposta nesta tese.

O laboratório de máquinas do IEE é apresentado na Figura 6.3, correspondente ao dia de sua inauguração.



Figura 6.3 - Inauguração do laboratório de máquinas do IEE em 25/04/1966.

Fonte: (CASELLA, s.d.).

6.2. ENSAIOS REALIZADOS

O Laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo é acreditado pelo CGRE/INMETRO de acordo com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o N° CRL - 0084/99.

Os principais ensaios realizados no laboratório de máquinas elétricas do IEE são:

Ensaio de Sistemas de energia ininterrupta:

- Regulação estática de tensão.
- Regulação dinâmica e tempo de recuperação.
- Rendimento ca/ca e cc/cc.
- Distorção harmônica.
- Autonomia do banco de baterias.

- Nível de ruído sonoro.
- Ensaio de transferência para caminho alternativo.
- Verificações de funcionamento.
- Sobrecarga.

Ensaaios em motores de indução:

- Medição de resistência elétrica dos enrolamentos.
- Ensaio em vazio.
- Rotor bloqueado.
- Determinação de características de desempenho.
- Elevação de temperatura.
- Medição da resistência do isolamento.
- Tensão suportável à frequência nominal.

Ensaaios em transformadores:

- Medição da relação de transformação.
- Medição da resistência elétrica dos enrolamentos.
- Medição da resistência de enrolamento.
- Ensaio em vazio.
- Determinação da impedância de curto-circuito.
- Elevação de temperatura.
- Tensão suportável à frequência nominal.
- Tensão induzida.
- Medição de ruído acústico.
- Medição da impedância de sequência zero.
- Medição de harmônicos na corrente de excitação.
- Determinação de regulação e do rendimento.

Ensaaios em máquinas síncronas:

- Medição da resistência de isolamento.
- Medição da resistência dos enrolamentos.
- Tensão suportável à frequência nominal.
- Ensaio de sequência de fases.
- Medição da distorção harmônica da tensão gerada.
- Ensaio de sobrevelocidade.
- Determinação das perdas e do rendimento.
- Ensaio de elevação de temperatura.
- Determinação das grandezas de máquinas síncronas.

Ensaaios em máquinas de corrente contínua:

- Medição da resistência de isolamento.
- Medição da resistência elétrica dos enrolamentos.
- Tensão suportável à frequência nominal.
- Ensaio em vazio.
- Verificação da polaridade.
- Elevação da temperatura.
- Verificação de comutação.
- Determinação do rendimento.
- Ensaio de sobrevelocidade.

Ensaaios em estabilizadores de tensão:

- Harmônicos de corrente e tensão.
- Curto-circuito.
- Sobrecarga.
- Degrau de tensão e corrente.
- Tensão aplicada.
- Resistência de isolamento.

- Eficiência.
- Fator de potência.
- Sobretensão e sobrecorrente.
- Estabilização.
- Proteção de sobrecorrente e sobretensão.

6.3. ENSAIOS E NORMAS TÉCNICAS PARA MOTORES ELÉTRICOS

Para a determinação das características de desempenho dos motores elétricos de indução, o laboratório de máquinas do IEE está capacitado para realizar ensaios segundo as Normas ABNT, IEC ou mesmo de acordo com as especificações fornecidas pelo próprio cliente. O laboratório também atende empresas que realizaram o recondicionamento ou manutenção de suas máquinas.

De acordo com a ABNT NBR 17094-1 (2008), para motores dos tipos padrão e alto rendimento, as perdas devem ser determinadas de acordo com o método de ensaio da ABNT NBR 5383-2 (2007), denominado ensaio dinamométrico com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas no estator, no rotor, no núcleo, por atrito e ventilação e suplementares. O rendimento é determinado à potência, tensão e frequência nominais.

As perdas $R.I^2$ (estator e rotor) são corrigidas para uma temperatura igual à temperatura ambiente (25°C), mais a elevação da temperatura determinada por meio do método de variação da resistência¹⁵.

De acordo com a ABNT NBR 5383-2 (2007), o rendimento é determinado pela adição de todas as parcelas de perdas, para cada solicitação de carga ou carregamento.

Para determinar os valores de rendimento para diversos carregamentos, as parcelas que correspondem a cada perda são obtidas e separadas pelos seguintes ensaios:

¹⁵ Segundo a ABNT NBR 17094-1 (2008), neste método a elevação de temperatura dos enrolamentos é determinada a partir do aumento da sua resistência.

1. **Ensaio em vazio com tensão variável e frequência nominal:** este ensaio é realizado com o motor desacoplado da carga. As medições dos valores das potências absorvidas e correntes de linha são efetuadas para os diversos valores de tensão à frequência nominal. A potência absorvida é composta pelas parcelas perdas no ferro na tensão de ensaio, perdas mecânicas e perdas no enrolamento do estator. Para este ensaio, consideram-se as perdas no enrolamento do rotor desprezíveis (escorregamento praticamente nulo). Neste caso, o conjugado do motor é necessário apenas para vencer os atritos e ventilação. Este ensaio é realizado utilizando-se de fonte de tensão trifásica e variável.

2. **Ensaio em carga, com tensão constante e frequência nominal:** neste ensaio, aplica-se plena carga no motor e após atingir sua estabilidade térmica (cinco constantes de tempo), a potência absorvida durante o ensaio é o resultado da soma das parcelas das perdas no enrolamento do estator em carga, perdas no rotor em carga, perdas suplementares em carga e a potência mecânica desenvolvida no motor e entregue a carga. A ABNT NBR 17094-1 (2008) admite que as perdas suplementares em carga variam com o quadrado da corrente de alimentação e que seu valor total, a plena carga é de 0,5% da potência absorvida.

Assim, o valor de rendimento pode ser determinado pelo método de separação das perdas, de acordo com a Equação 6.1 (Adaptado de AUGUSTO JR, 2001).

$$\eta_{\%} = \left(\frac{P_m}{L_{CU1} + L_{FE} + L_{CU2} + L_{AV} + L_{SC} + P_m} \right) \cdot 100 \quad (6.1)$$

Onde:

$\eta_{\%}$ = rendimento percentual.

L_{CU1} = perdas no enrolamento do estator em carga.

L_{FE} = perdas no ferro.

L_{CU2} = perdas no rotor em carga.

L_{AV} = perdas por atrito e ventilação.

L_{SC} = perdas suplementares em carga.

P_m = potência mecânica.

6.4. APRESENTAÇÃO DOS DADOS DISPONIBILIZADOS

Os dados de ensaios realizados em motores elétricos de indução trifásicos com rotor em gaiola foram gentilmente disponibilizados pelo laboratório de máquinas do IEE, auxiliando na validação da metodologia MHmit.

Alguns desses ensaios serão apresentados a seguir:

6.4.1. RELATÓRIO N. 01

OBJETIVO:

Medição da resistência elétrica dos enrolamentos; ensaio em vazio; determinação das características de desempenho; ensaio com rotor bloqueado; determinação do conjugado máximo; determinação da elevação de temperatura; medição da resistência de isolamento e ensaio de tensão suportável.

DADOS DO MOTOR:

- Marca: WEG.
- Potência: 150 [cv].
- Modelo: 280S/M.
- Frequência: 60 [Hz].
- Categoria: N.
- Fator de serviço: 1,0.
- Rotação: 1780 [rpm].
- Relação I_p/I_n : 8,3.
- Grau de proteção: IP-55.
- Tensão: 220/380/440 [V] .
- Corrente: 355/206/178 [A].
- Classe de isolamento: F.

- Regime de Funcionamento: contínuo.
- Rendimento: 93,5 [%].
- Fator de potência: 0,87.

OBSERVAÇÕES:

- Ensaios realizados segundo as normas da ABNT NBR 7094 (2000) e ABNT NBR 5383 (2002).
- Este Relatório de Ensaio abrange exclusivamente as características apresentadas pelo motor na data em que foi ensaiado.

MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA DOS ENROLAMENTOS:

- Temperatura ambiente: 21 [°C].
- Ligação do motor: Delta 440 [V].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Foi utilizado o método da tensão e corrente.

RESULTADOS OBTIDOS:

A Tabela 6.1 apresenta os resultados obtidos para a medição da resistência elétrica dos enrolamentos.

Tabela 6.1 – Medição da resistência elétrica dos enrolamentos para o Relatório N. 01

TERMINAIS	RESISTÊNCIA ELÉTRICA [$10^{-3} \Omega$]
L1 – L2	25
L2 – L3	25
L3 - L1	25

ENSAIO EM VAZIO:

- Temperatura ambiente: 22 [°C].
- Ligação do motor: Delta 440 [V].

Fonte de alimentação:

Banco trifásico de transformadores, alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.

Temperatura no enrolamento do estator, determinada pelo método da variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 31 [°C].

RESULTADOS OBTIDOS:

A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos para o ensaio em vazio.

Tabela 6.2 – Resultados obtidos para o ensaio em vazio para o Relatório N. 01.

Potência Absorvida [kW]	3,3
Tensão de Linha [V]	440
Corrente de Linha [A]	57

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO:

- Ensaio com tensão nominal.
- Ligação do motor: Delta 440 [V].
- Temperatura ambiente média: 24 [°C].

Fonte de alimentação: banco trifásico de transformadores, alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 440 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.

MÉTODO DE ENSAIO:

- Medição direta da potência de entrada e de saída.
- Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 180 [kW].
- Temperatura do enrolamento do estator determinada através do método de variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 73 [°C].

RESULTADOS OBTIDOS:

A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos para a determinação das características de desempenho.

Tabela 6.3 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 01.

POTÊNCIA ÚTIL [kW]	CORRENTE [A]	FATOR DE POTÊNCIA [%]	RENDIMENTO [%]	ESCORREGAMENTO [%]
130	210,5	86	94	1,00
120	193,9	86	94	0,93
110	178,1	86	94	0,85
100	163,5	85	94	0,77
90	149,1	84	94	0,69
80	135,4	83	93	0,62
70	121,7	81	93	0,54
60	108,6	79	92	0,46
50	96,0	75	91	0,38
40	84,2	69	90	0,31
30	73,9	61	87	0,23
20	65,0	49	82	0,15

DETERMINAÇÃO DA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA:

CONDIÇÕES DE ENSAIO:

- Ensaio em regime contínuo.

Fonte de alimentação:

Banco trifásico de transformadores, alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 440 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.
- Temperatura ambiente média: 23 [°C].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 180 [kW].

- Temperatura do enrolamento determinada através do método de variação da resistência.

RESULTADOS OBTIDOS:

A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos para a determinação da elevação da temperatura.

Tabela 6.4 – Resultados obtidos para a determinação da elevação da temperatura para o Relatório N. 01.

Potência Útil [kW]	110,1
Potência Absorvida [kW]	117,8
Corrente [A]	178
Rotação [rpm]	1784

- Temperatura medida por termopar instalado no orifício de fixação do olhal de içamento: 60 [°C].
- Temperatura medida por termopar instalado no mancal de rolamento do lado do acoplamento: 54 [°C].
- Temperatura medida por termopar instalado na carcaça próximo a parte superior da caixa de ligação: 47 [°C].

ENSAIO COM ROTOR BLOQUEADO:

CONDIÇÕES DE ENSAIO:

- Ensaio realizado com tensão reduzida e frequência nominal.

Fonte de alimentação:

Banco trifásico de transformadores, alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 282 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.
- Temperatura ambiente média: 24 [°C].
- Temperatura do enrolamento do estator determinada através do método de variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 59 [°C].
- Ligação do motor: Delta 440 [V].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 180 [kW].

RESULTADOS OBTIDOS:

Todos os valores abaixo indicados estão corrigidos para tensão nominal de 440 [V] e a corrente e o conjugado expressos como razão do valor nominal $C_n = 590$ [N.m] e $I_n = 178$ [A].

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos do ensaio com rotor bloqueado.

Tabela 6.5 – Resultados obtidos para o ensaio com rotor bloqueado para o Relatório N. 01

Corrente com rotor bloqueado (I_p/I_n)	6,9
Conjugado com rotor bloqueado (C_p/C_n)	2,6
Potência absorvida com rotor bloqueado [kW]	155

DETERMINAÇÃO DO CONJUGADO MÁXIMO:

CONDIÇÕES DE ENSAIO:

- Ensaio realizado com tensão reduzida e frequência nominal.

Fonte de alimentação:

Banco trifásico de transformadores, alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 317 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.
- Temperatura ambiente média: 23[°C].
- Temperatura do enrolamento do estator determinada através do método de variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 67 [°C].
- Ligação do motor: Delta 440 [V].

MÉTODO DE ENSAIO:

Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 180 [kW].

RESULTADO OBTIDO:

Todos os valores abaixo indicados estão corrigidos para tensão nominal de 440 V e a corrente e o conjugado expressos como razão do valor nominal $C_n = 590$ [N.m] e $I_n = 178$ [A].

A Tabela 6.6 apresenta os resultados obtidos para a determinação do conjugado máximo.

Tabela 6.6 – Resultados obtidos para a determinação do conjugado máximo para o Relatório

N. 01

Corrente (I/I_n)	3,6
Conjugado máximo ($C_{m\acute{a}x}/C_n$)	2,7
Potência absorvida [kW]	331
Rotação [rpm]	1731

MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO:***CONDIÇÕES DE ENSAIO:***

- Temperatura ambiente: 21 [°C].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Megaohmímetro de 1000 [V].

RESULTADO OBTIDO:

- Resistência de isolamento entre os terminais do enrolamento do estator e a carcaça:
Leitura após 1 minuto: 100 [MΩ].

ENSAIO DE TENSÃO SUPORTÁVEL:***CONDIÇÕES DE ENSAIO:***

- Temperatura ambiente: 22 [°C].
- Tempo de aplicação da tensão de prova: 1 [min].

Tensão de prova:

- Entre o enrolamento estatórico e os acessórios ligados à massa aterrada: 2 [kV].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda senoidal.

RESULTADO OBTIDO:

Não foi constatada a ocorrência de descarga disruptiva quando da aplicação da tensão de prova.

6.4.2. RELATÓRIO N. 02

OBJETIVO:

Determinação das características de desempenho.

DADOS DO MOTOR:

- Marca: ARNO.
- Potência útil: 200 [cv].
- Modelo: A 280MEFL.
- Rotação: 1760 [rpm].
- Frequência: 60 [Hz].
- Tensão: 220/380/440/760 [V].
- Corrente: 460/265/230/133 [A].
- Fator de serviço: 1,0.
- Regime de funcionamento: contínuo.

OBSERVAÇÕES:

- Ensaios realizados segundo as normas da ABNT NBR 7094 (2000) e ABNT NBR 5383 (2002).
- Este Relatório de Ensaio abrange exclusivamente as características apresentadas pelo motor na data em que foi ensaiado.

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO:

CONDIÇÕES DE ENSAIO:

Fonte de alimentação:

Regulador de tensão alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 440 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.
- Ligação do motor: Delta 440 [V].
- Ensaio com tensão nominal.
- Temperatura ambiente média: 20[°C].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Medição direta da potência de entrada e de saída.
- Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 180 [kW].
- Temperatura do enrolamento do estator determinada através do método de variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 45 [°C].

RESULTADO OBTIDO:

A Tabela 6.7 apresenta os resultados obtidos para a determinação das características de desempenho.

Tabela 6.7 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 02

POTÊNCIA ÚTIL [kW]	CORRENTE [A]	FATOR DE POTÊNCIA [%]	RENDIMENTO [%]	ESCORREGAMENTO [%]
180	286	89	93	1,98
165	259	89	94	1,78
150	235	89	94	1,58
130	204	88	95	1,33
110	174	87	95	1,09
90	146	85	95	0,87
70	119	81	95	0,67
50	96,3	73	93	0,48
30	77,1	58	88	0,30
15	66,5	38	78	0,17

6.4.3. RELATÓRIO N. 03

OBJETIVO:

Determinação das características de desempenho.

DADOS DO MOTOR:

- Marca: GE.
- Potência útil: 75 [cv].
- Tensão: 220/380/440 [V].
- Corrente: 201/116/101 [A].
- Rotação: 885 [rpm].
- Frequência: 60 [Hz]
- Regime: contínuo.
- Classe da isolamento: B.

OBSERVAÇÕES:

- Ensaios realizados segundo as normas da ABNT NBR 7094 (2000) e ABNT NBR 5383 (2002).
- Este Relatório de Ensaio abrange exclusivamente as características apresentadas pelo motor na data em que foi ensaiado.

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO:

CONDIÇÕES DE ENSAIO:

Fonte de alimentação:

Regulador de tensão alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 440 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.
- Ligação do motor: Delta 440 [V].
- Ensaio com tensão nominal.
- Temperatura ambiente média: 29 [°C].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Medição direta da potência de entrada e de saída.
- Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 180 [kW].
- Temperatura do enrolamento do estator determinada através do método de variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 58 [°C].

RESULTADO OBTIDO:

A Tabela 6.8 apresenta os resultados obtidos para a determinação das características de desempenho.

Tabela 6.8 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 03

POTÊNCIA ÚTIL [kW]	CORRENTE [A]	FATOR DE POTÊNCIA [%]	RENDIMENTO [%]	ESCORREGAMENTO [%]
70	123	81	92	1,28
65	114	81	92	1,16
60	106	80	93	1,04
55	98,2	79	93	0,93
50	90,7	78	93	0,82
45	83,6	76	93	0,71
40	76,8	74	92	0,61
35	70,4	71	92	0,52
30	64,4	67	91	0,43
23	56,9	59	90	0,31
17	51,2	50	87	0,21
11	46,4	38	82	0,12
6	43,2	25	73	0,05

6.4.4. RELATÓRIO N. 04

OBJETIVO:

Determinação das características de desempenho.

DADOS DO MOTOR:

- Marca: SIEMENS.
- Potência útil: 150 [cv].
- Rotação: 888 [rpm].
- Frequência: 60 [Hz].
- Tensão: 220/380/440 [V].
- Corrente: 380/220/190 [A].
- I_p/I_n : 6,6.
- Fator de serviço: 1,05.
- Regime: S1.
- Categoria: H.
- Grau de proteção: IPW55.
- Classe da isolamento: F.
- Rendimento: 93,0 %.
- Fator de potência: 0,82.

OBSERVAÇÕES:

- Ensaios realizados segundo as normas da ABNT NBR 7094 (2000) e ABNT NBR 5383 (2002).
- Este Relatório de ensaio abrange exclusivamente as características apresentadas pelo motor na data em que foi ensaiado.

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO:***CONDIÇÕES DE ENSAIO:***

Fonte de alimentação:

Regulador de tensão alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 380 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.
- Ligação do motor: Dupla estrela 380 [V].
- Ensaio com tensão nominal.
- Temperatura ambiente média: 24 [°C].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Medição direta da potência de entrada e de saída.
- Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 180 [kW].
- Temperatura do enrolamento do estator determinada através do método de variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 42 [°C].

RESULTADO OBTIDO:

A Tabela 6.9 apresenta os resultados obtidos para a determinação das características de desempenho.

Tabela 6.9 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 04

POTÊNCIA ÚTIL [kW]	CORRENTE [A]	FATOR DE POTÊNCIA [%]	RENDIMENTO [%]	ESCORREGAMENTO [%]
140	279	81	94	1,08
125	250	80	95	0,96
110	223	79	95	0,85
100	205	78	95	0,77
90	189	76	95	0,69
75	165	73	95	0,58
60	143	67	95	0,46
50	129	62	95	0,38
40	118	55	94	0,31
30	107	46	93	0,23
20	98,8	35	88	0,15
10	92,8	21	78	0,07

6.4.5. RELATÓRIO N. 05

OBJETIVO:

Determinação das características de desempenho.

DADOS DO MOTOR:

- Marca: BARDELA.
- Potência útil: 100 [hp].
- Rotação: 600 [rpm].
- Tensão: 220 [V].
- Corrente: 235 [A].
- Frequência: 60 [Hz].
- Regime: contínuo.

OBSERVAÇÕES:

- Ensaios realizados segundo as normas da ABNT NBR 7094 (2000) e ABNT NBR 5383 (2002).
- Este Relatório de Ensaio abrange exclusivamente as características apresentadas pelo motor na data em que foi ensaiado.

*DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO:**CONDIÇÕES DE ENSAIO:*

Fonte de alimentação:

Regulador de tensão alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 220 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.
- Ensaio com tensão nominal.
- Temperatura ambiente média: 29 [°C].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Medição direta da potência de entrada e de saída.
- Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 180 [kW].
- Temperatura do enrolamento do estator determinada através do método de variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 38 [°C].

RESULTADO OBTIDO:

A Tabela 6.10 apresenta os resultados obtidos para a determinação das características de desempenho.

Tabela 6.10 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 05

POTÊNCIA ÚTIL [kW]	CORRENTE [A]	FATOR DE POTÊNCIA [%]	RENDIMENTO [%]	ESCORREGAMENTO [%]
80	291	79	91	1,89
74	266	79	92	1,68
67	240	79	92	1,45
60	216	79	92	1,25
52	190	78	92	1,04
46	172	76	92	0,90
39	152	73	92	0,75
32	134	68	92	0,61
25	118	61	91	0,48
18	105	51	88	0,36
11	95	37	82	0,23

6.4.6. RELATÓRIO N. 06**OBJETIVO:**

Determinação das características de desempenho.

DADOS DO MOTOR:

- Marca: TOSHIBA.
- Potência útil: 450 [hp].
- Série: A 9064.
- Pólos: 4.

- Rotação: 1770 [rpm].
- Tensão: 440 [V].
- Corrente: 531 [A].
- Frequência: 60 [Hz].
- Fator de serviço: 1,0.
- Classe da isolação: F.
- Regime de serviço: contínuo.

OBSERVAÇÕES:

- Ensaios realizados segundo as normas da ABNT NBR 7094 (2000) e ABNT NBR 5383 (2002).
- Este Relatório de Ensaio abrange exclusivamente as características apresentadas pelo motor na data em que foi ensaiado.

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DESEMPENHO:

CONDIÇÕES DE ENSAIO:

Fonte de alimentação:

Regulador de tensão alimentado pela rede da Concessionária e com as seguintes características:

- Tensão: 440 [V].
- Frequência: 60 [Hz].
- Forma de onda: senoidal.
- Ensaio com tensão nominal.
- Temperatura ambiente média: 30 [°C].

MÉTODO DE ENSAIO:

- Medição direta da potência de entrada e de saída.
- Aplicação da carga utilizando freio eletrodinamométrico de 520 [kW].
- Temperatura do enrolamento do estator determinada através do método de variação da resistência, imediatamente após a conclusão do ensaio: 65 [°C].

RESULTADO OBTIDO:

A Tabela 6.11 apresenta os resultados obtidos para a determinação das características de desempenho.

Tabela 6.11 – Resultados obtidos para a determinação das características de desempenho para o Relatório N. 06

POTÊNCIA ÚTIL [kW]	CORRENTE [A]	FATOR DE POTÊNCIA [%]	RENDIMENTO [%]	ESCORREGAMENTO [%]
380	605	88	94	1,43
335	525	88	95	1,22
285	443	88	96	1,01
250	389	88	96	0,86
215	338	87	96	0,73
180	290	86	95	0,60
135	233	82	93	0,45
95	188	73	91	0,32
60	154	59	87	0,21
30	129	39	78	0,13

6.5. SISTEMATIZAÇÃO DOS DADOS DISPONIBILIZADOS

Os dados disponibilizados pelo Laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo foram sistematizados, contribuindo na validação da Metodologia MHmit, desenvolvida nesta tese.

Selecionaram-se dados de ensaios de motores elétricos que foram enviados ao Laboratório de Máquinas Elétricas do IEE para a determinação de suas características de desempenho após certo período de funcionamento em âmbito industrial. Esses dados foram comparados com as curvas do fabricante.

A Figura 6.4 apresenta os resultados do ensaio para a determinação da curva de rendimento de um motor elétrico de indução trifásico da marca WEG, 150 cv, 4 pólos, fabricado em 2002. Após 3 anos de utilização, este motor foi encaminhado ao IEE para a determinação de suas características de desempenho.

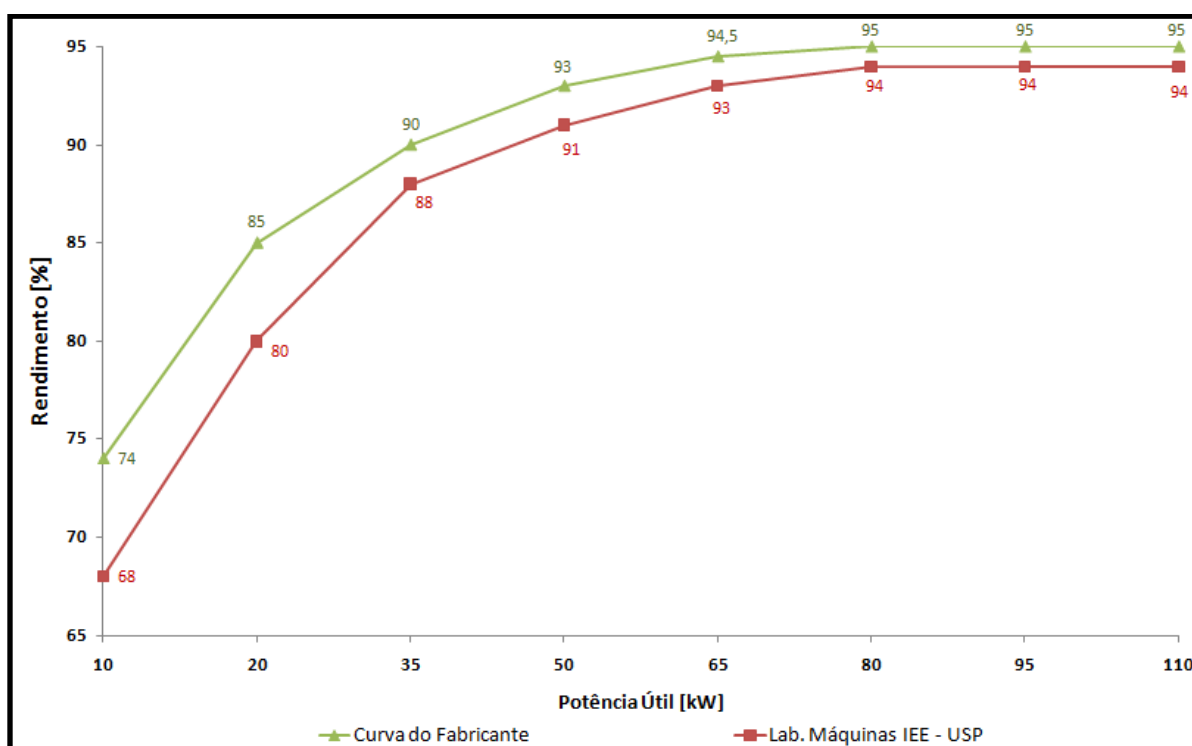


Figura 6.4 – Resultados do ensaio para a determinação da curva de rendimento de um motor WEG 150 cv.

Observa-se que o motor WEG perdeu rendimento em todos os pontos de operação após certo período de funcionamento.

A Figura 6.5 apresenta os resultados do ensaio para a determinação da curva de rendimento de um motor elétrico de indução trifásico da marca WEG, 100 cv, 6 pólos, fabricado em 2001.

Após 4 anos de utilização, este motor foi encaminhado ao IEE para a determinação de suas características de desempenho.

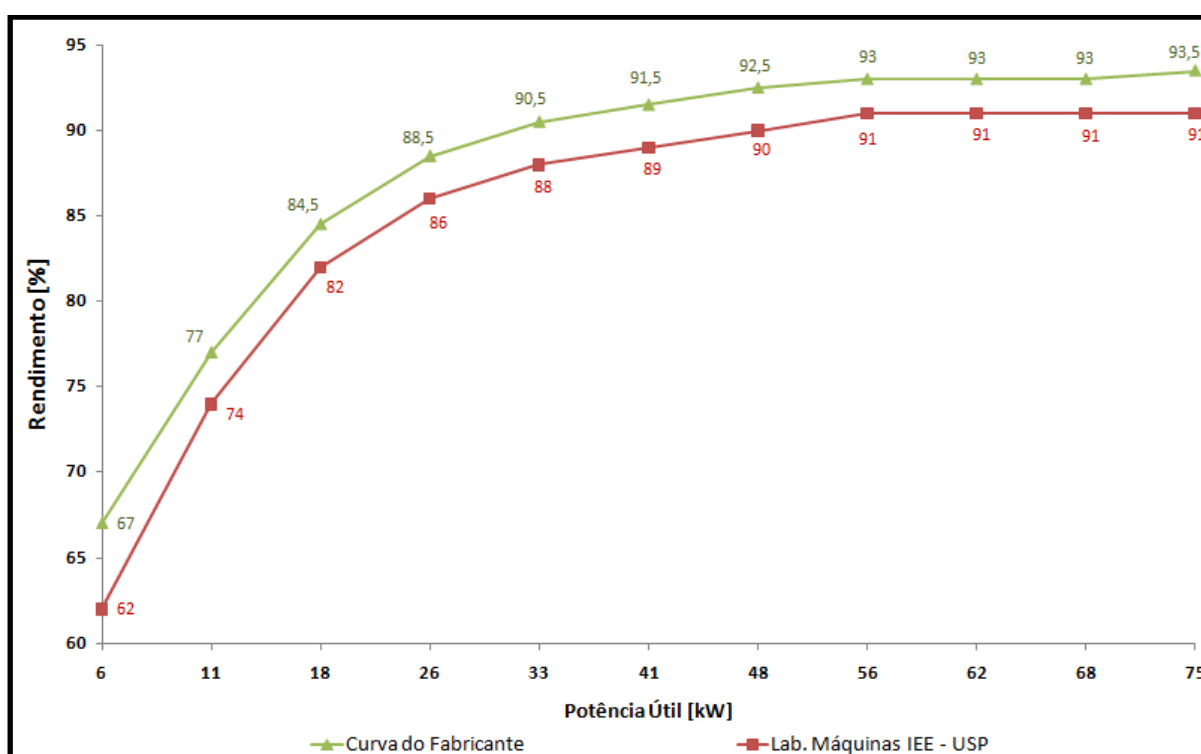


Figura 6.5 – Resultados do ensaio para a determinação da curva de rendimento de um motor WEG 100 cv.

Neste ensaio, observa-se que o motor WEG também perdeu rendimento em todos os pontos de operação após certo período de funcionamento. A redução do rendimento, além de outros fatores, como por exemplo, a má qualidade dos serviços de manutenção ao longo da vida útil, também ocorreu devido ao envelhecimento dos materiais que compõem o motor elétrico.

Em observação a este fato, podem-se tirar duas conclusões:

1. Para um mesmo valor de potência mecânica, será necessário um maior valor de potência elétrica, que poderá levar a um maior consumo de energia elétrica, bem como a sua possível danificação em função de um maior aquecimento.
2. Para um mesmo valor de potência elétrica, a potência mecânica disponível na ponta de eixo no motor será menor. Como a potência mecânica é obtida pelo produto do conjugado e da rotação, duas novas situações são possíveis:
 - a) Em acionamentos mecânicos a conjugado constante, o motor antigo acionará a carga com uma rotação inferior ao motor novo.
 - b) Para outros tipos de acionamento, caso as rotações dos dois motores sejam iguais, o motor antigo disponibilizará um menor conjugado.

CAPÍTULO 7 – METODOLOGIA MHmit

7.1. INTRODUÇÃO

A metodologia desenvolvida nesta tese tem por objetivo determinar o rendimento do motor elétrico de indução trifásico com rotor do tipo gaiola, a plena carga.

Determinar o rendimento de um motor elétrico em funcionamento no seu local de trabalho é uma tarefa árdua, não somente do ponto de vista de segurança, mas também do ponto de vista técnico. Isto, devido ao fato da precariedade em que se encontram as instalações elétricas de muitas indústrias brasileiras, a não utilização de equipamentos adequados para medições elétricas e principalmente pela quase inexistência de dados de parâmetros (fator de potência e rendimento para diversos valores de carregamento) dos motores elétricos mais antigos, essenciais para se estimar suas condições em operação. Além disso, a determinação direta do conjugado é praticamente impossível, em função da inexistência de equipamentos para essa finalidade.

Desta forma, o banco de dados do aplicativo MHmit contém o cadastro de parâmetros de motores elétricos de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola (do ano de 1979 até 2009), obtidos por meio de fabricantes, universidades, escolas técnicas, empresas de prestação de serviços na área motriz e usuários que por algum motivo guardaram esse material. Os dados de catálogos utilizados nesta metodologia abrangem motores elétricos da marca WEG.

A Figura 7.1 apresenta os catálogos obtidos para a análise e cadastro de parâmetros de motores elétricos no banco de dados do aplicativo MHmit.



Figura 7.1 – Catálogos obtidos para a análise e cadastro de parâmetros de motores elétricos.

A Figura 7.2 apresenta o catálogo com dados de parâmetros de motores elétricos da WEG para o ano de 1979. Este é o catálogo mais antigo que compõe o banco de dados do aplicativo MHmit.



Figura 7.2 – Catálogo WEG com dados de parâmetros de motores elétricos fabricados no ano de 1979.

A idéia em se utilizar dados antigos de parâmetros de motores elétricos surgiu a partir de entrevistas com diversas empresas prestadoras de serviços na área motriz, inclusive internacionais, obtendo como principal resposta, a quase inexistência de dados de motores elétricos antigos, instalados e operando em ambientes industriais, impossibilitando a obtenção de uma estimativa verdadeira das condições reais de operação do motor.

Conforme apresentado no Capítulo 6, o motor elétrico de indução tem seus parâmetros de funcionamento alterados ao longo de sua vida útil, devido ao envelhecimento dos materiais que o compõem. Além do mais, as empresas entrevistadas utilizam parâmetros de motores elétricos novos para analisar as condições de operação de um motor elétrico que foi fabricado há mais de 20 anos e que sofreu rebobinagens, danos mecânicos, sobreaquecimentos e curtos-circuitos.

Desta maneira, percebe-se que analisar um motor elétrico antigo (muitas vezes sem histórico de acompanhamento de operação ao longo da vida útil), por meio de dados de motores elétricos fabricados recentemente, pode gerar um desvio percentual entre os valores de rendimento estimado e real não condizentes com a realidade, afetando principalmente os estudos de viabilidade econômica, essenciais para a realização das substituições.

Os programas de simulação de motores elétricos atualmente utilizados para estudos de viabilidade econômica possuem um histórico recente de parâmetros elétricos e mecânicos.

Desta maneira, a metodologia MHmit tem o intuito de apresentar resultados das condições de operação do motor elétrico, bem como estudos de redimensionamento motriz para os principais tipos de cargas industriais, quando necessário, com o menor valor de desvio percentual possível entre os valores previstos (simulados pelo aplicativo MHmit) e reais (constatados por meio de medições de parâmetros elétricos do novo motor implementado).

7.2. DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

7.2.1.DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR ELÉTRICO ANTIGO EM FUNCIONAMENTO QUANDO COMPARADO AO SEU ESTADO NOVO

PARA CARGAS COM CONJUGADO DO TIPO CONSTANTE:

Observa-se pela Figura 7.3 que neste caso, com o tempo de uso o motor perde conjugado e conseqüentemente rotação. O motor que no passado (Situação 1) acionava carga com rotação n_1 passou atualmente (Situação 2) a acioná-la com uma rotação menor n_2 .

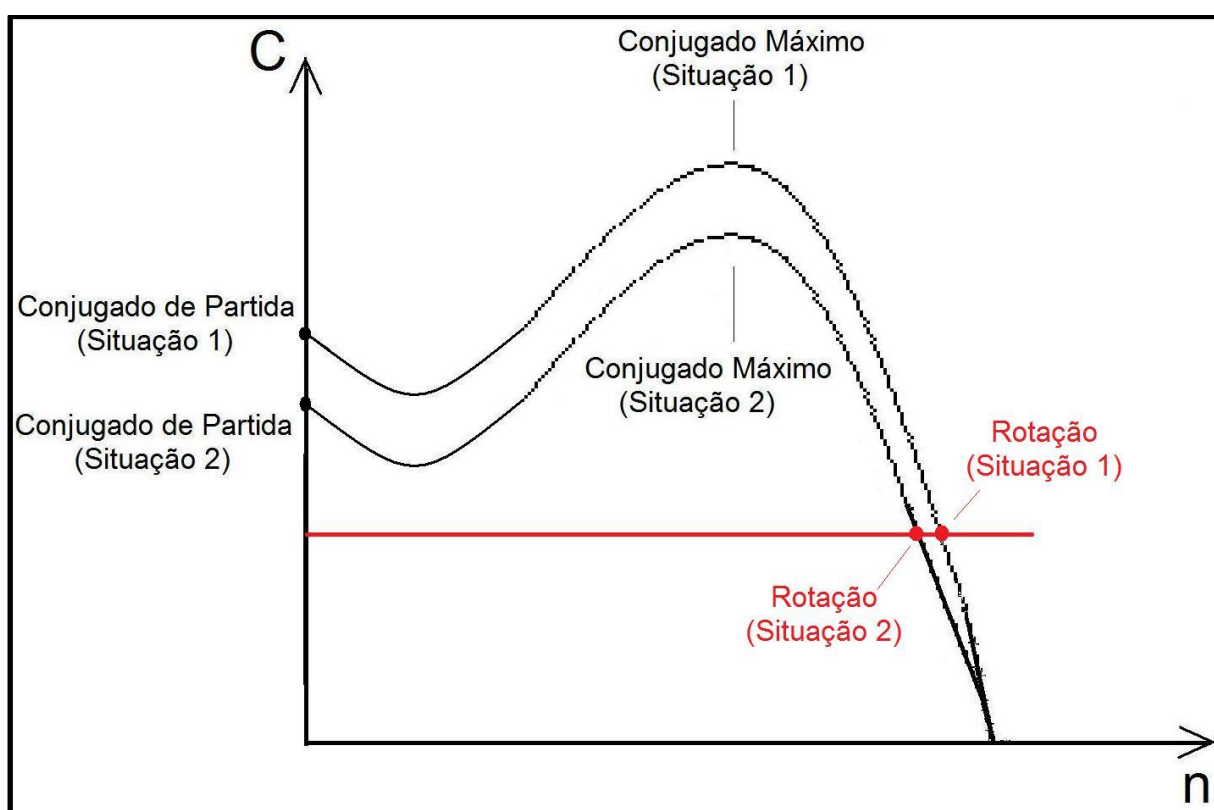


Figura 7.3 – Perda de conjugado e rotação em função do tempo de uso para cargas do tipo conjugado constante.

As Equações 7.1, 7.2 e 7.3 apresentam a Situação 1:

$$C_1 = k \quad (7.1)$$

$$P_{m1} = C_1 \cdot n_1 \quad (7.2)$$

$$\eta_1 = \frac{P_{m1}}{P} \quad (7.3)$$

As Equações 7.4, 7.5 e 7.6 apresentam a Situação 2:

$$C_2 = k \quad (7.4)$$

$$P_{m2} = C_2 \cdot n_2 \quad (7.5)$$

$$\eta_2 = \frac{P_{m2}}{P} \quad (7.6)$$

Onde:

P = potência elétrica (supondo constante nos 2 casos).

P_{m1} = potência mecânica (Situação 1).

η₁ = rendimento (Situação 1).

P_{m2} = potência mecânica (Situação 2).

η₂ = rendimento (Situação 2).

A relação entre as potências mecânicas P_{m1} e P_{m2} é obtida de acordo com a Equação 7.7.

$$\frac{P_{m1}}{P_{m2}} = \frac{C_1 \cdot n_1}{C_2 \cdot n_2} = \frac{k \cdot n_1}{k \cdot n_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (7.7)$$

Desta forma, a relação entre os rendimentos η_1 e η_2 é obtida de acordo com a Equação 7.8.

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\frac{P_{m1}}{P}}{\frac{P_{m2}}{P}} = \frac{P_{m1}}{P_{m2}} = \frac{n_1}{n_2} \quad (7.8)$$

Assim, o valor do rendimento do motor em uso pode ser determinado de acordo com a Equação 7.9.

$$\eta_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \cdot \eta_1 \quad (7.9)$$

Onde:

η_2 = rendimento (motor antigo).

η_1 = rendimento (motor novo).

n_1 = rotação a plena carga (motor novo).

n_2 = rotação a plena carga (motor antigo).

Neste caso, considera-se que a carga se manteve inalterada durante o período de funcionamento do motor elétrico. Assim, k é constante e igual em ambos os casos.

PARA CARGAS COM CONJUGADO DO TIPO LINEAR:

Observa-se pela Figura 7.4 que neste caso, com o tempo de uso o motor perde conjugado e conseqüentemente rotação. O motor que no passado (Situação 1) acionava carga com rotação n_1 passou atualmente (Situação 2) a acioná-la com uma rotação menor n_2 .

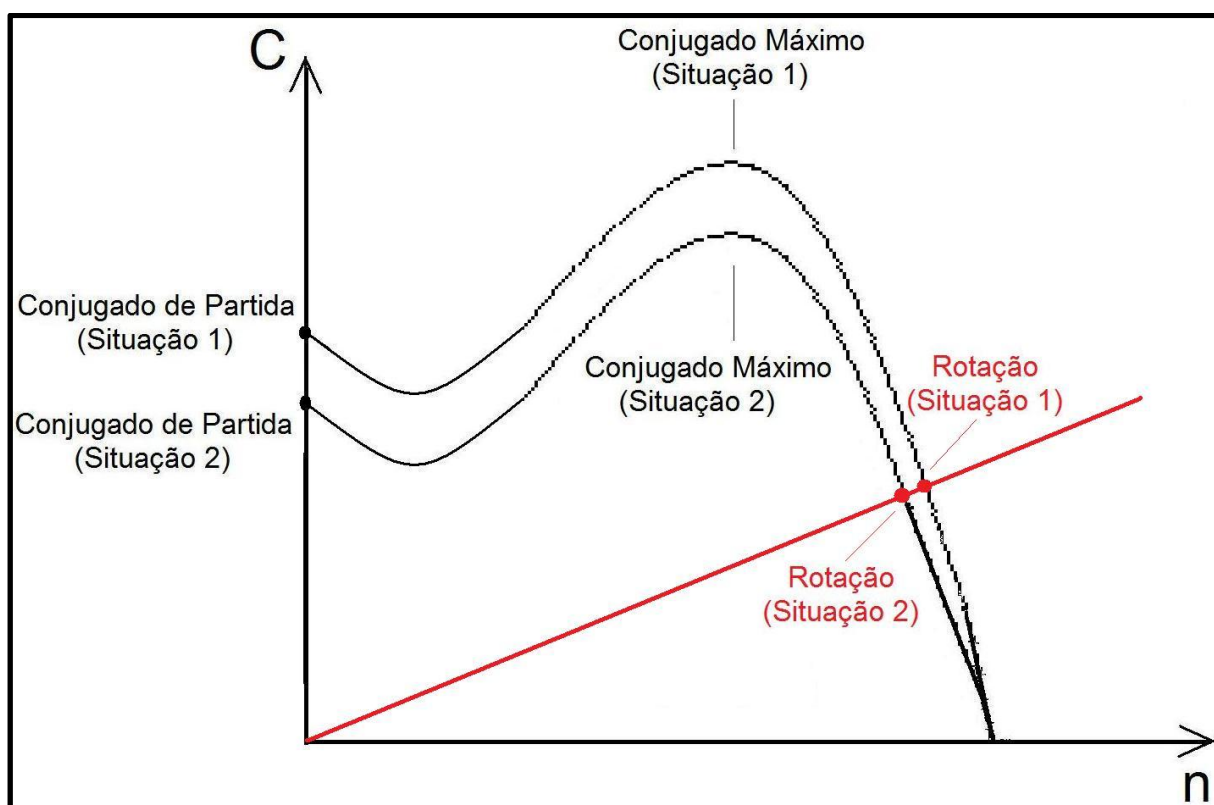


Figura 7.4 – Perda de conjugado e rotação em função do tempo de uso para cargas do tipo conjugado linear.

As Equações 7.10, 7.11 e 7.12 apresentam a Situação 1:

$$C_1 = k \cdot n_1 \quad (7.10)$$

$$P_{m1} = C_1 \cdot n_1 \quad (7.11)$$

$$\eta_1 = \frac{P_{m1}}{P} \quad (7.12)$$

As Equações 7.13, 7.14 e 7.15 apresentam a Situação 2:

$$C_2 = k \cdot n_2 \quad (7.13)$$

$$P_{m2} = C_2 \cdot n_2 \quad (7.14)$$

$$\eta_2 = \frac{P_{m2}}{P} \quad (7.15)$$

Onde:

P = potência elétrica (supondo constante nos 2 casos).

P_{m1} = potência mecânica (Situação 1).

η₁ = rendimento (Situação 1).

P_{m2} = potência mecânica (Situação 2).

η₂ = rendimento (Situação 2).

A relação entre as potências mecânicas P_{m1} e P_{m2} é obtida de acordo com a Equação 7.16.

$$\frac{P_{m1}}{P_{m2}} = \frac{C_1 \cdot n_1}{C_2 \cdot n_2} = \frac{k \cdot n_1^2}{k \cdot n_2^2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (7.16)$$

Desta forma, a relação entre os rendimentos η₁ e η₂ é obtida de acordo com a Equação 7.17.

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\frac{P_{m1}}{P}}{\frac{P_{m2}}{P}} = \frac{P_{m1}}{P_{m2}} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (7.17)$$

Assim, o valor do rendimento do motor em uso pode ser determinado de acordo com a Equação 7.18.

$$\eta_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cdot \eta_1 \quad (7.18)$$

Onde:

η_2 = rendimento (motor antigo).

η_1 = rendimento (motor novo).

n_1 = rotação a plena carga (motor novo).

n_2 = rotação a plena carga (motor antigo).

Neste caso, considera-se que a carga se manteve inalterada durante o período de funcionamento do motor elétrico. Assim, k é constante e igual em ambos os casos.

PARA CARGAS COM CONJUGADO DO TIPO PARABÓLICO:

Observa-se pela Figura 7.5 que neste caso, com o tempo de uso o motor perde conjugado e conseqüentemente rotação. O motor que no passado (Situação 1) acionava carga com rotação n_1 passou atualmente (Situação 2) a acioná-la com uma rotação menor n_2 .

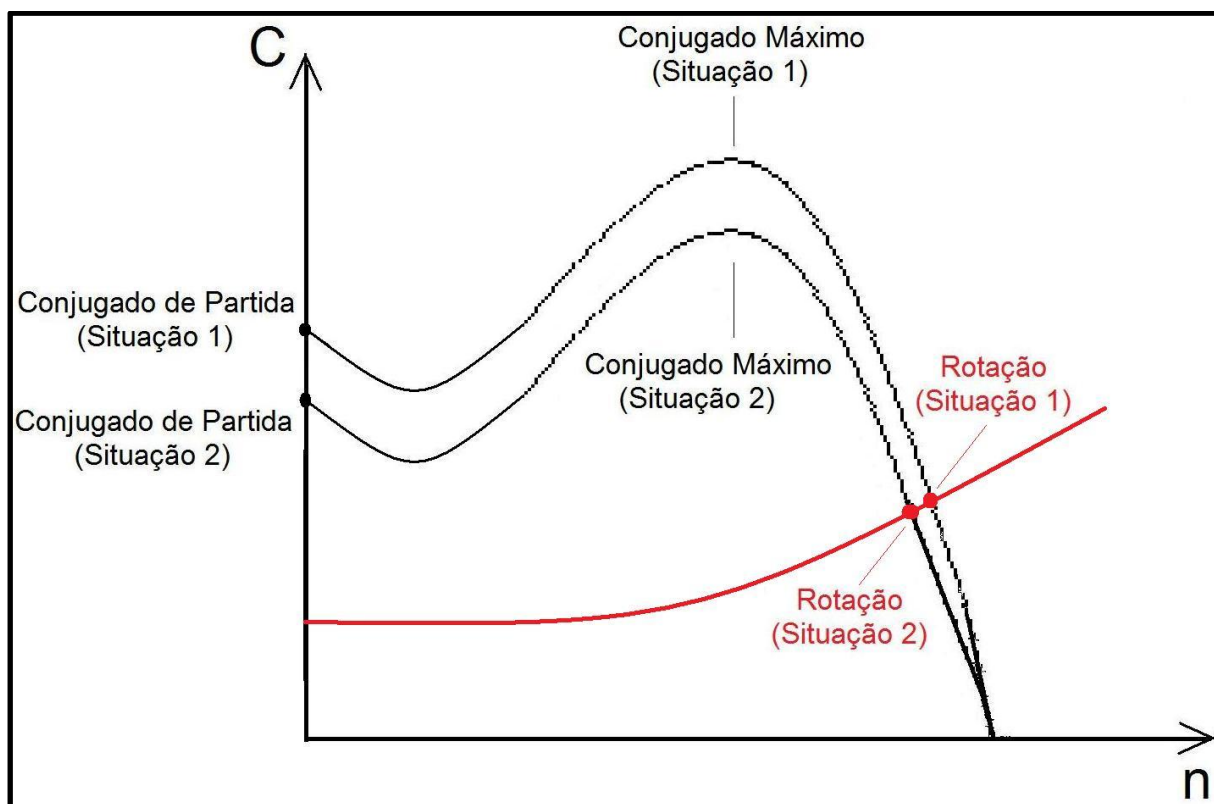


Figura 7.5 – Perda de conjugado e rotação em função do tempo de uso para cargas do tipo conjugado parabólico.

As Equações 7.19, 7.20 e 7.21 apresentam a Situação 1:

$$C_1 = k \cdot n_1^2 \quad (7.19)$$

$$P_{m1} = C_1 \cdot n_1 \quad (7.20)$$

$$\eta_1 = \frac{P_{m1}}{P} \quad (7.21)$$

As Equações 7.22, 7.23 e 7.24 apresentam a Situação 2:

$$C_2 = k \cdot n_2^2 \quad (7.22)$$

$$P_{m2} = C_2 \cdot n_2 \quad (7.23)$$

$$\eta_2 = \frac{P_{m2}}{P} \quad (7.24)$$

Onde:

P = potência elétrica (supondo constante nos 2 casos).

P_{m1} = potência mecânica (Situação 1).

η₁ = rendimento (Situação 1).

P_{m2} = potência mecânica (Situação 2).

η₂ = rendimento (Situação 2).

A relação entre as potências mecânicas P_{m1} e P_{m2} é obtida de acordo com a Equação 7.25.

$$\frac{P_{m1}}{P_{m2}} = \frac{C_1 \cdot n_1}{C_2 \cdot n_2} = \frac{k \cdot n_1^3}{k \cdot n_2^3} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \quad (7.25)$$

Desta forma, a relação entre os rendimentos η₁ e η₂ é obtida de acordo com a Equação 7.26.

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\frac{P_{m1}}{P}}{\frac{P_{m2}}{P}} = \frac{P_{m1}}{P_{m2}} = \frac{n_1^3}{n_2^3} \quad (7.26)$$

Assim, o valor do rendimento do motor em uso pode ser determinado de acordo com a Equação 7.27.

$$\eta_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \cdot \eta_1 \quad (7.27)$$

Onde:

η_2 = rendimento (motor antigo).

η_1 = rendimento (motor novo).

n_1 = rotação a plena carga (motor novo).

n_2 = rotação a plena carga (motor antigo).

Neste caso, considera-se que a carga se manteve inalterada durante o período de funcionamento do motor elétrico. Assim, k é constante e igual em ambos os casos.

PARA CARGAS COM CONJUGADO DO TIPO HIPERBÓLICO (POTÊNCIA MECÂNICA CONSTANTE):

Observa-se pela Figura 7.6 que neste caso, com o tempo de uso o motor perde conjugado e conseqüentemente rotação. O motor que no passado (Situação 1) acionava carga com rotação n_1 passou atualmente (Situação 2) a acioná-la com uma rotação menor n_2 .

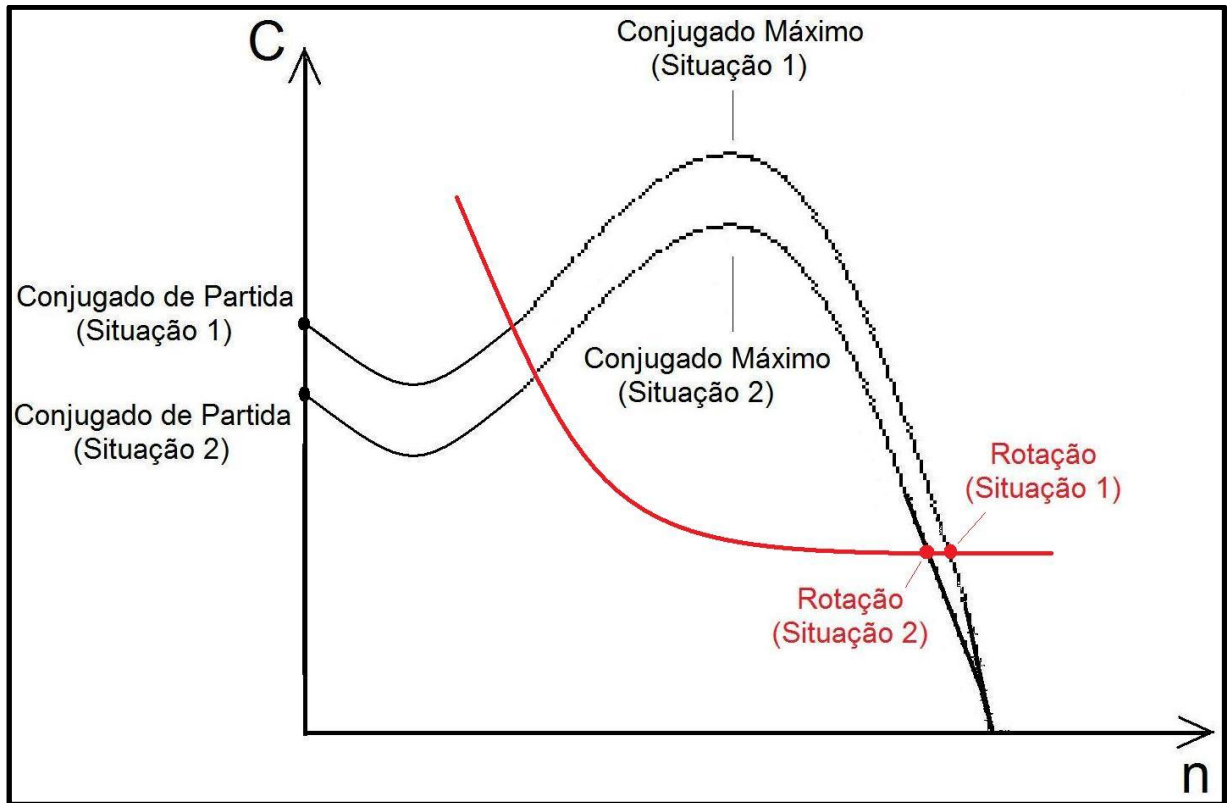


Figura 7.6 – Perda de conjugado e rotação em função do tempo de uso para cargas do tipo conjugado hiperbólico.

As Equações 7.28, 7.29 e 7.30 apresentam a Situação 1:

$$C_1 = \frac{k}{n_1} \quad (7.28)$$

$$P_{m1} = C_1 \cdot n_1 \quad (7.29)$$

$$\eta_1 = \frac{P_{m1}}{P_1} \quad (7.30)$$

As Equações 7.31, 7.32 e 7.33 apresentam a Situação 2:

$$C_2 = \frac{k}{n_2} \quad (7.31)$$

$$P_{m2} = C_2 \cdot n_2 = P_{m1} \quad (7.32)$$

$$\eta_2 = \frac{P_{m2}}{P_2} = \frac{P_{m1}}{P_2} \quad (7.33)$$

Onde:

P_1 = potência elétrica (Situação 1).

P_2 = potência elétrica (Situação 2).

$P_{m1} = P_{m2}$ = potência mecânica (Situações 1 e 2).

η_1 = rendimento (Situação 1).

η_2 = rendimento (Situação 2).

Sabe-se que:

$$\eta_1 > \eta_2$$

Logo:

$$P_1 < P_2$$

Assim:

$$\sqrt{3} \cdot V \cdot I_1 \cdot \cos\phi_1 < \sqrt{3} \cdot V \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2$$

e

$$I_1 \cdot \cos\phi_1 < I_2 \cdot \cos\phi_2$$

Desta forma, a relação entre os rendimentos η_1 e η_2 é obtida de acordo com a Equação 7.34.

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\frac{P_{m1}}{P_1}}{\frac{P_{m2}}{P_2}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 \cdot \cos\phi_2}{I_1 \cdot \cos\phi_1} \quad (7.34)$$

Assim, o valor do rendimento do motor em uso pode ser determinado de acordo com a Equação 7.35.

$$\eta_2 = \left(\frac{I_1 \cdot \cos\phi_1}{I_2 \cdot \cos\phi_2} \right) \cdot \eta_1 \quad (7.35)$$

Onde:

η_2 = rendimento (motor antigo).

η_1 = rendimento (motor novo).

$I_1 = I_N$ = intensidade de corrente elétrica (motor novo).

I_2 = intensidade de corrente elétrica (motor antigo).

$\cos\phi_1$ = fator de potência (motor novo).

$\cos\phi_2$ = fator de potência (motor antigo).

Neste caso, considera-se que a carga se manteve inalterada durante o período de funcionamento do motor elétrico. Assim, k é constante e igual em ambos os casos.

7.2.2. IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO

Conforme apresentado no Capítulo 2, durante a sistematização dos dados disponibilizados pelas 5 empresas que prestam serviços de consultoria na área motriz, foram selecionadas medições com valores não condizentes com o esperado, ou seja, motores elétricos antigos do tipo padrão que foram substituídos por motores novos do tipo alto rendimento, mas com maior consumo de energia elétrica.

Desta forma, apresenta-se nesta metodologia a importância de se medir a rotação do motor elétrico originalmente instalado antes da substituição do mesmo por um modelo novo do tipo alto rendimento.

Na prática, observa-se que a substituição de um motor elétrico antigo do tipo padrão por um motor novo do tipo alto rendimento compreende a existência de uma nova curva de conjugado ligeiramente diferente. A Figura 7.7 apresenta a curva de conjugado de um motor padrão em uso comparado com a curva de conjugado de um motor novo do tipo alto rendimento, ambos acionando uma carga com conjugado do tipo constante.

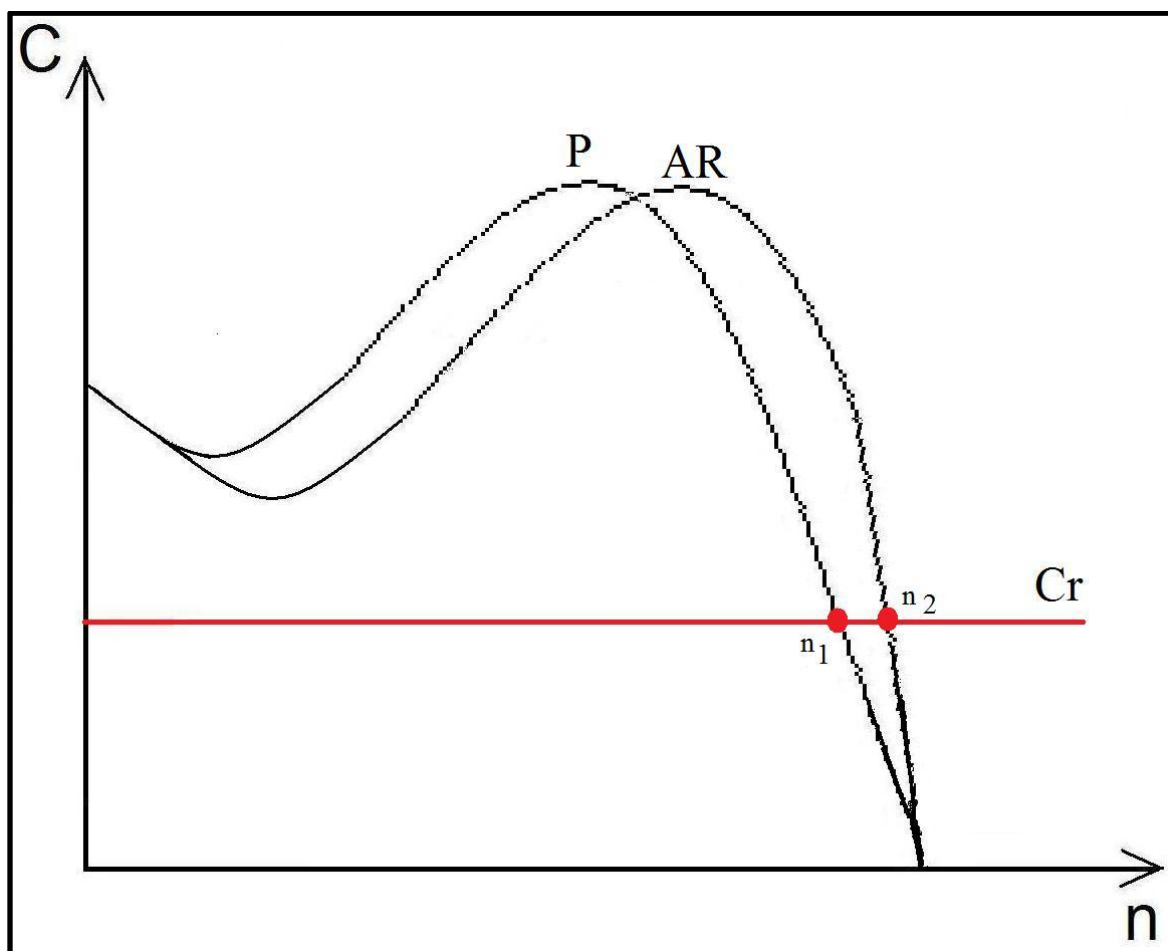


Figura 7.7 – Curvas de conjugado de um motor em uso do tipo padrão comparado com um motor novo do tipo alto rendimento acionando uma carga com conjugado do tipo constante.

Neste caso, o motor de alto rendimento aciona a carga numa rotação superior em relação ao motor antigo.

Quando por meio da utilização de um analisador de potência e qualidade de energia elétrica determinamos o valor da potência elétrica de entrada, temos a impressão que não houve economia, pois de acordo com a Equação 7.36, temos.

$$P_{mAR} = C_r \cdot n_2 > P_{mP} = C_r \cdot n_1 \quad (7.36)$$

Onde:

P_{mAR} = potência mecânica (motor novo alto rendimento).

P_{mP} = potência mecânica (motor antigo padrão).

C_r = Conjugado resistente.

n_2 = rotação (motor novo alto rendimento).

n_1 = rotação (motor antigo padrão).

Em determinados casos, o motor de alto rendimento solicita uma potência elétrica superior ao motor padrão. Porém, como a rotação da máquina aumenta, a produção para o mesmo tempo de funcionamento também aumenta.

Desta forma, para a mesma quantidade produzida, o motor de alto rendimento funciona menos e conseqüentemente tem um consumo menor de energia para a realização do mesmo trabalho.

Assim, de acordo com as Equações 7.37 e 7.38, temos:

$$E_P = P_P \cdot t_P \quad (7.37)$$

$$E_{AR} = P_{AR} \cdot t_{AR} \quad (7.38)$$

Onde:

E_P = consumo de energia elétrica (motor antigo padrão).

P_P = potência ativa (motor antigo padrão).

t_P = tempo de funcionamento (motor antigo padrão).

E_{AR} = consumo de energia elétrica (motor novo alto rendimento).

P_{AR} = potência ativa (motor novo alto rendimento).

t_{AR} = tempo de funcionamento (motor novo alto rendimento).

O tempo necessário para a mesma produção pode ser calculado com base nos valores das rotações medidas e das horas de funcionamento do motor antigo do tipo padrão.

A Equação 7.39 apresenta essa situação.

$$t_{AR} = \frac{n_P}{n_{AR}} \cdot t_P \quad (7.39)$$

Onde:

t_{AR} = número de horas de funcionamento (motor novo alto rendimento).

t_P = número de horas de funcionamento (motor antigo padrão).

n_P = rotação (motor antigo padrão).

n_{AR} = rotação (motor novo alto rendimento).

7.3. MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

7.3.1. INTRODUÇÃO

Efetuar medições de parâmetros elétricos em motores de indução trifásicos exige do usuário uma análise preliminar das condições em que se encontram as instalações elétricas onde serão colocados os equipamentos de medição.

Outro fator é a escolha de um equipamento de medição adequado que apresente um desvio percentual pequeno (geralmente menor que 2% entre o valor medido e o valor real).

Atualmente, existem no mercado inúmeros equipamentos para medição de parâmetros elétricos, alguns com muitos recursos, porém preços muito altos, e outros com preços menores, mas com recursos insuficientes para a utilização com o aplicativo MHmit.

No Capítulo 4 foram apresentados equipamentos analisadores de potência e qualidade de energia elétrica que podem ser utilizados nesta metodologia. Porém, recomenda-se sempre a utilização de um analisador trifásico.

Todas as medições efetuadas no motor elétrico para a utilização com o aplicativo MHmit devem ser feitas com o mesmo em condições nominais de funcionamento.

7.3.2. ETAPAS PARA MEDIÇÃO

Para a metodologia MHmit, os dados a serem coletados no motor elétrico em funcionamento para a utilização no aplicativo são os seguintes:

a) Tensão

Os valores de tensão devem ser determinados para as fases A, B e C. Em seguida, faz-se necessário a determinação do valor do Grau de Desequilíbrio de Tensão. Para a metodologia proposta, recomendam-se valores de GDT menores do que 1% (ABNT NBR 17094-1, 2008).

A Figura 7.8 apresenta um analisador trifásico de potência e qualidade de energia elétrica efetuando medição do GDT antes da aplicação da metodologia MHmit. Neste caso, o valor de GDT foi de 0,69%



Figura 7.8 – Determinação do Grau de Desequilíbrio de Tensão utilizando analisador trifásico de potência e qualidade de energia elétrica.

b) Intensidade de corrente elétrica

Os valores de intensidade de corrente elétrica devem ser determinados para as fases A, B e C. Estes devem ser coletados por meio de um equipamento que efetue medições de valores *True RMS*¹⁶. Isto, devido à necessidade de se considerar as perdas no motor quando este é alimentado por conversores de frequência. Os harmônicos presentes na rede elétrica são responsáveis pela diminuição do torque nos motores (5° ordem - sequência negativa), ocasionando também o aquecimento dos mesmos. Desta forma, o conhecimento do percentual total de distorção harmônica de tensão é de extrema importância, principalmente nos estudos de redimensionamento motriz.

De acordo com a ABNT NBR 17094-1 (2008), os motores de indução trifásicos (exceto motores de categoria N) podem funcionar sob uma tensão de alimentação cujo fator de harmônicos de tensão seja igual ou inferior a 2 %. O motor de categoria N pode funcionar sob tensão de alimentação com fator de harmônicos de tensão igual ou inferior a 3 %.

c) Fator de Potência

Os valores de fator de potência devem ser determinados para as fases A, B e C. Estes devem ser coletados por meio de um equipamento analisador de potência e qualidade de energia elétrica.

d) Rotação

A medição da rotação do motor elétrico a plena carga é de extrema importância na utilização da metodologia MHmit. Isto, devido ao fato da rotação do motor elétrico de indução diminuir ao longo de sua vida útil, em consequência do envelhecimento dos materiais que o compõem, inclusive modificando o seu ponto de operação, conforme apresentado anteriormente.

¹⁶ Valor que considera a somatória das correntes harmônicas no sistema elétrico.

Desta forma, a substituição motriz pode compreender um motor operando em nova rotação, cuja potência ativa trifásica real medida em campo, resultaria muitas vezes em valores completamente diferentes dos simulados, conforme alguns casos apresentados no Capítulo 2.

7.3.3. COLETA DE DADOS DOS ACIONAMENTOS

Uma substituição motriz, quando o investimento é proveniente de Programas de Eficiência Energética da ANEEL, pode levar mais de seis meses (desde a medição até a verificação).

Quando o investimento é proveniente de recursos próprios de empresas interessadas na redução do consumo de energia elétrica, o tempo entre o pré-diagnóstico e as medições finais pode compreender algumas semanas.

De qualquer maneira, anotar os parâmetros em funcionamento da máquina (compressor, bomba, exaustor e ventilador) é de extrema importância nos estudos para substituição motriz, devido ao fato de que antes e após as substituições, a máquina deve obrigatoriamente estar operando nas mesmas condições. Isto se faz necessário, pois qualquer variação nas condições de operação da máquina (como por exemplo, pressão, vazão) pode apresentar grande variação no valor da potência ativa medida, tendo como consequência, o aumento do desvio percentual entre os valores previstos e reais.

Os valores que devem ser anotados para a utilização na metodologia MHmit são os seguintes:

a) Compressores

Verificação do valor da pressão por meio da leitura do manômetro ou de equipamento medidor de vazão de ar comprimido, quando disponível.

b) Bombas

Verificação do valor da pressão por meio da leitura do manômetro.

c) Exaustores

Verificação do valor da vazão de ar por meio da utilização de anemômetro. Deve-se verificar também a posição do *damper* (controlador de vazão de ar) do exaustor. Caso o motor seja acionado por conversor de frequência, deve-se anotar o valor da frequência de operação.

d) Ventiladores

Verificação do valor da vazão de ar por meio de utilização de anemômetro. Caso o motor seja acionado por conversor de frequência, deve-se anotar o valor da frequência de operação.

7.3.4. ETAPAS PARA VERIFICAÇÃO

A verificação dos resultados obtidos deve ser realizada logo após a substituição do motor elétrico. É necessário colocar a carga nas mesmas condições de funcionamento (pressão, vazão, bem como fabricação do mesmo produto).

Em seguida, deve-se conectar o analisador trifásico para aquisição dos dados de parâmetros elétricos. Esses dados devem contemplar tensão, corrente e fator de potência para as fases A, B e C.

A aquisição do valor da rotação a plena carga do novo motor também é necessária.

Tanto para a medição, quanto para a verificação, recomenda-se a aquisição de dados de pelo menos 7 dias. Os dados obtidos (valor médio) podem ser inseridos no aplicativo MHmit para a determinação do desvio percentual entre os valores simulado e real.

7.4. APLICATIVO MHmit

7.4.1. INTRODUÇÃO

O MHmit é um aplicativo que tem por objetivo determinar indiretamente o rendimento de motores trifásicos de indução com rotor em gaiola a plena carga.

Este aplicativo também auxilia o usuário no tocante a determinação da economia de energia elétrica, redução de demanda, análise de viabilidade econômica, bem como estudos de redimensionamento motriz.

O banco de dados do aplicativo é composto por parâmetros elétricos e mecânicos retirados de catálogos de motores da marca WEG fabricados entre 1979 e 2009. Estes catálogos, cedidos pelo fabricante, representantes, universidades e profissionais da área motriz foram de muita importância para o desenvolvimento da metodologia proposta nesta tese e deste aplicativo.

A Figura 7.9 apresenta a tela de abertura do aplicativo MHmit.



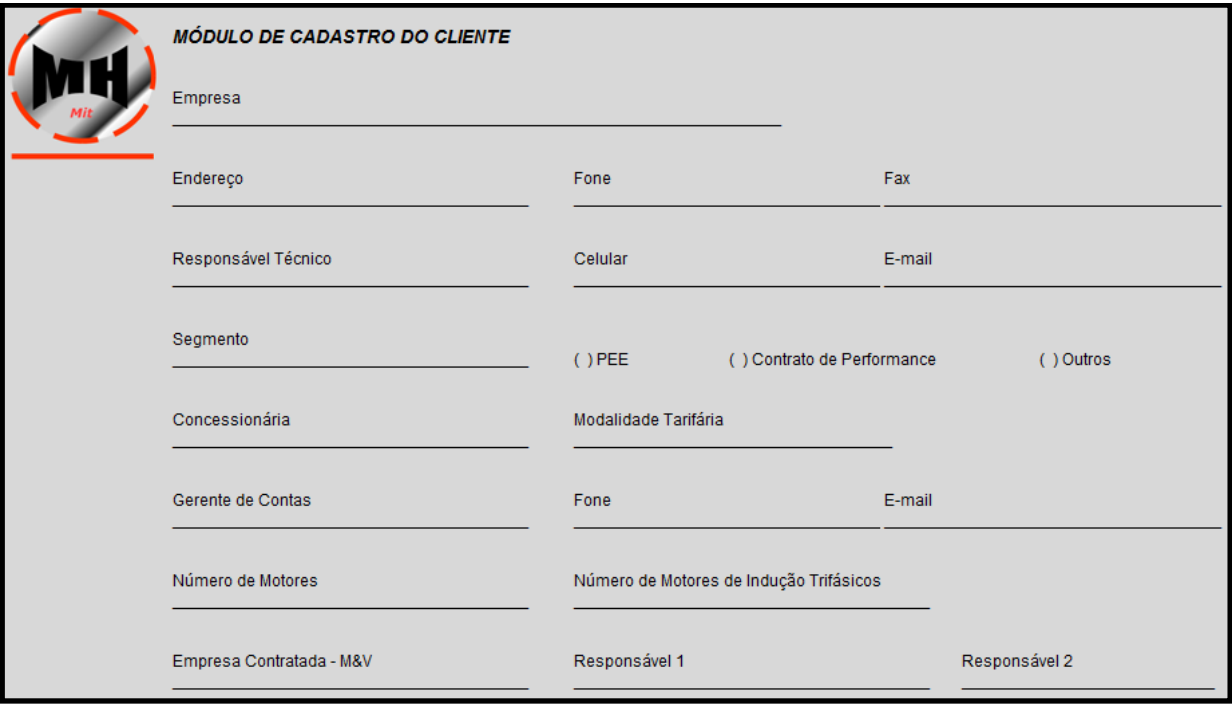
Figura 7.9 – Tela de abertura do MHmit.

A seguir, serão apresentados os módulos que compõem o aplicativo MHmit.

7.4.2. MÓDULO DE CADASTRO DO CLIENTE

Primeiramente, o usuário deve preencher os dados de cadastro do cliente ou local onde será realizado o trabalho de medição e verificação.

A Figura 7.10 apresenta a tela do módulo de cadastro do cliente.



MÓDULO DE CADASTRO DO CLIENTE			
Empresa			
Endereço	Fone	Fax	
Responsável Técnico	Celular	E-mail	
Segmento	() PEE	() Contrato de Performance	() Outros
Concessionária	Modalidade Tarifária		
Gerente de Contas	Fone	E-mail	
Número de Motores	Número de Motores de Indução Trifásicos		
Empresa Contratada - M&V	Responsável 1	Responsável 2	

Figura 7.10 – Tela do módulo de cadastro do cliente.

7.4.3. IDENTIFICAÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO ORIGINALMENTE INSTALADO

O MHmit apresenta ao usuário a tela de identificação do motor originalmente instalado. Alguns desses valores também podem ser retirados do Banco de Dados do aplicativo, pois muitas vezes o motor elétrico, devido ao elevado tempo de uso, está com a placa de identificação ilegível.

A Figura 7.11 apresenta a tela de identificação do motor elétrico originalmente instalado.



IDENTIFICAÇÃO - MOTOR ELÉTRICO ORIGINALMENTE INSTALADO

MARCA	<input type="text"/>	FATOR DE SERVIÇO	<input type="text"/>
ANO DE FABRICAÇÃO	<input type="text"/>	MOMENTO DE INÉRCIA	<input type="text"/> [kgm ²]
TIPO	<input type="text"/>	TEMPO COM ROTOR BLOQUEADO	<input type="text"/> [s]
N. POLOS	<input type="text"/>	MASSA	<input type="text"/> [kg]
POTÊNCIA	<input type="text"/> [cv]	ÍNDICE DE PROTEÇÃO	<input type="text"/>
CARCAÇA	<input type="text"/>	ROLAMENTO DIANTEIRO	<input type="text"/>
ROTAÇÃO	<input type="text"/> [rpm]	ROLAMENTO TRASEIRO	<input type="text"/>
TENSÃO	<input type="text"/> [V]		
CORRENTE	<input type="text"/> [A]		
I_p / I_n	<input type="text"/>		
CONJUGADO	<input type="text"/> [kgfm]		
RENDIMENTO	<input type="text"/> [%]		
FATOR DE POTÊNCIA	<input type="text"/>		

Figura 7.11 – Tela de identificação do motor elétrico originalmente instalado.

Em seguida, o aplicativo apresenta ao usuário a tela de identificação do motor proposto. Nesta, tem-se a opção de cadastro do preço do motor elétrico, dado este utilizado no módulo de análise econômica. Após o preenchimento dos dados, para o mesmo valor de carregamento do motor originalmente instalado, o aplicativo realiza simulações para a determinação dos valores de intensidade de corrente elétrica, fator de potência e potência elétrica ativa trifásica.

A Figura 7.12 apresenta a tela de identificação do motor elétrico proposto.



IDENTIFICAÇÃO - MOTOR ELÉTRICO PROPOSTO

MARCA	<input type="text"/>	FATOR DE SERVIÇO	<input type="text"/>
ANO DE FABRICAÇÃO	<input type="text"/>	MOMENTO DE INÉRCIA	<input type="text"/> [kgm ²]
TIPO	<input type="text"/>	TEMPO COM ROTOR BLOQUEADO	<input type="text"/> [s]
N. POLOS	<input type="text"/>	MASSA	<input type="text"/> [kg]
POTÊNCIA	<input type="text"/> [cv]	ÍNDICE DE PROTEÇÃO	<input type="text"/>
CARCAÇA	<input type="text"/>	ROLAMENTO DIANTEIRO	<input type="text"/>
ROTAÇÃO	<input type="text"/> [rpm]	ROLAMENTO TRASEIRO	<input type="text"/>
TENSÃO	<input type="text"/> [V]	PREÇO	<input type="text"/> [R\$]
CORRENTE	<input type="text"/> [A]		
I_p / I_n	<input type="text"/>		
CONJUGADO	<input type="text"/> [kgfm]		
RENDIMENTO	<input type="text"/> [%]		
FATOR DE POTÊNCIA	<input type="text"/>		

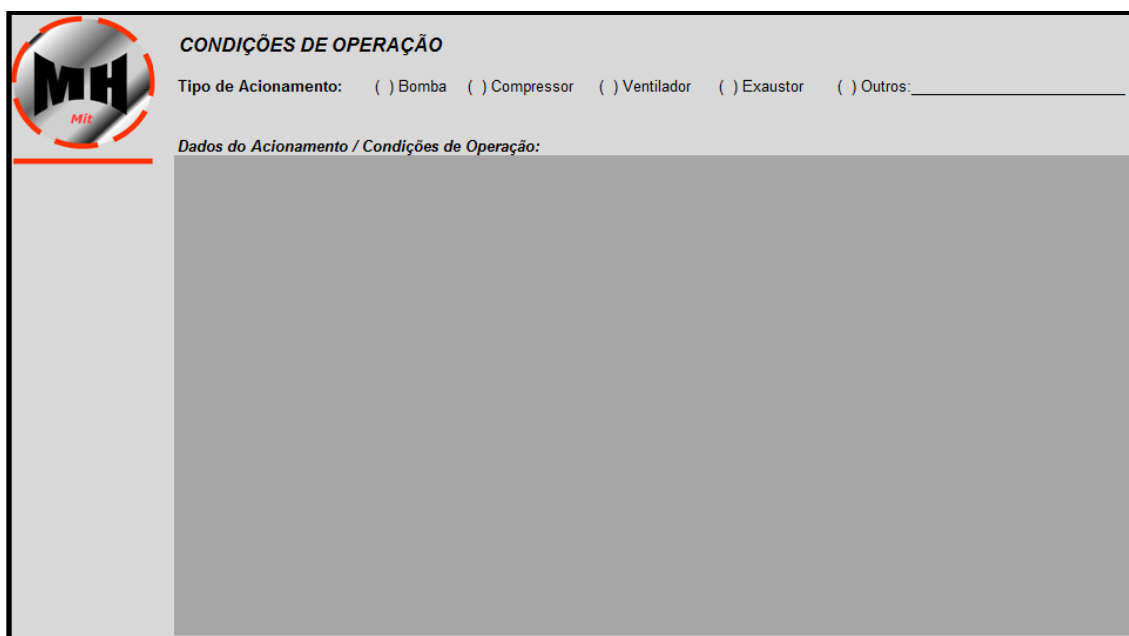
SIMULAÇÃO	
CARREGAMENTO	<input type="text"/> [%]
CORRENTE	<input type="text"/> [A]
FATOR DE POTÊNCIA	<input type="text"/>
POTÊNCIA ELÉTRICA TRIFÁSICA	<input type="text"/> [kW]

Figura 7.12 – Tela de identificação do motor elétrico proposto.

7.4.4. CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Em seguida, o usuário pode cadastrar as condições de operação do motor e da máquina. Apresentam-se as opções de cadastro para bombas, compressores, ventiladores, exaustores e outros, bem como o local onde o usuário pode inserir as condições de operação do acionamento (por exemplo, valores de pressão e vazão).

A Figura 7.13 apresenta a tela para cadastro das condições de operação do motor e da máquina.



CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Tipo de Acionamento: ☐ Bomba ☐ Compressor ☐ Ventilador ☐ Exaustor ☐ Outros: _____

Dados do Acionamento / Condições de Operação:

Figura 7.13 – Tela para cadastro das condições de operação do acionamento.

7.4.5. MÓDULO DE ENTRADA DE DADOS – MEDIÇÃO

Nesta etapa, o usuário insere os dados de tensão, corrente, fator de potência, fator de harmônicos, rotação, temperatura ambiente, altitude e número de horas de funcionamento por ano. O preenchimento desses dados é de fundamental importância para a determinação do valor do rendimento a plena carga do motor elétrico originalmente instalado. A Figura 7.14 apresenta o módulo de entrada de dados de medição do MHmit.

MÓDULO DE ENTRADA DE DADOS - MEDIÇÃO
Condição de Funcionamento: Plena Carga

TENSÃO A [V] **GDT** [%]
B [V]
C [V]

CORRENTE A [A] **TEMPERATURA AMBIENTE** [°C]
B [A] **ALTITUDE** [m]
C [A] **FUNCIONAMENTO** [horas/ano]

FP A
B
C **POTÊNCIA ELÉTRICA TRIFÁSICA** [kW]

FHT [%] **POTÊNCIA MECÂNICA** [kW]

ROTAÇÃO [rpm] **CARREGAMENTO** [%]

Ligação Estrela
 $I_{fase} = I_{linha}$
 $U_{fase} = \frac{U_{linha}}{\sqrt{3}}$

Ligação Triângulo
 $U_{fase} = U_{linha}$
 $I_{fase} = \frac{I_{linha}}{\sqrt{3}}$

Figura 7.14 – Tela do módulo de entrada de dados de medição.

7.4.6. MÓDULO DE ENTRADA DE TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA

As tarifas de energia elétrica, essenciais para os estudos de viabilidade econômica, devem ser inseridas pelo usuário nesta etapa. O aplicativo disponibiliza entrada de dados para tarifas de Baixa Tensão, Convencional, Horo-Sazonal Azul, Horo-Sazonal Verde e Cliente Livre.

Recomenda-se que essas tarifas sejam retiradas das Resoluções Homologatórias disponibilizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL¹⁷ para cada Concessionária, respectivamente.

A Figura 7.15 apresenta a tela do módulo de entrada de tarifas de energia elétrica do aplicativo MHmit.

¹⁷ http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ReajusteTarifario/Default_Aplicacao_Reajuste_Tarifario.cfm

MÓDULO DE ENTRADA DE TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA

RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA N.

Baixa Tensão
 Consumo R\$/MWh

Convencional
 Demanda R\$/kW
 Consumo R\$/MWh

Horo-Sazonal Azul
 Demanda Ponta R\$/kW
 Demanda F. Ponta R\$/kW
 Consumo Ponta Seca R\$/MWh
 Consumo Ponta Úmida R\$/MWh
 Consumo F. Ponta Seca R\$/MWh
 Consumo F. Ponta Úmida R\$/MWh

Horo-Sazonal Verde
 Demanda R\$/kW
 Consumo Ponta Seca R\$/MWh
 Consumo Ponta Úmida R\$/MWh
 Consumo F. Ponta Seca R\$/MWh
 Consumo F. Ponta Úmida R\$/MWh

Cliente Livre
 Demanda Ponta - TUSD R\$/kW
 Demanda F. Ponta - TUSD R\$/kW
 Encargos R\$/MWh
 Energia R\$/MWh

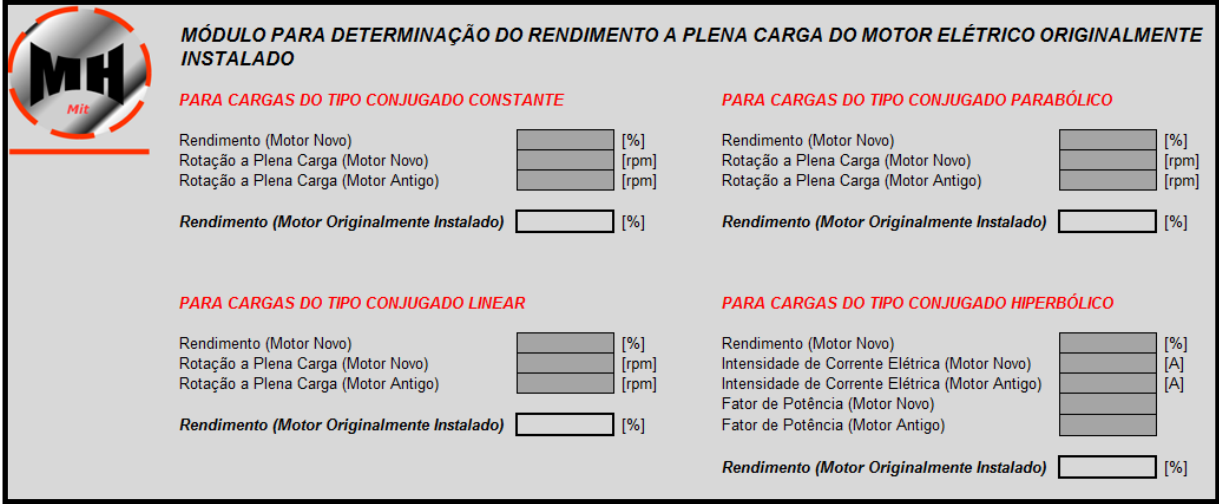
Figura 7.15 – Tela do módulo de entrada de tarifas de energia elétrica do MHmit.

7.4.7. MÓDULO PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO A PLENA CARGA DO MOTOR ELÉTRICO ORIGINALMENTE INSTALADO

Nesta etapa, o aplicativo determina os valores de rendimento à plena carga do motor elétrico originalmente instalado para cargas do tipo conjugado constante, linear, parabólico e hiperbólico.

Os valores de rendimento a plena carga são calculados utilizando-se das equações desenvolvidas na metodologia MHmit.

A Figura 7.16 apresenta a tela do módulo para determinação do rendimento a plena carga do motor elétrico originalmente instalado.



MÓDULO PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO A PLENA CARGA DO MOTOR ELÉTRICO ORIGINALMENTE INSTALADO

PARA CARGAS DO TIPO CONJUGADO CONSTANTE

Rendimento (Motor Novo) [%]
 Rotação a Plena Carga (Motor Novo) [rpm]
 Rotação a Plena Carga (Motor Antigo) [rpm]
 Rendimento (Motor Originalmente Instalado) [%]

PARA CARGAS DO TIPO CONJUGADO PARABÓLICO

Rendimento (Motor Novo) [%]
 Rotação a Plena Carga (Motor Novo) [rpm]
 Rotação a Plena Carga (Motor Antigo) [rpm]
 Rendimento (Motor Originalmente Instalado) [%]

PARA CARGAS DO TIPO CONJUGADO LINEAR

Rendimento (Motor Novo) [%]
 Rotação a Plena Carga (Motor Novo) [rpm]
 Rotação a Plena Carga (Motor Antigo) [rpm]
 Rendimento (Motor Originalmente Instalado) [%]

PARA CARGAS DO TIPO CONJUGADO HIPERBÓLICO

Rendimento (Motor Novo) [%]
 Intensidade de Corrente Elétrica (Motor Novo) [A]
 Intensidade de Corrente Elétrica (Motor Antigo) [A]
 Fator de Potência (Motor Novo)
 Fator de Potência (Motor Antigo)
 Rendimento (Motor Originalmente Instalado) [%]

Figura 7.16 – Tela do módulo para determinação do rendimento a plena carga do motor elétrico originalmente instalado.

7.4.8. MÓDULO DE REDIMENSIONAMENTO MOTRIZ

O aplicativo MHmit realiza estudos para motores com carregamento menor do que 75%. O redimensionamento é realizado para cargas com conjugados do tipo constante, linear, parabólico e hiperbólico.

De todos os programas apresentados nesta tese, o aplicativo MHmit é o único que realiza estudos de redimensionamento motriz. As equações utilizadas neste módulo foram retiradas do Capítulo 3, de acordo com LOBOSCO e DIAS (1988).

A Figura 7.17 apresenta a tela do módulo para estudos de redimensionamento motriz do aplicativo MHmit.

MÓDULO PARA ESTUDOS DE REDIMENSIONAMENTO MOTRIZ

Tipo de Conjugado:

MOTOR ORIGINALMENTE INSTALADO

1. Conjugado Nominal <input type="text"/> [N.m]	4. Momento de Inércia Total <input type="text"/> [kgm ²]	7. Conjugado Médio Acelerador <input type="text"/> [N.m]
Potência Mecânica <input type="text"/> [kW]	Conjugado Médio Acelerador <input type="text"/> [N.m]	Conjugado de Partida <input type="text"/> [N.m]
Rotação <input type="text"/> [rpm]	Tempo de Aceleração <input type="text"/> [s]	Conjugado Máximo <input type="text"/> [N.m]
2. Conjugado Exigido Carga <input type="text"/> [N.m]	Rotação <input type="text"/> [rpm]	Conjugado Resistente <input type="text"/> [kgfm]
Potência Mecânica <input type="text"/> [kW]	5. Momento de Inércia da Máquina <input type="text"/> [kgm ²]	Rotação da Carga <input type="text"/> [rpm]
Rotação <input type="text"/> [rpm]	Momento de Inércia Total <input type="text"/> [kgm ²]	Rotação Nominal do Motor <input type="text"/> [rpm]
3. Conjugado Médio Acelerador <input type="text"/> [N.m]	Momento de Inércia do Rotor <input type="text"/> [kgm ²]	8. Momento de Inércia Total <input type="text"/> [kgm ²]
Conjugado de Partida <input type="text"/> [N.m]	MOTOR PROPOSTO	Conjugado Médio Acelerador <input type="text"/> [N.m]
Conjugado Máximo <input type="text"/> [N.m]	6. Conjugado Nominal <input type="text"/> [N.m]	Rotação <input type="text"/> [rpm]
Conjugado Resistente <input type="text"/> [kgfm]	Potência Mecânica <input type="text"/> [kW]	9. Tempo de Aceleração <input type="text"/> [s]
Rotação da Carga <input type="text"/> [rpm]	Rotação <input type="text"/> [rpm]	
Rotação Nominal do Motor <input type="text"/> [rpm]		

Figura 7.17 – Tela do módulo para estudos de redimensionamento motriz.

7.4.9. MÓDULO DE ENTRADA DE DADOS – VERIFICAÇÃO

Da mesma forma que no módulo de medição, o usuário insere os dados de tensão, corrente, fator de potência, fator de harmônicos, rotação, temperatura ambiente, altitude e número de horas de funcionamento por ano. Com esses dados, o MHmit determina o desvio percentual entre os valores de economia simulado e real.

A Figura 7.18 apresenta a tela do módulo de entrada de dados de verificação do MHmit.

MÓDULO DE ENTRADA DE DADOS - VERIFICAÇÃO

Condição de Funcionamento: Plena Carga

TENSÃO A [V] B [V] C [V] **GDT** [%]

CORRENTE A [A] B [A] C [A] **TEMPERATURA AMBIENTE** [°C]

FP A B C **ALTITUDE** [m]

FHT [%] **FUNCIONAMENTO** [horas/ano]

ROTAÇÃO [rpm] **POTÊNCIA ELÉTRICA TRIFÁSICA** [kW]

POTÊNCIA MECÂNICA [kW]

CARREGAMENTO [%]

Ligação Estrela

$$I_{fase} = I_{linha}$$

$$U_{fase} = \frac{U_{linha}}{\sqrt{3}}$$

Ligação Triângulo

$$U_{fase} = U_{linha}$$

$$I_{fase} = \frac{I_{linha}}{\sqrt{3}}$$

Figura 7.18 – Tela do módulo de entrada de dados de verificação.

7.4.10. MÓDULO DE ANÁLISE ECONÔMICA

Neste módulo, o aplicativo realiza uma análise de viabilidade econômica utilizando-se das seguintes Figuras de Mérito: Tempo de Retorno do Investimento, Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno. O usuário deve completar os seguintes dados de entrada: Período de Análise, Investimento (CAPEX), Operação e Manutenção (OPEX) e Taxa de Juros.

A Figura 7.19 apresenta a tela do módulo de análise econômica.

MÓDULO DE ANÁLISE ECONÔMICA

PERÍODO DE ANÁLISE [anos]

CAPEX [R\$]

OPEX [R\$/ano]

i a.a. [%]

REDUÇÃO DE DEMANDA [R\$/ano] [kW]

ECONOMIA DE ENERGIA [R\$/ano] [MWh]

RECEITA [R\$/ano]

TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO [anos]

VALOR PRESENTE LÍQUIDO [R\$]

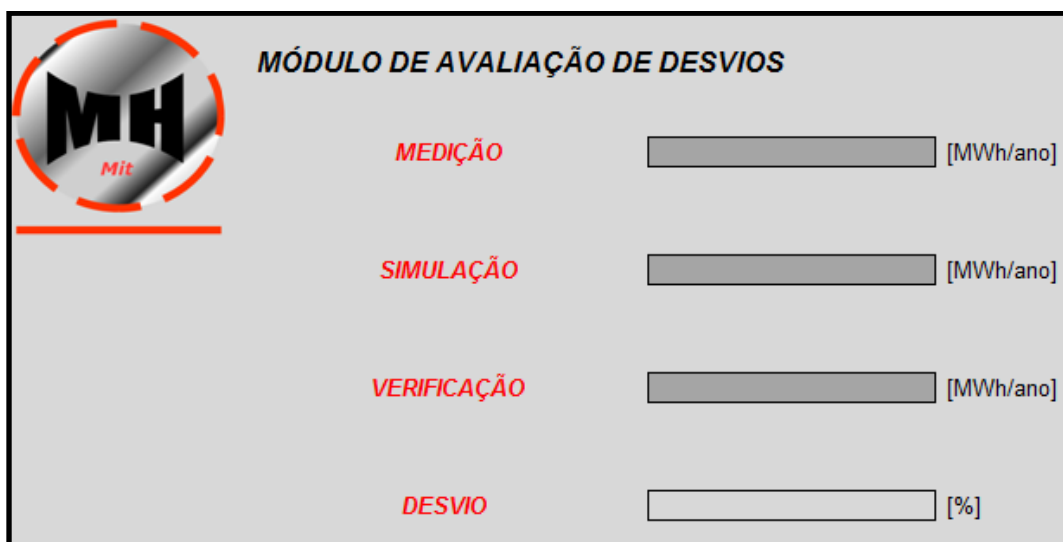
TAXA INTERNA DE RETORNO [%]

Figura 7.19 – Tela do módulo de análise econômica.

7.4.11. MÓDULO DE AVALIAÇÃO DE DESVIOS

Nesta etapa, o usuário pode verificar o desvio percentual entre o valor simulado de economia anual de energia elétrica e real, obtido após a substituição do motor elétrico.

A Figura 7.20 apresenta o módulo de avaliação de desvios do aplicativo MHmit.



MÓDULO DE AVALIAÇÃO DE DESVIOS

MEDIÇÃO [MWh/ano]

SIMULAÇÃO [MWh/ano]

VERIFICAÇÃO [MWh/ano]

DESVIO [%]

Figura 7.20 – Tela do módulo de avaliação de desvios.

7.4.12. MÓDULO DE CADASTRO DE FOTOS

Nesta etapa, o usuário pode inserir as fotos do motor originalmente instalado e do novo motor para manter um cadastro visual dos serviços realizados. Recomenda-se o preenchimento da data e do local da instalação do motor (unidade fabril, setor, entre outros).

A Figura 7.21 apresenta o módulo de cadastro de fotos do aplicativo MHmit.



MÓDULO DE CADASTRO DE FOTOS

Data: Local: 

Data: Local: 

Figura 7.21 – Tela do módulo de cadastro de fotos.

7.4.13. BANCO DE DADOS

Os dados cadastrados para motores de 2, 4, 6 e 8 pólos, dos tipos padrão e alto rendimento, são os seguintes:

- Ano de Fabricação.
- Tipo.
- Número de pólos.
- Potência nominal do motor [cv].
- Potência nominal do motor [kW].
- Carcaça.
- Rotação [rpm].
- Corrente nominal [A].
- Corrente com rotor bloqueado.
- Conjugado nominal [kgf.m].
- Conjugado com rotor bloqueado.
- Conjugado máximo.
- Rendimento [%] (carregamentos 50, 75 e 100%).
- Fator de potência (carregamentos 50, 75 e 100%).
- Fator de serviço.
- Momento de inércia [kgm²].
- Tempo máximo com rotor bloqueado [s].
- Massa [kg].
- Índice de proteção.
- Rolamento dianteiro [mm].
- Rolamento traseiro [mm].

A Tabela 7.1 apresenta a tela de cadastro do banco de dados do aplicativo MHmit para motores WEG do tipo padrão, fabricados no ano de 1979.

Tabela 7.1 - Tela de cadastro de motores WEG.

Ano	Tipo	Nº Pólos	Potência		Carga	RPM	Corrente		Ip/In	Cn	Cp/Cn	Cmax./Cn	Rendimento		Fator de Potência		FS	J	Trib	Massa	IP	Rolamentos	
			cv	kW			220V	380 V					100%	100%									
1979	P	2	0.33	0.25	71	3520	1.5	0.85	3.0		3.0	3.5	61%	0.70	1.25	0.0005			8.5		6203-Z	6202-Z	
1979	P	2	0.5	0.37	71	3520	2.0	1.2	3.1		3.0	3.0	65	0.75	1.25	0.0006			8.5		6203-Z	6202-Z	
1979	P	2	0.75	0.55	71	3510	3.0	1.7	5.9		3.0	3.0	65	0.75	1.25	0.0006			10		6203-Z	6202-Z	
1979	P	2	1	0.75	80	3520	3.6	2.0	6.2		3.0	3.0	67	0.80	1.25	0.0015			14		6204-Z	6203-Z	
1979	P	2	1.5	1.1	80	3520	5.0	2.8	7.8		3.0	2.8	72	0.80	1.2	0.0016			14		6204-Z	6203-Z	
1979	P	2	2	1.5	90S	3520	6.4	3.6	6.6		3.0	2.6	74	0.82	1.2	0.0020			18		6205-Z	6204-Z	
1979	P	2	3	2.2	90L	3510	9.0	5.2	6.6		2.8	2.5	78	0.83	1.15	0.0026			23		6205-Z	6204-Z	
1979	P	2	4	3	100L	3500	11	6.3	7.6		3.0	3.0	82	0.86	1.15	0.0064			31		6206-Z	6205-Z	
1979	P	2	5	3.7	112M	3520	15	8.5	7.4		3.0	3.0	79	0.82	1.15	0.0087			42		6307-Z	6206-Z	
1979	P	2	7.5	5.5	112M	3520	21	12	8.7		3.0	3.2	80	0.86	1.15	0.0103			46		6307-Z	6206-Z	
1979	P	2	10	7.5	132S	3520	28	16	7.2		2.5	2.8	80	0.86	1.15	0.0179			62		6308-Z	6207-Z	
1979	P	2	15	11	132M	3530	40	23	8.5		2.5	3.5	84	0.86	1	0.0220			72		6308-Z	6207-Z	
1979	P	2	20	15	160M	3530	52	30	6.3		2.5	3.0	84	0.88	1.15	0.0530			115		6309	6209-Z	
1979	P	2	25	18.5	160L	3540	65	38	6.8		2.5	2.8	84	0.88	1.15	0.0600			127		6309	6209-Z	
1979	P	2	30	22	180M	3540	78	45	6.8		2.5	2.5	84	0.88	1.1	0.209			172		6311	6211-Z	
1979	P	2	40	30	200L	3550	105	60	6.5		2.4	2.1	84	0.88	1.1	0.320			246		6312	6212-Z	
1979	P	2	50	37	200L	3550	130	75	6.5		2.4	2.1	84	0.88	1.1	0.333			273		6312	6212-Z	
1979	P	2	60	45	225S/M	3570	145	85	6.5		3.0	2.8	89	0.89	1	0.44			305		6314	6314	
1979	P	2	75	55	225S/M	3570	185	105	7.0		3.0	3.0	88	0.90	1	0.48			374		6314	6314	
1979	P	2	100	75	250M	3570	240	140	7.5		3.0	3.0	89	0.90	1	0.61			465		6314	6314	
1979	P	2	125	90	280S/M	3550	300	175	7.5		2.8	3.0	92	0.89	1	1.22			639		6316	6316	
1979	P	2	150	110	280S/M	3570	350	200	7.5		2.4	3.0	90	0.92	1	1.27			678		6316	6316	
1979	P	2	200	150	315S/M	3570	480	280	8.5		2.5	2.9	90	0.90	1	1.49			782		6316	6316	
1979	P	4	0.33	0.25	71	1720	1.6	0.90	4.3		3.0	3.1	60	0.66	1.25	0.0006			8.5		6203-Z	6202-Z	
1979	P	4	0.5	0.37	71	1720	2.2	1.2	4.0		3.0	3.1	63	0.70	1.25	0.0008			9.5		6203-Z	6202-Z	
1979	P	4	0.75	0.55	80	1725	3.0	1.7	5.7		3.0	3.2	69	0.70	1.25	0.0015			13		6204-Z	6203-Z	
1979	P	4	1	0.75	80	1720	4.2	2.5	5.6		3.0	3.1	66	0.70	1.25	0.0016			14		6204-Z	6203-Z	
1979	P	4	1.5	1.1	90S	1725	5.2	3.0	6.3		3.0	2.8	75	0.75	1.2	0.0056			18		6205-Z	6204-Z	
1979	P	4	2	1.5	90L	1725	6.8	4.0	7.1		3.0	2.8	76	0.75	1.2	0.0074			22		6205-Z	6204-Z	
1979	P	4	3	2.2	100L	1730	9.5	5.5	6.5		3.0	3.0	76	0.80	1.15	0.0075			28		6206-Z	6205-Z	
1979	P	4	4	3	100L	1740	12	7.0	6.5		3.0	2.6	79	0.82	1.15	0.0084			30		6206-Z	6205-Z	
1979	P	4	5	3.7	112M	1740	15	8.5	6.4		3.0	2.8	79	0.82	1.15	0.0157			43		6307-Z	6206-Z	
1979	P	4	6	4.4	112M	1740	17	10	6.0		2.5	2.7	81	0.84	1.15	0.0177			47		6307-Z	6206-Z	
1979	P	4	7.5	5.5	132S	1745	21	12	5.5		2.5	2.7	82	0.84	1.15	0.0285			58		6308-Z	6207-Z	
1979	P	4	10	7.5	132M	1745	28	16	7.0		2.5	2.7	82	0.84	1.15	0.0330			67		6308-Z	6207-Z	
1979	P	4	12.5	9.2	132M	1745	34	19	6.4		2.5	2.8	84	0.85	1	0.0400			74		6308-Z	6207-Z	
1979	P	4	15	11	160M	1760	40	23	5.8		2.5	3.0	84	0.86	1.15	0.0900			119		6309	6209-Z	
1979	P	4	20	15	160L	1765	52	30	7.2		2.2	3.0	86	0.86	1.15	0.101			130		6309	6209-Z	
1979	P	4	25	18.5	180M	1765	65	38	6.5		2.2	2.6	86	0.86	1.1	0.250			177		6311	6211-Z	

Fonte: (WEG,1979).

7.4.14. RELATÓRIO EXECUTIVO

Por fim, o aplicativo MHmit apresenta ao usuário um relatório executivo com os principais resultados obtidos pela substituição dos motores elétricos.

A Figura 7.22 apresenta o relatório executivo disponibilizado pelo MHmit.





 <p>Motor Original</p>  <p>Motor Proposto</p>  <p>Equipamento Utilizado</p> 	<p>RELATÓRIO EXECUTIVO</p> <p>Empresa / Unidade</p> <p>Endereço Fone Fax</p> <p>Responsável Técnico Celular E-mail</p> <p>Segmento () PEE () Contrato de Performance</p> <p>Concessionária Modalidade Tarifária</p> <p>Gerente de Contas Fone E-mail</p> <p>Número de Motores Número de Motores de Indução Trifásicos</p> <p>Empresa Contratada - M&V Responsável</p> <p>Motor Originalmente Instalado:</p> <p>Motor Proposto:</p> <p> Tipo de Acionamento:</p> <p>REDIMENSIONAMENTO MOTRIZ</p> <p>Motor Originalmente Instalado:</p> <p>Conjugado Nominal [N.m]</p> <p>Potência Mecânica [kW]</p> <p>Rotação [rpm]</p> <p>Motor Proposto:</p> <p>Conjugado Nominal [N.m]</p> <p>Potência Mecânica [kW]</p> <p>Rotação [rpm]</p> <p>Tempo de Aceleração [s]</p>	<p>MEDICÃO</p> <p>Condição de Funcionamento: Plena Carga</p> <p>Data:</p> <p>TENSÃO Fase A [V] GDT [%]</p> <p>Fase B [V]</p> <p>Fase C [V]</p> <p>CORRENTE Fase A [A] TEMP. AMBIENTE [°C]</p> <p>Fase B [A] ALTITUDE [m]</p> <p>Fase C [A]</p> <p>FHT [%] FUNCIONAMENTO [horas/ano]</p> <p>ROTAÇÃO [rpm]</p> <p>VERIFICAÇÃO</p> <p>Condição de Funcionamento: Plena Carga</p> <p>Data:</p> <p>TENSÃO Fase A [V] GDT [%]</p> <p>Fase B [V]</p> <p>Fase C [V]</p> <p>CORRENTE Fase A [A] TEMP. AMBIENTE [°C]</p> <p>Fase B [A] ALTITUDE [m]</p> <p>Fase C [A]</p> <p>FHT [%] FUNCIONAMENTO [horas/ano]</p> <p>ROTAÇÃO [rpm] DESVIO [%]</p>	<p>RENDIMENTO A PLENA CARGA</p> <p>CONJUGADO CONSTANTE</p> <p>Rendimento (Motor Novo) [%]</p> <p>Rotação a Plena Carga (Motor Novo) [rpm]</p> <p>Rotação a Plena Carga (Motor Antigo) [rpm]</p> <p>Rendimento (Motor Originalmente Instalado) [%]</p> <p>CONJUGADO LINEAR</p> <p>Rendimento (Motor Novo) [%]</p> <p>Rotação a Plena Carga (Motor Novo) [rpm]</p> <p>Rotação a Plena Carga (Motor Antigo) [rpm]</p> <p>Rendimento (Motor Originalmente Instalado) [%]</p> <p>CONJUGADO PARABÓLICO</p> <p>Rendimento (Motor Novo) [%]</p> <p>Rotação a Plena Carga (Motor Novo) [rpm]</p> <p>Rotação a Plena Carga (Motor Antigo) [rpm]</p> <p>Rendimento (Motor Originalmente Instalado) [%]</p> <p>CONJUGADO HIPERBÓLICO</p> <p>Rendimento (Motor Novo) [%]</p> <p>Intensidade de Corrente Elétrica (Motor Novo) [A]</p> <p>Intensidade de Corrente Elétrica (Motor Antigo) [A]</p> <p>Fator de Potência (Motor Novo)</p> <p>Fator de Potência (Motor Antigo)</p> <p>Rendimento (Motor Originalmente Instalado) [%]</p> <p>ANÁLISE ECONÔMICA</p> <p>Redução de Demanda [R\$/ano]</p> <p>Economia de Energia [R\$/ano]</p> <p>Recicla [R\$/ano]</p> <p>Tempo de Retorno do Investimento [anos]</p> <p>Valor Presente Líquido [R\$]</p> <p>Taxa Interna de Retorno [%]</p>
---	--	---	--

Figura 7.22 – Relatório Executivo.

CAPÍTULO 8 - ESTUDO DE CASO

8.1. INTRODUÇÃO

A seguir, será apresentado um estudo de caso que contempla a substituição de um motor antigo do tipo padrão, fabricado no ano de 1979, por um motor de alto rendimento, fabricado em 2006, ambos da marca WEG, 100 cv, 4 pólos, 440 V. O motor aciona um ventilador utilizado em processo industrial e funciona 8640 horas por ano. Este estudo de caso contempla a utilização de todas as metodologias apresentadas nesta tese, inclusive a metodologia MHmit.

8.2. DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

A primeira etapa realizada no estudo de caso foi a constatação da necessidade de substituição do motor elétrico originalmente instalado, devido ao fato de ser muito antigo e se encontrar em condições precárias de funcionamento. Os funcionários da empresa não souberam informar se este motor foi rebobinado anteriormente ou sofreu reparos por parte do departamento de manutenção.

A Tabela 8.1 apresenta os dados de placa do motor em estudo para valores nominais.

Tabela 8.1 – Dados de placa do motor originalmente instalado.

Grandeza	Valor
Tensão	440 V
Intensidade de Corrente	120 A
Rendimento	90 %
Fator de Potência	0,9
Rotação	1780 rpm

Para a realização deste estudo de caso, ajustaram-se os parâmetros de funcionamento da máquina para obtenção de 100 % de carregamento do motor elétrico originalmente instalado, obtido quando o valor da intensidade de corrente elétrica medida for igual ao valor da intensidade da corrente nominal.

Por meio da utilização de equipamento analisador de potência e qualidade de energia elétrica trifásico e tacômetro digital, efetuaram-se as medições no motor originalmente instalado.

A Tabela 8.2 apresenta os valores das medições efetuadas no motor em estudo.

Tabela 8.2 – Medições realizadas no motor originalmente instalado.

Grandeza	Valor
Tensão	440 V
Intensidade de Corrente	120 A
Fator de Potência	0,8
Rotação	1750 rpm

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos para cada metodologia em estudo nesta tese.

8.2.1. METODOLOGIA BD MOTOR

O programa BD Motor foi utilizado neste estudo para determinar o rendimento do motor elétrico em operação. Como dado de entrada, utilizou-se o valor da intensidade de corrente elétrica medida pelo equipamento analisador de potência e qualidade de energia elétrica trifásico. O motor selecionado pelo software foi o de número 637, 100 cv, 4 pólos, fabricado no ano de 1997.

A Figura 8.1 apresenta os dados dos parâmetros do motor WEG, n. 637.

Sigla do Fabricante	Tipo	RPM	Grau de Proteção	Fabricante
WEG	Padrão	1800	IP54	Cadastrar >>

Num. 637

Potencia(CV)	100	Rendimento 50%	90	Momento de Inércia (kgm²)	0.948
Caixa	250 S/M	Rendimento 75%	92	Tempo com Rotor Bloqueado (s)	6
RPM Assinc.	1775	Rendimento 100%	92.5	Nível de Ruído (dB)	81
Corrente Nominal (A)	240	Fator de Potência 50%	0.76	Peso(kg)	442
Corrente Rotor Bloqueado	8.8	Fator de Potência 75%	0.84	Preço (R\$)	3091.97
Conjugado Nominal (kgfm)	40.3	Fator de Potência 100%	0.87	Garantia (Anos)	2
Conjugado Rotor Bloqueado	3.2	Fator de Serviço	1	Ano de Fabricação	1997
Conjugado Máximo	3.2				

Figura 8.1 – Motor n. 637 – 100 cv, 4 pólos, 440V, fabricado em 1997.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

A Figura 8.2 apresenta a tela de resultados das condições de operação do motor elétrico trifásico em estudo, segundo BD Motor (2003).

Potência Nominal		Corrente Nominal (220V)	
100 cv	73,6 kW	240,00 A	

Potência de Saída (Ps)	50 %	75 %	100 %
73,533 kW	I (A) 70,60	93,73	120,01
P. de Saída / P. nominal	Ps (kW) 36,802	55,203	73,602
99,91 (%)			

V nominal	I medido >>>	Executar
440 V	120 A	

Figura 8.2 – Condições de operação do motor elétrico em estudo.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

Neste caso, o valor do rendimento apresentado pelo programa BD Motor para funcionamento a plena carga é de 92,5 %.

8.2.2. METODOLOGIA MARK IV

O programa Mark IV utiliza como dado de entrada o valor da intensidade de corrente elétrica medida pelo equipamento analisador de potência e qualidade de energia elétrica trifásico, que neste estudo foi de 120 A.

Primeiramente cadastraram-se os dados do motor elétrico. Esses dados foram retirados do catálogo *on line* da WEG (2006). Mais uma vez, considera-se que o usuário terá acesso apenas ao catálogo atual, não possuindo em seus arquivos, um catálogo específico para um motor fabricado em 1979.

A Figura 8.3 apresenta a tela de identificação do motor utilizado para simulação no Mark IV (2002).

Identificação do Motor	
Ventilador	
Dados de Placa	
Marca	WEG
Tensão [V]	440
Corrente Nominal (In) [A]	120
Potência Nominal (Pn)	100
Unidade da Potência	cv
Fases	Trifásico
Rotação [rpm]	1780
Fator de Serviço [pu]	1

Figura 8.3 – Tela de identificação do motor utilizado na simulação.

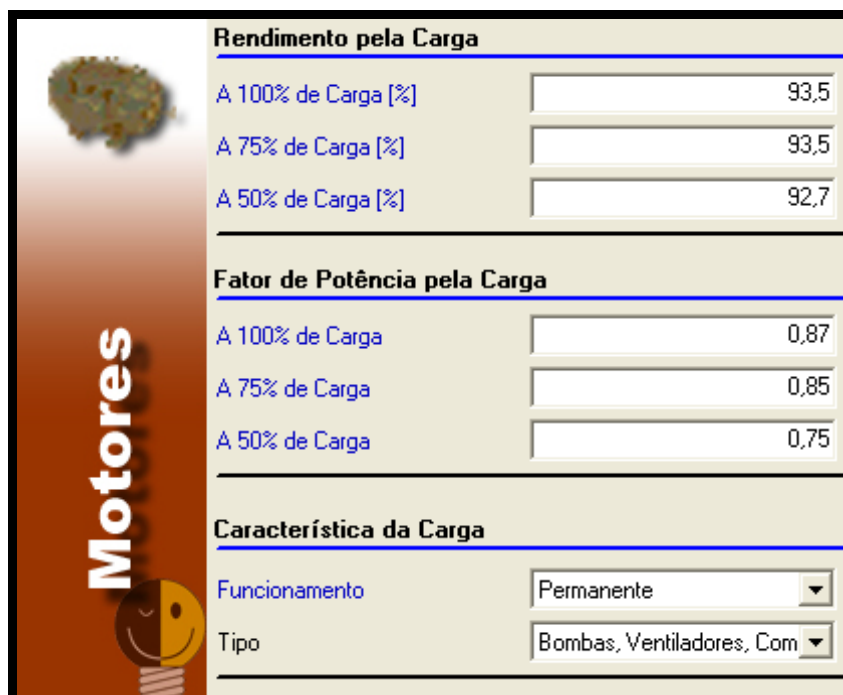
Fonte: (MARK IV, 2002).

Em seguida, o programa solicita os valores de rendimento do motor elétrico, para carregamentos de 50, 75 e 100%. Esses dados foram retirados do catálogo do fabricante.

Da mesma maneira, cadastraram-se os valores de fator de potência para carregamentos de 50, 75 e 100% utilizando-se do mesmo catálogo.

Como característica de funcionamento, selecionou-se a opção permanente, ou seja, regime contínuo, bem como o tipo de acionamento: bombas, ventiladores ou compressores (cargas do tipo conjugado parabólico).

A Figura 8.4 apresenta a segunda etapa para a determinação do rendimento do motor elétrico originalmente instalado, segundo Mark IV (2002).



The screenshot shows a software window titled 'Motores' with a vertical orange bar on the left containing the word 'Motores' and a smiley face icon. The main area is divided into three sections:

Rendimento pela Carga	
A 100% de Carga [%]	93,5
A 75% de Carga [%]	93,5
A 50% de Carga [%]	92,7

Fator de Potência pela Carga	
A 100% de Carga	0,87
A 75% de Carga	0,85
A 50% de Carga	0,75

Característica da Carga	
Funcionamento	Permanente
Tipo	Bombas, Ventiladores, Com

Figura 8.4 – Tela de cadastro dos parâmetros do motor elétrico em funcionamento.

Fonte: (MARK IV, 2002).

Em seguida, o programa solicita os valores de tensão e intensidade de corrente elétrica (ou rotação) do motor elétrico originalmente instalado, bem como o número de dias por mês de funcionamento (30 dias - 8640 horas por ano). O motor em estudo funciona 24 horas por dia (horário de ponta e fora de ponta).

A Figura 8.5 apresenta a terceira etapa para a determinação das condições de operação do motor elétrico em estudo utilizando-se o programa MARK IV (2002).



Motores

Medições

Tensão no Motor [V]

Medida Escolhida

Valor da Medição

Funcionamento

Dias por Mês [dias]

Horas por Dia

Fora de Ponta [horas]

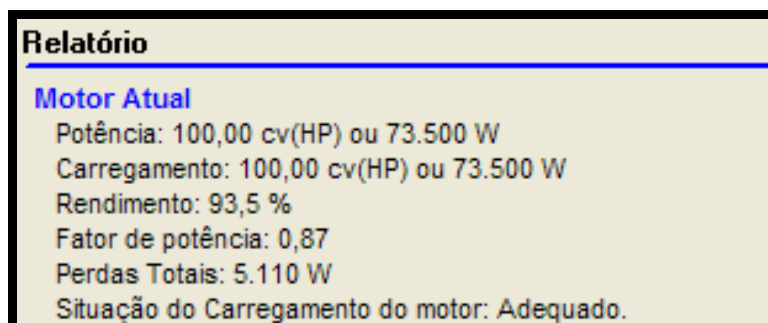
Na Ponta [horas]

Figura 8.5 – Tela de entrada de dados de medição e funcionamento do motor elétrico originalmente instalado.

Fonte: (MARK IV, 2002).

Por fim, o MARK IV apresenta a tela de resultados das condições de operação do motor elétrico. Como se pode observar, o valor do rendimento do motor original em funcionamento é de 93,5%, sendo seu carregamento 100 %.

Para este estudo de caso, o programa não foi capaz de oferecer um motor elétrico para a substituição. A Figura 8.6 apresenta a tela de relatório do MARK IV (2002).



Relatório

Motor Atual

Potência: 100,00 cv(HP) ou 73.500 W

Carregamento: 100,00 cv(HP) ou 73.500 W

Rendimento: 93,5 %

Fator de potência: 0,87

Perdas Totais: 5.110 W

Situação do Carregamento do motor: Adequado.

Figura 8.6 – Tela de relatório do motor elétrico originalmente instalado.

Fonte: (MARK IV, 2002).

8.2.3. METODOLOGIA CONVENCIONAL

Para a metodologia convencional, há necessidade de se utilizar o valor da intensidade de corrente elétrica do motor em funcionamento. Desta forma, através de medição por meio do equipamento analisador de potência e qualidade de energia trifásico, determinou-se o valor de 120 A.

Em seguida, utilizando-se as curvas de um motor elétrico do tipo padrão, 100 cv, 4 pólos, 440 V, disponível para *download* no site da WEG, determinaram-se os valores de rendimento e fator de potência.

A Figura 8.7 apresenta as curvas de um motor elétrico fabricado em 2006. Essas são utilizadas para determinar os parâmetros de um motor elétrico fabricado em 1979.

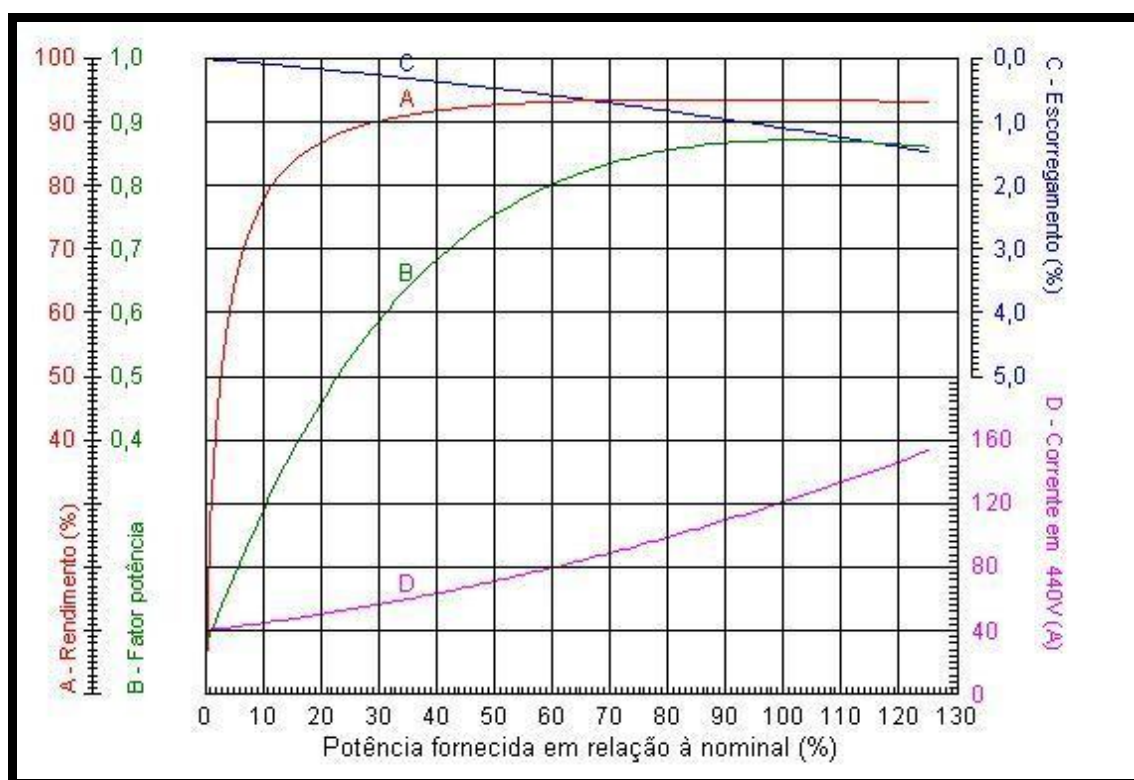


Figura 8.7 – Curvas do motor WEG do tipo padrão, 4 pólos, 440 V, fabricado em 2006.

Fonte: (WEG, 2006).

Graficamente, determinaram-se os valores de rendimento e carregamento de 93,5 % e 101 %.

8.2.4. METODOLOGIA MOTOR MASTER

Para a seleção do motor elétrico, optou-se pela utilização de um banco de dados específico padrão IEC, correspondente aos motores WEG instalados no Brasil.

A Figura 8.8 apresenta a tela do Motor Master onde o usuário pode escolher o banco de dados que deseja trabalhar, com opções para IEC 60 Hz e NEMA 50 e 60 Hz.



Figura 8.8 – Tela do programa Motor Master para a seleção do banco de dados.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

Para esse estudo, selecionou-se um motor da marca WEG, disponível no banco de dados, conforme Figura 8.9 (MOTOR MASTER, 2005).

Manufacturer	Model	Catalog	HP	Encl	Eff FL IEE
Premium Efficiency	NEMA Table 12-12	MG-1-2004	100		
WEG Electric Motors	Tru Metric - Cast Iron	07518EP3G280	100	TEFC	
WEG Electric Motors	Tru Metric - Cast Iron	07518EP3E280	100	TEFC	
Energy-Efficient	NEMA Table 12-11	MG-1-2004	100		

Figura 8.9 – Seleção do motor elétrico utilizado no estudo de caso.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

Os parâmetros do motor elétrico selecionado são apresentados na Figura 8.10.

Manufacturer <input type="text" value="WEG Electric Motors"/>		Efficiency (%)		Power Factor (%)	
Model <input type="text" value="Tru Metric - Cast Iron"/>		Full Load <input type="text" value="94.5"/>		Full Load <input type="text" value="87.0"/>	
Catalog <input type="text" value="07518EP3G2805"/>		75% Load <input type="text" value="94.1"/>		75% Load <input type="text" value="83.0"/>	
Motor type <input type="text" value="IEC (Metric)"/>		50% Load <input type="text" value="93.0"/>		50% Load <input type="text" value="75.0"/>	
Size (kW - HP) <input type="text" value="75 - 100"/>		25% Load <input type="text" value=""/>		25% Load <input type="text" value=""/>	
Speed (RPM) <input type="text" value="1800"/>		Torque (ft-lbs)		Amperage (amps)	
Full load speed (RPM) <input type="text" value="1785"/>		Full Load <input type="text" value="290.1"/>		Full Load <input type="text" value="114.0"/>	
Enclosure type <input type="text" value="TEFC"/>		Breakdown <input type="text" value="812.4"/>		Idle <input type="text" value="35.0"/>	
Frame No. <input type="text" value="280S/M"/>		Locked Rotor <input type="text" value="783.4"/>		Locked Rotor <input type="text" value="912.0"/>	
Voltage rating <input type="text" value="460 volts"/>		Stalled rotor time (sec.)		Peak voltage	
Definite purpose <input type="text" value=""/>		Hot <input type="text" value="21.0"/>		@ 0 ms. <input type="text" value=""/>	
U-Frame <input type="checkbox"/>		Cold <input type="text" value="46.2"/>		@ 5 ms. <input type="text" value=""/>	
C-Face <input type="checkbox"/>		Rotor bars <input type="text" value="0"/>		Stator slots <input type="text" value="0"/>	
Vertical shaft <input type="checkbox"/>		D-Flange <input type="checkbox"/>			
Service factor <input type="text" value="1.15"/>		Insulation Class <input type="text" value="F"/>			
Weight (lbs.) <input type="text" value="1455.0"/>		List Price (\$) <input type="text" value="7287"/>			
Winding resistance (mOhms@25C) <input type="text" value=""/>		Warranty (yrs) <input type="text" value="2.0"/>			

Figura 8.10 – Parâmetros do motor elétrico selecionado.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

Como se pode notar, uma das dificuldades encontradas pelo usuário é o valor da tensão nominal do motor selecionado de 460 V. Todos os motores disponíveis no programa Motor Master não possuem tensão de 440 V, conforme valor nominal do motor em estudo.

Desta maneira, serão apresentadas duas formas de obtenção do valor do rendimento utilizando-se o Motor Master. A primeira (Análise A) por meio da utilização do valor de carregamento igual a 100 %. A segunda (Análise B) por meio da utilização de equação matemática disponível no manual do programa Motor Master. Essa equação auxilia o usuário no tocante a determinação do valor do carregamento do motor elétrico quando este possui tensão nominal diferente das tensões disponíveis no banco de dados.

ANÁLISE A

A Figura 8.11 apresenta o valor do rendimento do motor elétrico em estudo de acordo com o programa Motor Master (*Efficiency %*), utilizando-se como dado de entrada o valor do carregamento igual a 100 % (MOTOR MASTER, 2005).

Existing Motor

Description: <Default standard efficiency motor>

Size (HP) / Speed (RPM) (Poles): 100 / 1800 (4)

Enclosure / Voltage (Volts): TEFC / 460

Load (%): 100,0

Efficiency (%): 92,3

Figura 8.11 – Rendimento do motor elétrico em estudo segundo o programa Motor Master - Análise A.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

ANÁLISE B

A Análise B contempla a utilização da equação fornecida pelo programa Motor Master para a determinação do valor do carregamento do motor elétrico em estudo, sendo que este possui tensão nominal diferente das tensões dos motores disponíveis no banco de dados do programa. O valor do carregamento pode ser obtido por meio da Equação 8.1 (MOTOR MASTER, 2005).

$$\text{Carregamento \%} = \left[\frac{I_{\text{med}}}{I_{\text{nom}}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\text{med}}}{U_{\text{nom}}} \right] \cdot 100\% \quad (8.1)$$

Onde:

I_{med} = intensidade de corrente elétrica – valor medido [A].

I_{nom} = intensidade de corrente elétrica – valor nominal [A].

U_{med} = tensão – valor medido [V].

U_{nom} = tensão – valor nominal [V].

Assim, foi obtido o valor de carregamento de 100,68 %. A Figura 8.12 apresenta o valor do rendimento do motor elétrico para a Análise B (MOTOR MASTER, 2005).

Existing Motor

Description: <Default standard efficiency>

Size (HP) / Speed (RPM) (Poles): 100 / 1800 (4)

Enclosure / Voltage (Volts): TEFC / 460

Load (%): 100.68

Efficiency (%): 92.3

Figura 8.12 – Rendimento do motor elétrico em estudo segundo o programa Motor Master - Análise B.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

8.2.5. METODOLOGIA MHmit

Para a metodologia MHmit, utilizaram-se dados reais de parâmetros do motor elétrico originalmente instalado, fabricado no ano de 1979.

A Figura 8.13 apresenta a tela de identificação do motor elétrico originalmente instalado.

IDENTIFICAÇÃO - MOTOR ELÉTRICO ORIGINALMENTE INSTALADO

MARCA	Weg	FATOR DE SERVIÇO	1
ANO DE FABRICAÇÃO	1979	MOMENTO DE INÉRCIA	1.06 [kgm ²]
TIPO	Padrão	TEMPO COM ROTOR BLOQUEADO	[s]
N. POLOS	4	MASSA	430 [kg]
POTÊNCIA	100 [cv]	ÍNDICE DE PROTEÇÃO	
CARCAÇA	250M	ROLAMENTO DIANTEIRO	6314
ROTAÇÃO	1780 [rpm]	ROLAMENTO TRASEIRO	6314
TENSÃO	440 [V]		
CORRENTE	120 [A]		
Ip / In	7.1		
CONJUGADO	[kgfm]		
RENDIMENTO	90 [%]		
FATOR DE POTÊNCIA	0.9		

Figura 8.13 – Identificação do motor elétrico originalmente instalado.

A Figura 8.14 apresenta a tela do módulo de entrada de dados de medição do aplicativo MHmit para o motor originalmente instalado.

MÓDULO DE ENTRADA DE DADOS - MEDIÇÃO
Condição de Funcionamento: Plena Carga

TENSÃO

A	440	[V]
B	439	[V]
C	441	[V]

CORRENTE

A	69,90	[A]
B	68,80	[A]
C	69,40	[A]

FP

A	0,81	
B	0,79	
C	0,80	

FHT

	1,5	[%]
--	-----	-----

ROTAÇÃO

	1750	[rpm]
--	------	-------

GT

	0,23	[%]
--	------	-----

TEMPERATURA AMBIENTE

	32	[°C]
--	----	------

ALTITUDE

	3	[m]
--	---	-----

FUNCIONAMENTO

	8640	[horas/ano]
--	------	-------------

POTÊNCIA ELÉTRICA TRIFÁSICA

	73,16	[kW]
--	-------	------

POTÊNCIA MECÂNICA

	62,57	[kW]
--	-------	------

CARREGAMENTO

	85	[%]
--	----	-----

Ligação Estrela

$$I_{fase} = I_{linha}$$

$$U_{fase} = \frac{U_{linha}}{\sqrt{3}}$$

Ligação Triângulo

$$U_{fase} = U_{linha}$$

$$I_{fase} = \frac{I_{linha}}{\sqrt{3}}$$

Figura 8.14 – Tela do módulo de entrada de dados de medição.

O motor fabricado em 1979 não consegue mais operar com carregamento igual a 100 %, mesmo em condições nominais de funcionamento, mostrando que ao longo do tempo sofreu envelhecimento. Muitas vezes, dependendo da situação de carregamento, não consegue mais manter a carga em funcionamento.

Em seguida, utilizando-se o módulo para determinação do rendimento a plena carga do motor elétrico originalmente instalado, obteve-se o valor de 85,5 %, de acordo com a Figura 8.15.

MÓDULO PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO A PLENA CARGA DO MOTOR ELÉTRICO ORIGINALMENTE INSTALADO

PARA CARGAS DO TIPO CONJUGADO CONSTANTE

Rendimento (Motor Novo)		[%]
Rotação a Plena Carga (Motor Novo)		[rpm]
Rotação a Plena Carga (Motor Antigo)		[rpm]
Rendimento (Motor Originalmente Instalado)		[%]

PARA CARGAS DO TIPO CONJUGADO PARABÓLICO

Rendimento (Motor Novo)	90	[%]
Rotação a Plena Carga (Motor Novo)	1780	[rpm]
Rotação a Plena Carga (Motor Antigo)	1750	[rpm]
Rendimento (Motor Originalmente Instalado)	85,5	[%]

PARA CARGAS DO TIPO CONJUGADO LINEAR

Rendimento (Motor Novo)		[%]
Rotação a Plena Carga (Motor Novo)		[rpm]
Rotação a Plena Carga (Motor Antigo)		[rpm]
Rendimento (Motor Originalmente Instalado)		[%]

PARA CARGAS DO TIPO CONJUGADO HIPERBÓLICO

Rendimento (Motor Novo)		[%]
Intensidade de Corrente Elétrica (Motor Novo)		[A]
Intensidade de Corrente Elétrica (Motor Antigo)		[A]
Fator de Potência (Motor Novo)		
Fator de Potência (Motor Antigo)		
Rendimento (Motor Originalmente Instalado)		[%]

Figura 8.15 – Rendimento do motor elétrico em estudo.

A Figura 8.16 apresenta os resultados dos rendimentos e carregamentos obtidos por meio das várias metodologias utilizadas neste estudo de caso.

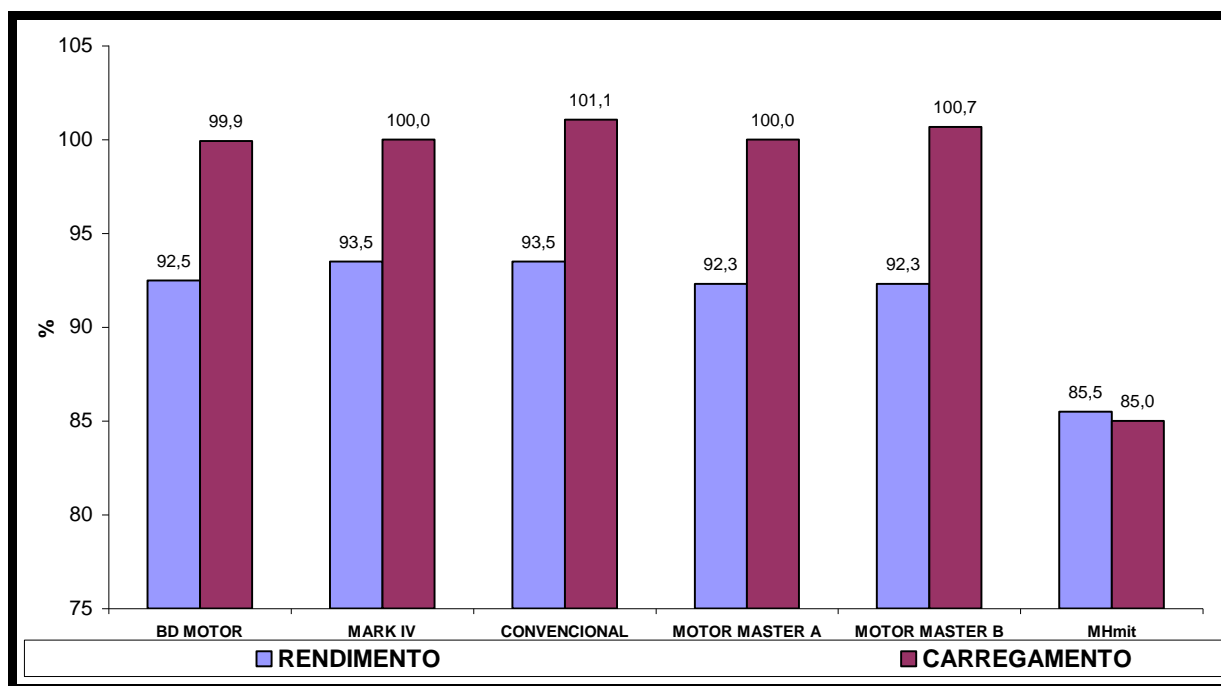


Figura 8.16 – Apresentação dos rendimentos e carregamentos obtidos para cada metodologia utilizada no estudo de caso.

8.3. ESTUDOS PARA SUBSTITUIÇÃO DO MOTOR ORIGINAL

Esta etapa tem por objetivo apresentar, por meio de análise de curvas (método convencional) e simulações (BD Motor, Motor Master e MHmit) estudos para a substituição de um novo motor. Foi adotada como premissa a substituição por um motor da marca WEG, do tipo alto rendimento e de mesma potência nominal.

8.3.1. METODOLOGIA CONVENCIONAL

Para este estudo, faz-se necessário a utilização do valor do carregamento percentual do motor originalmente instalado, determinado anteriormente (101,1 %).

Em seguida, utilizando-se do gráfico disponibilizado pela WEG, para um motor do tipo alto rendimento fabricado no ano de 2006, 100 cv, 440 V, 4 pólos, determinaram-se os valores de intensidade de corrente elétrica de 121 A e fator de potência de 0,86.

A Figura 8.17 apresenta as curvas de parâmetros do motor de alto rendimento em estudo.

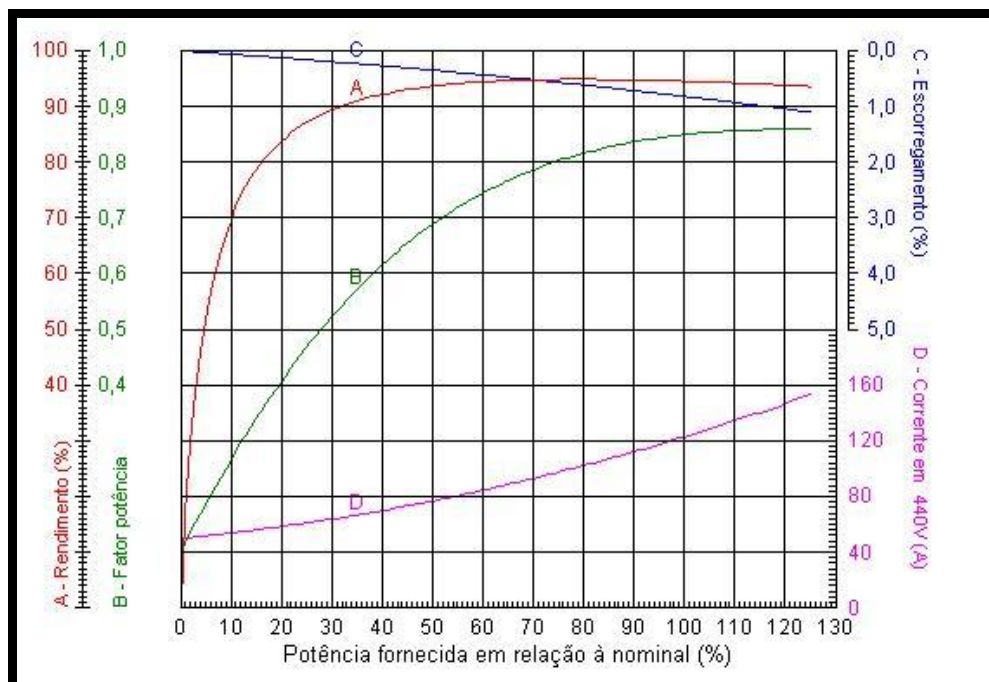


Figura 8.17 – Determinação da intensidade de corrente elétrica e fator de potência de um motor WEG alto rendimento, 4 pólos, 440 V, fabricado em 2006.

Fonte: (WEG, 2006).

Por meio da Equação 8.2, determinou-se o valor da potência ativa trifásica.

$$P = \sqrt{3}.V.I.\cos \varphi = 78,38kW \quad (8.2)$$

Com o valor da potência ativa trifásica, determinou-se o valor da redução de potência por meio da diferença entre a potência elétrica ativa trifásica do motor originalmente instalado e o valor apresentado pelo método convencional. Este valor foi de 1,18 kW, equivalente a 1,48 %.

Nesta metodologia, utilizou-se o valor médio ponderado das tarifas de energia elétrica da Concessionária Escelsa para o ano de 2006 - Tarifas Horó-Sazonal Azul A4, de R\$ 153,18 / MWh.

Assim, para este estudo, o método convencional apresentou uma economia anual de R\$ 1.562,00. Neste caso, o Tempo de Retorno do Investimento seria de 5,4 anos.

8.3.2. METODOLOGIA BD MOTOR

Primeiramente selecionou-se no banco de dados do programa um motor da marca WEG, tipo alto rendimento, 100 cv, 4 pólos, 440 V.

A Figura 8.18 apresenta os parâmetros do motor n.1506 fabricado no ano de 2003, conforme BD MOTOR (2003).

Sigla do Fabricante	Tipo	RPM	Grau de Proteção	Fabricante
WEG	Alto Rendimento	1800	IP55	Cadastrar >>

Num. 1506

Potencia(CV)	100	Rendimento 50%	93	Momento de Inércia (kgm ²)	1,155
Carcapa	250S/M	Rendimento 75%	94,2	Tempo com Rotor Bloqueado (s)	10
RPM Assinc.	1780	Rendimento 100%	94,5	Nível de Ruído (dB)	75
Corrente Nominal (A)	245	Fator de Potência 50%	0,69	Peso(kg)	510
Corrente Rotor Bloqueado	8,4	Fator de Potência 75%	0,8	Preço (R\$)	8422,67
Conjugado Nominal (kgfm)	40,2247	Fator de Potência 100%	0,85	Garantia (Anos)	2
Conjugado Rotor Bloqueado	3	Fator de Serviço	1,15	Ano de Fabricação	2003
Conjugado Máximo	3,3				

Figura 8.18 – Motor n. 1506 – 100 cv, 4 pólos, 440 V, alto rendimento, fabricado em 2003.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

Por meio de simulação, determinou-se para o mesmo valor de potência mecânica (73,53 kW), o valor da intensidade de corrente elétrica após a substituição do novo motor.

A Figura 8.19 apresenta a tela com o valor da intensidade de corrente elétrica simulada para o motor de alto rendimento n.1506, segundo BD Motor (2003).

Dimensionamento por Corrente >>> Motor 1506 - WEG

Potência Nominal		Corrente Nominal (220V)	
<input type="text" value="100"/> cv	<input type="text" value="73,6"/> kW	<input type="text" value="245,00"/> A	

Potência de Saída (Ps)	50 %	75 %	100 %
<input type="text" value="73,535"/> kW	<input type="text" value="75,25"/> A	<input type="text" value="96,11"/> A	<input type="text" value="120,23"/> A
P. de Saída / P. nominal			
<input type="text" value="99,912"/> (%)	<input type="text" value="36,8"/> kW	<input type="text" value="55,198"/> kW	<input type="text" value="73,6"/> kW

V_{nominal}
 V

I medido >>> A

Executar

Figura 8.19 – Simulação do valor da intensidade de corrente elétrica do motor de alto rendimento n. 1506.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

Neste caso, após a instalação do motor de alto rendimento, este apresentaria um valor de intensidade de corrente elétrica de 119,88 A.

Em seguida, o programa BD Motor oferece um estudo de viabilidade econômica entre um motor em uso (padrão), comparado com um motor novo (alto rendimento).

Neste caso, o usuário deve adotar um valor de Carregamento % próximo ao valor determinado. As opções são: 50, 75 e 100 %. Adotou-se a opção de 100 %, conforme valor apresentado anteriormente (99,9 %).

Foi considerada a perda de rendimento de 3% (opções de 0 a 5 %) devido ao fato do motor ser muito antigo.

Foi considerada também a opção de carga centrífuga, bem como o valor da tarifa média ponderada Horo-Sazonal Azul A4 da Concessionária Escelsa.

A Figura 8.20 apresenta as premissas utilizadas para a realização do estudo de viabilidade econômica, segundo BD Motor (2003).

Comparação Entre Motores (Em Uso X Novo)

Motor 637 - WEG	Motor 1506 - WEG
Potência (cv) <input type="text" value="100"/>	Potência (cv) <input type="text" value="100"/>
Carga (%) <input type="text" value="100"/>	Carga (%) <input type="text" value="100"/>
Rendimento (%) <input type="text" value="92,5"/>	Rendimento (%) <input type="text" value="94,5"/>
Perda Rend. (%) <input type="text" value="3"/>	Preço (R\$) <input type="text" value="8500,00"/>
Total Horas (Ano) <input type="text" value="8640"/>	Desconto (%) <input type="text" value="0"/>
	Total Horas (Ano) <input type="text" value="8640"/>
Tarifa média de energia <input type="text" value="0,15318"/> (R\$/kWh)	Carga Centrífuga <input checked="" type="radio"/> Sim <input type="radio"/> Não
	<input type="button" value="Executar"/> <input type="button" value="Fechar"/>

Figura 8.20 – Premissas adotadas para a realização do estudo de viabilidade econômica.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

Por fim, o programa BD Motor apresenta o estudo de viabilidade econômica para a substituição do motor padrão por de alto rendimento.

A Figura 8.21 apresenta a tela com os resultados obtidos (BD Motor, 2003).

Consumo Ativo no Ano (kWh - R\$)

<input type="text" value="710507,26"/> kWh	<input type="text" value="678616,92"/> kWh
<input type="text" value="108835,50"/> R\$	<input type="text" value="103950,54"/> R\$

Retorno da diferença do investimento (Payback) - Motor 1506

meses

Diferença Invest. : R\$

Economia por Ano : kWh R\$

Figura 8.21 – Resultados do estudo de viabilidade econômica.

Fonte: (BD MOTOR, 2003).

Segundo o programa BD Motor, o Tempo de Retorno do Investimento seria de 21 meses.

8.3.3. METODOLOGIA MOTOR MASTER

Primeiramente o usuário deve selecionar a opção de cenário de análise. Neste caso, foi selecionado um motor existente a ser substituído por um novo.

No espaço para o preenchimento dos dados do motor existente, devem-se completar as opções de carregamento (*Load %*), rotação a plena carga (*Full load RPM*) e perda de eficiência (*Old motor efficiency loss %*), devido ao envelhecimento do motor original ao longo de sua vida útil. Neste caso, adotou-se a opção de 3%, mesmo valor utilizado na simulação por meio do programa BD Motor.

Em seguida, o *software* seleciona um motor para substituição da marca WEG, alto rendimento, denominado *Premium Efficiency Motor*.

Para o motor de alto rendimento, o Motor Master preenche os dados automaticamente. Nesta etapa, notam-se as diferenças de rendimento, de 89,3% (considerando perdas por envelhecimento) para o motor em estudo e 95,4% para o motor proposto.

A Figura 8.22 apresenta a tela de comparação entre os motores original (padrão) e proposto (alto rendimento) para o cenário de substituição do motor existente (*Replace Existing*), segundo Motor Master (2005).

The screenshot displays the Motor Master software interface for the 'Replace Existing' scenario. The interface is divided into two main sections: 'Motor Characteristics' and 'Costs/Use'.

Motor Characteristics Section:

- Existing Motor:**
 - Description: <Default standard efficiency>
 - Size (HP) / Speed (RPM) (Poles): 100 / 1800 (4)
 - Enclosure / Voltage (Volts): TEFC / 460
 - Load (%): 100,0
 - Efficiency (%): 89,3
 - Full load RPM: 1785
 - Old Motor Efficiency Loss (%): 3
 - ☒ Centrifugal load
- Premium-Efficiency Motor:**
 - Description: <Default premium efficiency motor>
 - Size (HP) / Speed (RPM) (Poles): 100 / 1800 (4)
 - Enclosure / Voltage (Volts): TEFC / 460
 - Load (%): 100,0
 - Efficiency (%): 95,4
 - Full load RPM: 0

Costs/Use Section:

- Buttons: Select Motor, Lifecycle

At the top of the window, there are buttons for Scenario (Replace Existing), Savings, Best Available, Print, Help, and Close.

Figura 8.22 – Tela de comparação para o cenário de substituição do motor existente.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

Em seguida, o programa solicita ao usuário o preenchimento das tarifas de demanda e energia, bem como o valor do fator de potência (adotado como 0,92). As tarifas foram convertidas para dólar [US\$¹⁸] (Concessionária Escelsa - Tarifas Horo-Sazonal Azul A4).

A vida útil do motor elétrico foi considerada como sendo 15 anos. A Figura 8.23 apresenta a tela de entrada de parâmetros para a análise econômica (MOTOR MASTER, 2005).

Costs/Use	
Utility Data	
Energy price (\$/kWh):	0,07659
Demand charge (\$/kW/mo.):	7,22 <input checked="" type="radio"/> kW <input type="radio"/> kVA
Power factor (%):	92,0
Rebate program:	<None>
Simple payback criteria, yrs:	15

Figura 8.23 – Tela de entrada de parâmetros para análise econômica.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

Por fim, o programa apresenta os resultados da simulação. Os valores compreendem a economia anual de energia elétrica, redução de demanda, valor monetário da energia economizada e valor monetário proveniente da redução de demanda.

Para este estudo de caso, o programa apresenta o Tempo de Retorno do Investimento como sendo de 1,95 anos.

A Figura 8.24 apresenta a tela de resultados do Motor Master para o presente estudo de caso.

Energy Savings	
Energy (kWh/yr):	32.049
Demand (kW):	5,3
Energy savings (\$/yr):	2.455
Demand savings (\$/yr):	463
Total savings (\$/yr):	2.917
Simple payback (yrs):	1,95

Figura 8.24 – Tela de resultados do Motor Master.

Fonte: (MOTOR MASTER, 2005).

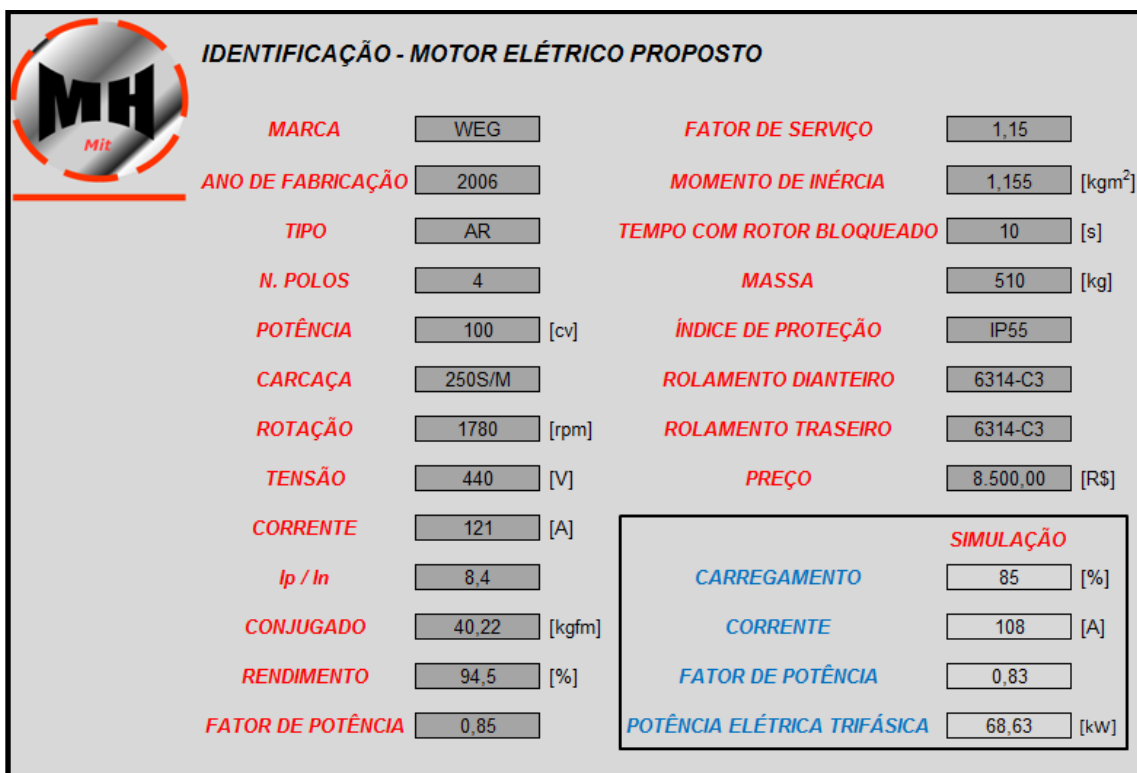
¹⁸ Cotação dólar comercial – US\$ 1,00 = R\$ 2,05 (06/05/2006 – www.debit.com.br)

8.3.4. METODOLOGIA MHmit

No estudo para a substituição do novo motor, foi necessária a utilização do valor do carregamento do motor elétrico originalmente instalado, determinado anteriormente de 85 %.

Em seguida, selecionou-se no banco de dados do aplicativo um motor de alto rendimento da marca WEG, 100 cv, 440 V, 4 pólos, fabricado no ano de 2006. O MHmit determinou os valores de intensidade de corrente elétrica (108 A), fator de potência (0,83) e potência elétrica ativa trifásica (68,63 kW) para o respectivo valor de carregamento.

A Figura 8.25 apresenta o motor de alto rendimento proposto.



IDENTIFICAÇÃO - MOTOR ELÉTRICO PROPOSTO

MARCA	WEG	FATOR DE SERVIÇO	1,15
ANO DE FABRICAÇÃO	2006	MOMENTO DE INÉRCIA	1,155 [kgm ²]
TIPO	AR	TEMPO COM ROTOR BLOQUEADO	10 [s]
N. POLOS	4	MASSA	510 [kg]
POTÊNCIA	100 [cv]	ÍNDICE DE PROTEÇÃO	IP55
CARCAÇA	250S/M	ROLAMENTO DIANTEIRO	6314-C3
ROTAÇÃO	1780 [rpm]	ROLAMENTO TRASEIRO	6314-C3
TENSÃO	440 [V]	PREÇO	8.500,00 [R\$]
CORRENTE	121 [A]	SIMULAÇÃO CARREGAMENTO 85 [%] CORRENTE 108 [A] FATOR DE POTÊNCIA 0,83 POTÊNCIA ELÉTRICA TRIFÁSICA 68,63 [kW]	
<i>Ip / In</i>	8,4		
CONJUGADO	40,22 [kgfm]		
RENDIMENTO	94,5 [%]		
FATOR DE POTÊNCIA	0,85		

Figura 8.25 – Motor de alto rendimento proposto.

Neste caso, a redução de potência compreendeu 4,53 kW, equivalente a 6,19 %.

Utilizando-se das tarifas (THS Azul A4) de demanda e consumo de energia elétrica, retiradas da Resolução Homologatória n° 363, de 3 de agosto de 2006 - Espírito Santo Centrais Elétricas S.A. – ESCELSA, apresentam-se as seguintes economias (sem impostos):

Redução de Potência → R\$ 228,13 / mês.

Economia de Energia → R\$ 499,24 / mês.

Total → R\$ 727,37 / mês ou R\$ 8.728,44 / ano

Tempo de Retorno do Investimento → 12,3 meses.

A Figura 8.26 apresenta os resultados do módulo de análise econômica do MHmit.

MÓDULO DE ANÁLISE ECONÔMICA

PERÍODO DE ANÁLISE 15 [anos]

CAPEX 8.500,00 [R\$]

OPEX 0,00 [R\$/ano]

i a.a. 10 [%]

REDUÇÃO DE DEMANDA 2.737,56 [R\$/ano] 4,53 [kW]

ECONOMIA DE ENERGIA 5.990,88 [R\$/ano] 39,10 [MWh/ano]

RECEITA 8.728,44 [R\$/ano]

TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO 1,03 [anos] 12,32 [meses]

VALOR PRESENTE LÍQUIDO 52.626,55 [R\$]

TAXA INTERNA DE RETORNO 102,68 [%]

Figura 8.26 – Resultados do módulo de análise econômica.

8.4. SUBSTITUIÇÃO POR MOTOR DE ALTO RENDIMENTO

Após a substituição por motor de alto rendimento, novas medições foram realizadas por meio da utilização do equipamento analisador de potência e qualidade de energia elétrica, bem como do tacômetro digital. Essas medições são apresentadas na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 – Medições realizadas no motor de alto rendimento.

Grandeza	Valor
Tensão	440 V
Intensidade de Corrente	107,8 A
Fator de Potência	0,83
Rotação	1790 rpm

A Figura 8.27 apresenta os valores de economia anual de energia elétrica apresentados pelas metodologias em estudo em relação do valor real.

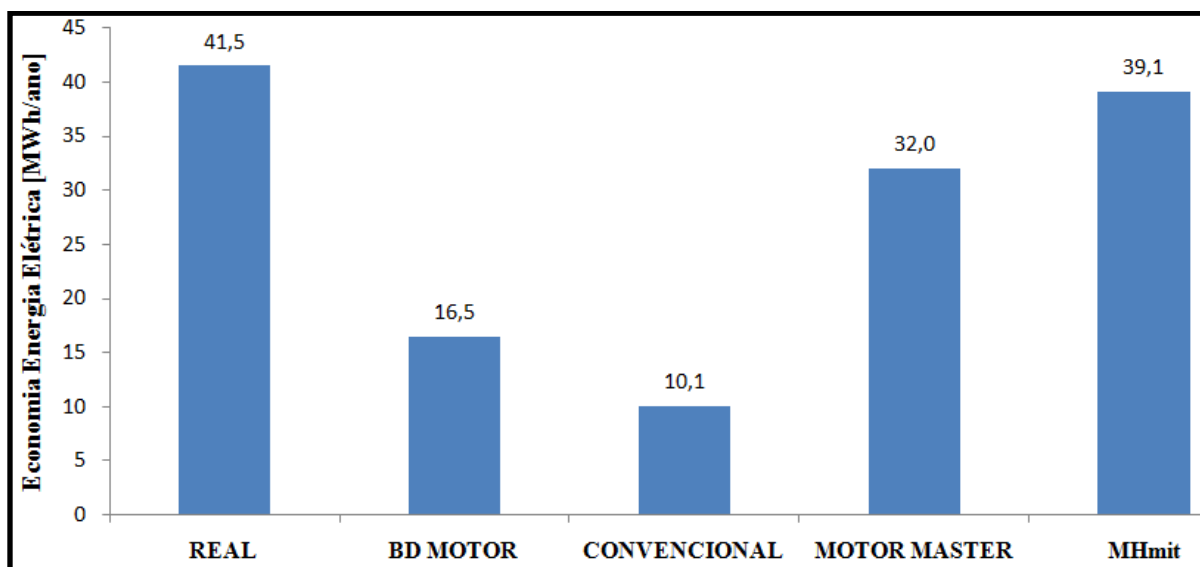


Figura 8.27 – Valores de economia anual de energia elétrica apresentados pelas metodologias em estudo em relação ao valor real.

A Figura 8.28 apresenta os desvios percentuais obtidos para cada metodologia em relação ao valor real.

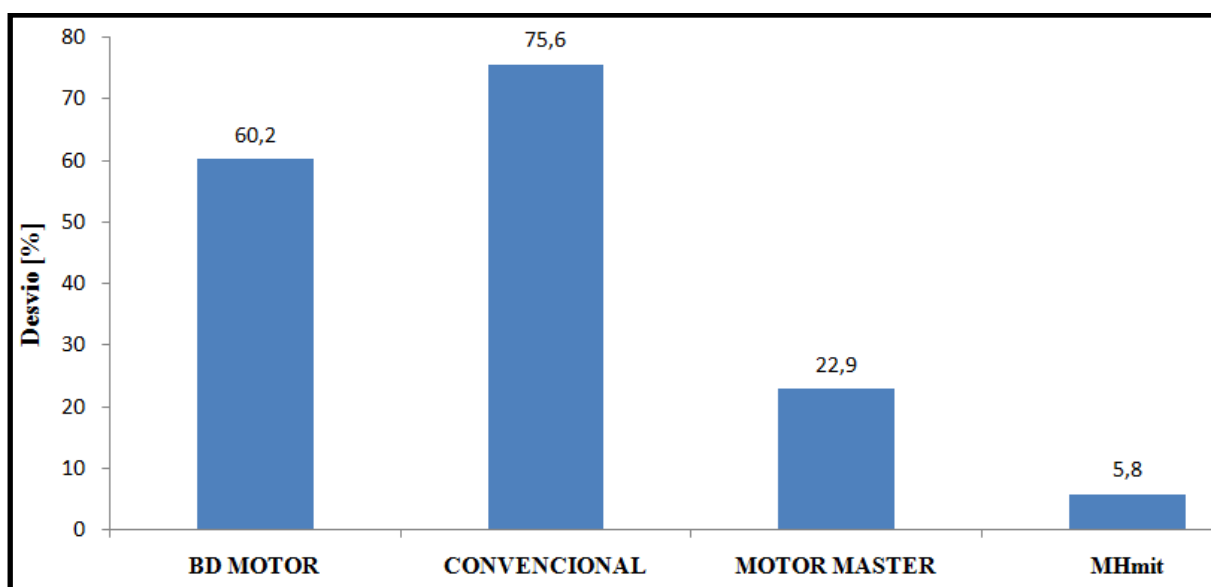


Figura 8.28 – Desvios percentuais obtidos para cada Metodologia.

CAPÍTULO 9 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DO PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

9.1. INTRODUÇÃO

Os estudos de caso foram realizados em um grupo industrial do ramo alimentício. Do início de 2005 ao final de 2006 foram substituídos 86 motores, com potência compreendida entre 7,5 e 125 cv, totalizando 3870 cv. O investimento para a aquisição dos motores elétricos foi proveniente de Programa de Eficiência Energética da ANEEL.

A substituição de motores de mesma potência nominal foi um procedimento aplicado em acionamentos onde o carregamento do motor do tipo padrão encontrava-se acima de 75%. Neste caso, o custo da substituição refere-se apenas à aquisição do motor de alto rendimento, uma vez que não houve necessidade de adaptação pela utilização de carcaças normalizadas.

O redimensionamento motriz foi um procedimento aplicado nos acionamentos onde o carregamento do motor do tipo padrão encontrava-se abaixo de 75%. Neste caso, o custo da substituição incluiu, além do motor de alto rendimento, as modificações necessárias para a sua adaptação à máquina, em função das diferenças de dimensões entre os mesmos.

Durante os procedimentos de verificação, tomou-se o devido cuidado em reproduzir as mesmas condições de operação das medições iniciais, tais como: velocidade, vazão, pressão, entre outros. Foram verificadas também as condições mecânicas das máquinas, principalmente quanto aos desgastes e desalinhamentos devido às substituições dos motores.

Foram verificadas também as diferenças nos valores da tensão de alimentação, bem como variações climáticas e alterações nos produtos produzidos ou suas características, ocorridas no intervalo entre a medição e a verificação.

Os motores substituídos, todos da marca WEG, possuíam em média, mais de 20 anos de uso.

9.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS

A Tabela 9.1 apresenta os motores elétricos originalmente instalados, divididos por tipo de acionamento.

Tabela 9.1 – Apresentação dos motores elétricos originalmente instalados.

Nº Motores	Máquina	Potência Motor [cv]	Potência Grupo [cv]
3	Bomba água gelada - Grupo 1	10	30,0
9	Bomba água gelada - Grupo 2	12,5	112,5
5	Bomba água gelada - Grupo 3	15	75,0
5	Bomba água gelada - Grupo 4	20	100,0
9	Bomba condensação - Grupo 1	15	135,0
3	Bomba condensação - Grupo 2	15	45,0
4	Bomba condensação - Grupo 3	30	120,0
2	Bomba torre - Grupo 1	25	50,0
2	Bomba torre - Grupo 2	20	40,0
2	Bomba torre - Grupo 3	10	20,0
2	Bomba torre - Grupo 4	15	30,0
2	Compressor ar - Grupo 1	40	80,0
3	Compressor ar - Grupo 2	125	375,0
6	Compressor refrigeração - Grupo 1	100	600,0
2	Compressor refrigeração - Grupo 2	100	200,0
1	Compressor refrigeração - Grupo 3	12,5	12,5
14	Concha - Grupo 1	125	1.750,0
8	Ventilador - Grupo 1	7,5	60,0
2	Ventilador - Grupo 2	10	20,0
2	Ventilador - Grupo 3	7,5	15,0
TOTAL			3.870

A Tabela 9.2 apresenta a economia real de energia elétrica obtida com a instalação dos motores de alto rendimento. O valor da redução de demanda foi de 121 kW.

Tabela 9.2 – Economia real de energia elétrica.

Nº Motores	Máquina	Economia Real de Energia Elétrica [MWh/ano]
3	Bomba água gelada - Grupo 1	16,85
9	Bomba água gelada - Grupo 2	33,12
5	Bomba água gelada - Grupo 3	34,60
5	Bomba água gelada - Grupo 4	49,38
9	Bomba condensação - Grupo 1	36,61
3	Bomba condensação - Grupo 2	13,17
4	Bomba condensação - Grupo 3	27,64
2	Bomba torre - Grupo 1	14,34
2	Bomba torre - Grupo 2	12,40
2	Bomba torre - Grupo 3	7,75
2	Bomba torre - Grupo 4	6,97
2	Compressor ar - Grupo 1	18,21
3	Compressor ar - Grupo 2	151,07
6	Compressor refrigeração - Grupo 1	139,45
2	Compressor refrigeração - Grupo 2	18,60
1	Compressor refrigeração - Grupo 3	3,10
14	Concha - Grupo 1	113,44
8	Ventilador - Grupo 1	13,94
2	Ventilador - Grupo 2	5,81
2	Ventilador - Grupo 3	3,87
TOTAL		720,32

A Tabela 9.3 apresenta os desvios percentuais médios obtidos para cada metodologia em relação ao valor real de economia para cada grupo de motores, respectivamente.

Tabela 9.3 – Desvios percentuais médios para cada metodologia.

Nº Motores	Máquina	Convencional [%]	BD Motor [%]	Mark IV [%]	Motor Master [%]	MHmit [%]
3	Bomba água gelada - Grupo 1	54,65	50,57	-	23,67	13,43
9	Bomba água gelada - Grupo 2	46,87	40,35	48,65	24,65	15,60
5	Bomba água gelada - Grupo 3	79,43	76,67	81,34	20,59	8,21
5	Bomba água gelada - Grupo 4	82,34	79,08	79,66	27,88	9,34
9	Bomba condensação - Grupo 1	90,54	87,30	89,44	29,00	7,22
3	Bomba condensação - Grupo 2	61,63	55,88	-	31,59	13,26
4	Bomba condensação - Grupo 3	66,89	60,74	60,11	22,50	9,76
2	Bomba torre - Grupo 1	58,75	56,76	54,13	24,65	5,21
2	Bomba torre - Grupo 2	73,19	78,13	65,77	34,55	7,88
2	Bomba torre - Grupo 3	57,99	55,01	51,34	24,70	9,23
2	Bomba torre - Grupo 4	86,88	85,19	80,34	26,11	11,87
2	Compressor ar - Grupo 1	57,11	52,48	55,14	26,54	14,23
3	Compressor ar - Grupo 2	68,43	71,28	65,32	30,44	16,98
6	Compressor refrigeração - Grupo 1	59,81	57,78	-	24,87	6,72
2	Compressor refrigeração - Grupo 2	42,66	29,16	41,43	22,54	8,21
1	Compressor refrigeração - Grupo 3	59,45	45,83	67,33	31,66	6,22
14	Concha - Grupo 1	35,12	31,90	30,11	18,22	8,90
8	Ventilador - Grupo 1	61,11	50,02	54,32	27,83	10,50
2	Ventilador - Grupo 2	51,40	46,68	-	21,87	13,50
2	Ventilador - Grupo 3	39,21	35,24	45,87	17,44	6,11
VALOR MÉDIO GERAL		61,67	57,30	60,64	25,57	10,12

A Figura 9.1 apresenta a classificação das metodologias propostas nesta tese.

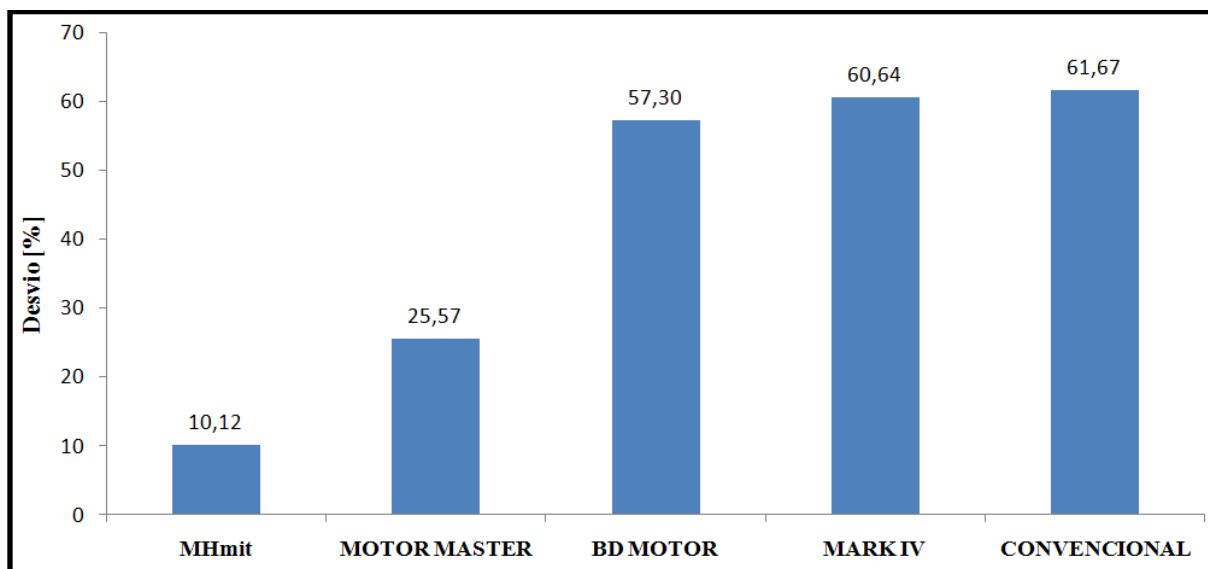


Figura 9.1 – Classificação das metodologias propostas.

9.3. ANÁLISE ECONÔMICA

Por meio dos valores medidos antes e após a substituição dos motores elétricos, constatou-se economia anual de energia elétrica de 720,32 MWh e redução de demanda de 121 kW.

No capital investido para a substituição dos 86 motores, foram considerados os valores do motor e do frete, totalizando R\$ 420.000,00.

A Tabela 9.4 apresenta os resultados do Programa de Eficiência Energética.

Tabela 9.4 – Resultados do Programa de Eficiência Energética

	Ano 0	Ano 1 ao 15
Potência Instalada [cv]	3.870	3.870
Redução de Demanda [kW]	0	121
Benefício Redução de Demanda [R\$]	0	73.123
Economia de Energia [kWh]	0	720.320
Benefício Economia de Energia [R\$]	0	110.209
Receita [R\$]	0	183.332
CAPEX [R\$]	-420.000	0
Depreciação [R\$]	0	28.000
OPEX [R\$]	0	0
Fluxo de Caixa Líquido [R\$]	-420.000	183.332
i [%]	10%	
VPL	885.850	
Tempo de Retorno do Investimento [meses]	27	
TIR	43%	

9.4. SUBSTITUIÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS

A seguir, apresentam-se as fotos das principais substituições dos motores elétricos do tipo padrão por de alto rendimento, realizadas no grupo industrial do ramo alimentício.

A Figura 9.2 apresenta a série de bombas de água gelada – grupos 2 e 3, antes e depois da substituição dos motores elétricos.



Figura 9.2 – Bombas de água gelada – grupos 2 e 3.

A Figura 9.3 apresenta a série de bombas de água gelada – grupo 4, antes e depois da substituição dos motores elétricos.



Figura 9.3 – Bombas de água gelada – grupo 4.

A Figura 9.4 apresenta a série de bombas da torre de resfriamento – grupo 4, antes e depois da substituição dos motores elétricos.



Figura 9.4 – Bombas da torre de resfriamento – grupo 4.

A Figura 9.5 apresenta o compressor de ar – grupo 2, antes e depois da substituição dos motores elétricos.

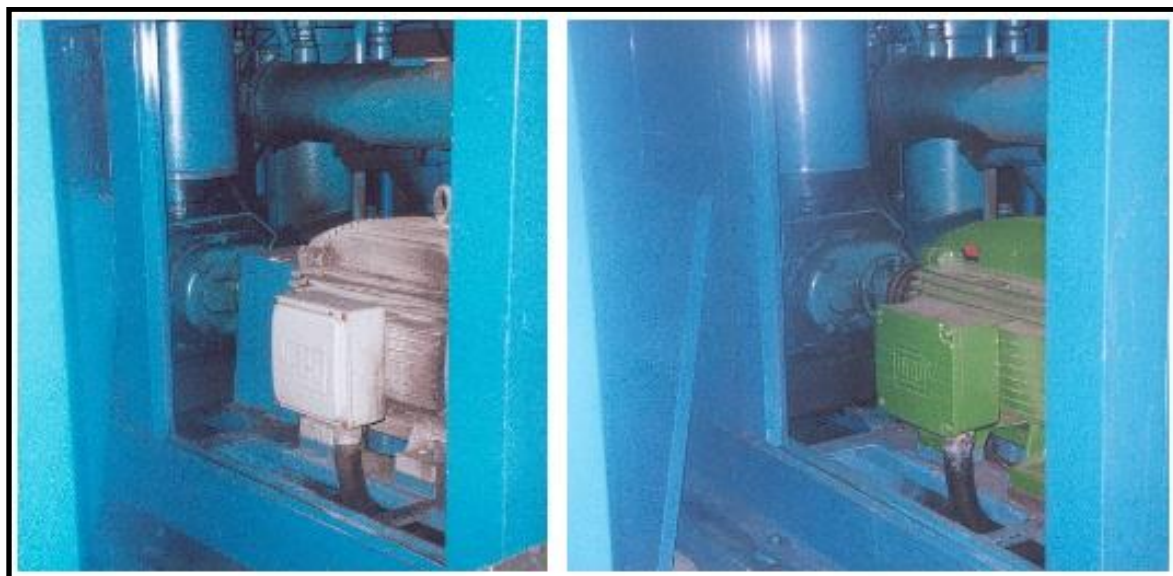


Figura 9.5 – Compressor de ar – grupo 2.

A Figura 9.6 apresenta o compressor de refrigeração – grupo 1, antes e depois da substituição dos motores elétricos.



Figura 9.6 – Compressor de refrigeração – grupo 1.

A Figura 9.7 apresenta o compressor de refrigeração – grupo 3, antes e depois da substituição dos motores elétricos.



Figura 9.7 – Compressor de refrigeração – grupo 3.

A Figura 9.8 apresenta a Concha Macintyre, antes e depois da substituição dos motores elétricos.

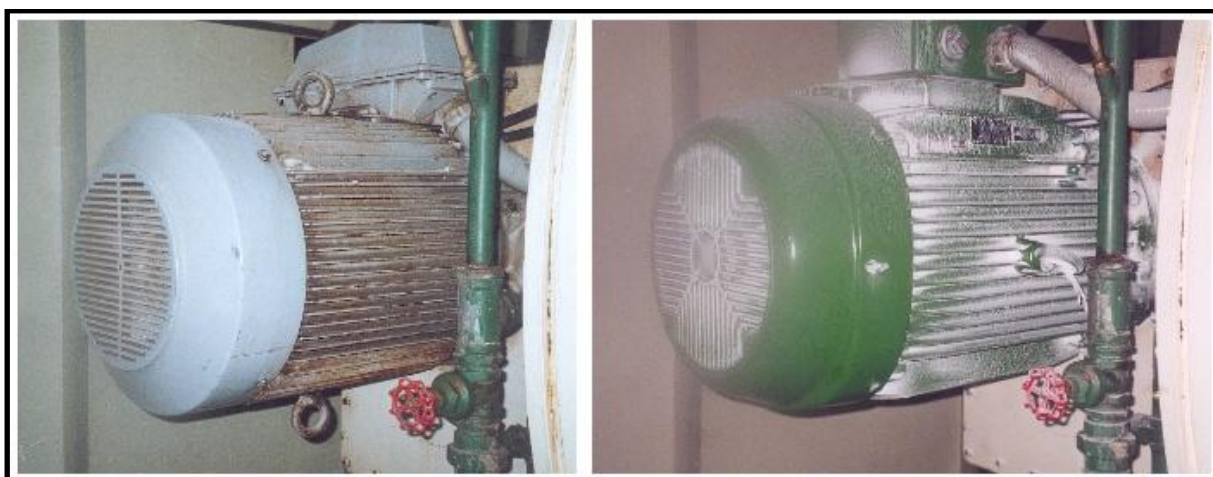


Figura 9.8 – Concha Macintyre.

CAPÍTULO 10 – CONCLUSÕES

No mundo todo, o setor que mais consome energia elétrica é o industrial. No Brasil, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética - EPE, a participação deste setor no consumo total de energia elétrica do País representa 46%. Assim, gerenciar e conservar energia elétrica na indústria desempenha um papel cada vez mais importante no planejamento do setor elétrico brasileiro, sendo que os custos dos projetos para conservar energia são significativamente inferiores que os custos para expansão do sistema elétrico. De acordo com o PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, não somente pelas dificuldades encontradas na obtenção de novos investimentos, governamentais ou privados, mas também pelos impactos ambientais que proporcionam, a conservação de energia elétrica torna-se cada vez mais um fator essencial.

Porém, durante a elaboração desta tese, observaram-se em muitas indústrias, grandes desperdícios de energia elétrica, devido à utilização de equipamentos e processos energeticamente deficientes que necessitam urgentemente de estudos voltados a substituições, modificações e atualizações, para a redução dos seus custos internos e melhor competitividade. Assim, estimar as perdas energéticas nos motores elétricos de indução trifásicos com rotor em gaiola foi de extrema importância para a verificação de sua eficiência.

Constatou-se que o diagnóstico energético teve por objetivo proporcionar a redução de custos com energia elétrica, tanto pela redução da demanda, como pela redução do consumo. Sendo o motor elétrico um equipamento de uso final de forte presença industrial, é passível de substituições, trazendo resultados satisfatórios, quando o diagnóstico é realizado de forma consistente e seguindo procedimentos coerentes para sua validação.

Assim, a primeira etapa realizada neste trabalho foi a avaliação de diagnósticos energéticos realizados por empresas que visam à conservação de energia elétrica em sistemas motrizes no âmbito industrial brasileiro, para que esses dados pudessem contribuir no desenvolvimento da metodologia MHmit. Os dados de medições fornecidos por essas empresas (266 substituições realizadas) limitaram-se apenas para equipamentos de utilidades como bombas, compressores e exaustores. As substituições compreenderam um motor elétrico trifásico com rotor em gaiola do tipo padrão cuja troca foi feita por um motor de alto rendimento, com o objetivo de comparar esses dados de medições com os valores apresentados pela Norma NEMA MG1

(1998) e ELETROBRÁS (2003), onde a substituição de motores do tipo padrão por de alto rendimento apresenta economias de 2 a 6%, teoricamente. Durante a avaliação dessas medições, verificaram-se os problemas encontrados por essas empresas antes, durante e após a substituição dos motores elétricos. Em alguns casos, a substituição de um motor antigo do tipo padrão por um motor novo do tipo alto rendimento resultou num aumento do consumo de energia elétrica.

Este trabalho também contemplou o estudo e aplicação dos procedimentos para medição e verificação de performance em projetos de eficiência energética. De acordo com o Departamento de Energia Norte-Americano, o Protocolo Internacional fornece uma visão geral das práticas atualmente utilizadas para a verificação de resultados obtidos em projetos de eficiência energética. Assim, as boas práticas de M&V permitem que os riscos da realização de um projeto de eficiência energética sejam atendidos e gerenciados de forma que possam garantir economias suficientes para o pagamento de financiamentos. Verificou-se que o referido Protocolo não apresenta metodologia específica para medição e verificação de performance para sistemas motrizes, sendo que a metodologia MHmit poderá contribuir de forma significativa no aumento das economias com energia, realização de bons projetos de engenharia, bem como na eficiência nos recursos e objetivos ambientais.

As principais metodologias atualmente utilizadas na realização de estudos para a substituição de motores elétricos dos tipos padrão e alto rendimento foram analisadas e apresentadas nesta tese com o intuito de comparar seus resultados com os apresentados pela metodologia MHmit. Foram analisadas 3 metodologias nacionais (Convencional, BD Motor e Mark IV) e a metodologia mundialmente utilizada e desenvolvida pelo Departamento de Energia Norte-Americano denominada Motor Master. As análises compreenderam uma avaliação completa e utilização de todos os recursos disponibilizados por cada uma, para aprendizado do autor e utilização em campo para todos os estudos de caso realizados neste trabalho.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta nesta tese, específica para a quantificação das perdas energéticas em motores elétricos de indução trifásicos com rotor em gaiola, por meio da determinação indireta do rendimento em condições de funcionamento a plena carga, o autor contou com a colaboração do Laboratório de Máquinas do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, que disponibilizou dados de ensaios de vários motores

de indução trifásicos com rotor em gaiola ao longo de vários anos de prestação de serviços. Esses ensaios foram de extrema importância para a validação desta metodologia.

Durante o desenvolvimento da metodologia MHmit, verificou-se que determinar o rendimento de um motor elétrico em funcionamento no seu local de trabalho é uma tarefa difícil, não somente do ponto de vista de segurança, mas também do ponto de vista técnico. Isto ocorre devido à precariedade em que se encontram as instalações elétricas de muitas indústrias brasileiras, a não utilização de equipamentos adequados para medições elétricas e pela quase inexistência de dados de parâmetros elétricos e mecânicos dos motores mais antigos, essenciais para se estimar suas condições em operação. Além disso, constatou-se que a determinação direta do conjugado é praticamente impossível, devido à inexistência de equipamentos para essa finalidade.

Assim, desenvolveu-se um banco de dados com o cadastro de parâmetros de motores elétricos de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola do ano de 1979 até 2009. Esses dados foram obtidos por meio de universidades, escolas técnicas, empresas de prestação de serviços na área motriz e usuários que por algum motivo guardaram esse material. Este banco de dados foi composto somente de motores elétricos da marca WEG.

Durante a aplicação das metodologias concluiu-se que analisar um motor elétrico antigo, por meio de dados de motores elétricos fabricados recentemente, gera um desvio percentual entre os valores de rendimento estimado e real não condizentes com a realidade, afetando, sobretudo, os estudos de viabilidade econômica, essenciais para a realização das substituições.

Durante o desenvolvimento do trabalho foram desenvolvidas equações matemáticas específicas para a determinação do rendimento do motor elétrico a plena carga baseadas no fato de que o motor elétrico perde, durante sua vida útil, conjugado e conseqüentemente rotação. Assim, o motor que no passado acionava uma carga com determinada rotação n_1 , passou atualmente a acioná-la com uma rotação menor n_2 . As equações para determinação do rendimento foram desenvolvidas para cargas com conjugado do tipo constante, linear, parabólico e hiperbólico. Foi desenvolvida também, equação específica para os casos onde o motor de alto rendimento solicita uma potência elétrica superior ao motor padrão. Neste caso, concluiu-se que o motor de alto rendimento aciona a carga numa rotação superior em relação ao motor antigo, de forma que a produção para o mesmo tempo de funcionamento também

aumenta. Assim, para a mesma quantidade produzida, o motor de alto rendimento funciona menos e conseqüentemente tem um consumo menor de energia para a realização do mesmo trabalho.

Apresentaram-se também os procedimentos de medição e verificação em motores de indução trifásicos de acordo com a metodologia MHmit, destacando-se as etapas para medição de tensão, intensidade de corrente elétrica e rotação, bem como procedimentos para a coleta de dados dos acionamentos, de extrema importância nos estudos de substituição motriz, pois antes e após as substituições, a máquina deve obrigatoriamente operar nas mesmas condições. As orientações para as coletas de dados dos acionamentos, de acordo com a metodologia proposta, foram apresentadas para compressores, bombas, exaustores e ventiladores.

Para tornar amigável a aplicação da metodologia MHmit, desenvolveu-se um aplicativo em Excel, possibilitando a determinação indireta do rendimento de motores trifásicos de indução com rotor em gaiola a plena carga. O aplicativo também auxilia o usuário no tocante a determinação da economia de energia elétrica, redução de demanda, análise de viabilidade econômica, bem como estudos de redimensionamento motriz. O MHmit apresenta ao usuário os seguintes módulos: cadastro do cliente, identificação do motor elétrico originalmente instalado, identificação do motor proposto, condições de operação, entrada de dados de medição, entrada de dados de tarifas de energia elétrica, determinação do rendimento a plena carga do motor originalmente instalado, redimensionamento motriz, entrada de dados de verificação, análise econômica, avaliação de desvios e cadastro de fotos. Por fim, o aplicativo apresenta um relatório executivo com as principais informações sobre o estudo realizado.

Foi apresentado um estudo de caso que contemplou a substituição de um motor antigo do tipo padrão, fabricado no ano de 1979, por um motor de alto rendimento, fabricado em 2006, ambos da marca WEG, 100 cv, 4 pólos, 440 V. O motor acionava um ventilador utilizado em processo industrial com funcionamento de 8640 horas por ano. Todas as metodologias, com exceção da metodologia Mark IV apresentaram projeções de economias com energia elétrica após a instalação do novo motor. Após a substituição do motor, novas medições foram realizadas para averiguação do valor real de economia de energia. Desta forma, verificaram-se valores significativos de desvios percentuais entre o valor real de economia de energia e o valor simulado para cada metodologia respectivamente. A metodologia desenvolvida nesta tese foi a única que apresentou valor de desvio satisfatório, de 5,8%.

Com o objetivo de validar a metodologia proposta MHmit, realizou-se em grupo industrial do ramo alimentício, durante 2005 e 2006, a substituição de 86 motores com potência compreendida entre 7,5 e 125 cv e investimento de R\$ 420.000,00 proveniente de Programa de Eficiência Energética da ANEEL. Esses estudos de caso contemplaram a utilização de todas as metodologias e procedimentos de medição e verificação para equipamentos de uso final – força motriz, de forma que os resultados puderam ser comparados com os valores apresentados pela metodologia MHmit. Todos os motores instalados foram pagos em 27 meses, sendo que o Valor Presente Líquido, determinado com taxa de juros de 10% ao ano, apresentou valor de R\$ 885.850,00.

Por fim, a tese apresenta um *ranking* das metodologias propostas para os 86 estudos de caso. Em quinto lugar apresenta-se a metodologia convencional, com desvio médio de 61,67%. Em quarto lugar apresenta-se a metodologia Mark IV, com desvio médio de 60,64%. Em terceiro lugar apresenta-se a metodologia BD Motor, com desvio médio de 57,3%. Em segundo lugar apresenta-se a metodologia internacional do Departamento de Energia Norte-Americano, com desvio médio de 25,57%. E em primeiro lugar apresenta-se a metodologia MHmit, validada neste trabalho com desvio médio de 10,12%.

Como perspectiva futura, pode-se ampliar o banco de dados da metodologia proposta, incluindo outros fabricantes nacionais e internacionais, bem como a transformação do aplicativo MHmit num software completo que poderá ser utilizado de forma *on line* pela internet gratuitamente, auxiliando usuários, universidades, órgãos públicos e empresas de consultoria que se preocupam com a confiabilidade e segurança dos serviços prestados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15623**: Máquinas elétricas girantes - Dimensões e séries de potências para máquinas elétricas girantes - Padronização. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094-1**: Máquinas elétricas girantes - Motores de indução – Parte 1: Trifásicos. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5383**: Máquinas elétricas girantes - Máquinas de indução - Determinação das características. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5383-2**: Máquinas elétricas girantes - Máquinas de indução - Determinação das características. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7094**: Máquinas elétricas girantes - Motores de indução - Especificação. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7094**: Máquinas elétricas girantes - Motores de indução – Especificação. Rio de Janeiro, 2000.

ALVES, M. F. Qualidade de energia e o impacto sobre o sistema consumidor. **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo, 1996. p.109.

American National Standards Institute. **C12.16**: Solid State Electricity Meters. New York, 1991.

AUGUSTO JR, Norberto. **Motores de alto rendimento: dimensionamento e viabilidade econômica**. São Paulo, 2001. 157p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BD MOTOR. Software para Viabilização Energética. Rio de Janeiro. 2003.

BROWN, R. **Alternating Current Machinery**. New York: Wiley, 1927. 247p.

CASELLA, E. P. **Universidade de São Paulo – Instituto de Eletrotécnica e Energia - Ano Cinquenta**. Edição própria. s.d.

CATHEY, J. J. **Electric Machines Analysis and Design Applying Matlab**, New York: McGraw-Hill, 2001. 530p.

DOE - U.S. Department of Energy. Disponível em: <<http://www.doe.gov>> Acesso em: 18 mai 2008.

DOE - U.S. Department of Energy. **International Performance Measurement and Verification Protocol**. United States of America, 1997.

EDMINISTER, J. A. **Circuitos Elétricos**. Brasil: McGraw-Hill, 1971. 132p.

ELETROBRÁS. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. 2. ed. Itajubá: UNIFEI, 2003. p. 349-376.

EL-HAWARY, M. E. **Principles of Electric Machines with Power Electronic Applications**. London: Prentice-Hall, 1986. 739p.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Quem somos**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>> Acesso em: mai. 2008.

FITZGERALD, A., Kingsley C., UMANS, S. **Electric Machinery**. New York: McGraw-Hill, 1991. 599p.

FLUKE 434. **Three Phase Power Quality Analyzer**. Manual de Iniciação. Disponível em: <<http://www.fluke.com.br>> Acesso em: jan. 2008.

FLUKE 43B. **Power Quality Analyzer**. Manual do proprietário. Disponível em: <<http://www.fluke.com.br>> Acesso em: jan. 2008.

FLUKE. **Segurança em Medições Elétricas**. Padrões de Segurança. Disponível em: <<http://www.fluke.com.br>> Acesso em: nov. 2007.

GRAY, C. B. **Electrical Machines and Drive Systems**. England: Oxford University Press, 1989. 446p.

GUIA TÉCNICO. **Motor de Alto Rendimento**. Rio de Janeiro: PROCEL / ELETROBRÁS, 1998. 28p.

GUILBERT, C F. **Essais des machines électriques**. Paris: LIBRAIRIE J.-B. BAILLIÈRE ET FILS, 1934. 535p.

HARWOOD, P.B. **Control of Electric Motors**. London: Chapman & Hall, 1948. 538p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 519: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 1992. 112p.

INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética. **Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance**. Rio de Janeiro, 2003. 76p.

IPMVP. U.S. Agency for International Development. **International Performance Measurement and Verification Protocol**. Concepts and Options for Determining Energy Savings. USAID, 2000.

KUHLMANN, J. **Design of electrical apparatus**. London: Chapman & Hall, 1950. 512p.

LAMÓGLIA, J. A. **Operação desequilibrada de motores de indução trifásicos: procedimentos para análise.** Itajubá, 1993. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1993.

LIWSCHITZ-GARIK, M. **Electric Machinery.** New York: D.Van Nostrand Company, 1946. 290p.

LOBOSCO, O. S., DIAS, L. P. C. **Seleção e aplicação de motores elétricos.** São Paulo: McGraw-Hill, 1988. 356p.

MARK IV PLUS. **Ferramenta para diagnóstico e gestão energética.** Rio de Janeiro: PROCEL, 2002.

MARTINON, J.; POISSON, O.; DE CHATEAUVIEUX, F. **Conhecendo melhor os a fundamentos de tensão e as interrupções momentâneas.** Revista Eletricidade Moderna. São Paulo: Aranda Editora, n. 315, p. 66-78, Jun. 2000.

MIGUEL, A. A. **La amenaza de los armónicos y sus soluciones.** Madrid: Centro Español de Información del Cobre, 1999. 205p.

MOTOR MASTER. **User's Guide.** U.S. Department of Energy, 2005.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION. **MG 1: Motors and Generators.** USA, 1998.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **O Programa – Apresentação.** Disponível em: <<http://www.elektrobras.com/procel>> Acesso em: 3 mai 2008.

RAMOS, M.C.G. **A conservação, considerando aspectos relacionados à qualidade de energia elétrica na indústria têxtil: estudo de caso.** 2002. 148p. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RESOLUÇÃO Nº 456, de 29 de novembro de 2000. **Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica.** In: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2000, Brasília. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>> Acesso em: 23 nov 2008.

RMS. **Analizador de energia, harmônicos e oscilografia de perturbações MARH - 21 - 993.** Produtos. Disponível em: <<http://www.rms.ind.br>> Acesso em: mar. 2008.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Eficiência energética e acionamento de motores.** In: WORKSHOP DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO. 2004. Disponível em <<http://www.schneider.com.br>> Acesso em: 20 jul. 2004.

STEVENSON JR., W.D. **Sistemas Elétricos de Potência.** USA: McGraw Hill, 1962. p. 282-310.

WEG. **Manual de Motores Elétricos.** Jaraguá do Sul, 1979. 54 p.

WEG. **Catálogo Geral de Motores Elétricos: Características, especificação, instalação e manutenção.** Jaraguá do Sul, 2003. 130 p.

WEG. **Curvas de Motores Elétricos.** Disponível em: <<http://www.weg.com.br>> Acesso em: 03 mar 2003.

WEG. **Motores Elétricos de Indução Trifásicos.** Disponível em: <<http://www.weg.com.br>> Acesso em: 10 jul 2006.

WEG. **Motores Elétricos de Indução Trifásicos.** Disponível em: <<http://www.weg.com.br>> Acesso em: 18 set 2009.

ANEXO A - EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

A.1. INTRODUÇÃO

Atualmente existem inúmeros equipamentos de medição de parâmetros elétricos disponíveis no mercado que variam desde simples alicates amperímetros (ainda muito utilizado nas indústrias brasileiras) até sofisticados analisadores de potência e qualidade de energia elétrica trifásicos.

Os preços variam de centenas de Reais a dezenas de milhares de Reais, de acordo com a marca, modelo, capacidade de armazenamento de dados e número de parâmetros de medição.

Os equipamentos utilizados atualmente na Medição e Verificação de Performance de Projetos de Eficiência Energética possibilitam num único instrumento, com elevado grau de precisão, a determinação de valores das tensões e correntes, potências ativa, reativa e aparente, distorções harmônicas de tensão e corrente e outras grandezas elétricas.

Quando a medição for realizada por determinado período de tempo, outros aspectos devem ser considerados, como por exemplo: modo de medição (domínio do tempo ou da frequência), tipo de carga (linear ou não linear), tempo de medição (associado ao regime de trabalho da carga), capacidade de aquisição de dados (leitura e gravação das informações), algoritmo utilizado (obtenção indireta das grandezas) e as Normas que o instrumento deve atender.

As medições das grandezas elétricas para regime senoidal podem ser realizadas considerando o domínio do tempo e da frequência.

No domínio do tempo, o sinal senoidal apresentado tem por objetivo a análise das formas de onda ciclo a ciclo, podendo apresentar na mesma base de tempo, formas de onda da tensão e da corrente. Essas medições são utilizadas em casos onde se deseja analisar fenômenos relacionados com a qualidade de energia elétrica.

No domínio da frequência, as grandezas elétricas são apresentadas em valores eficazes entre dois instantes. Em cada um desses períodos um valor é registrado e armazenado, sendo que o acesso aos registros depende da capacidade de memória do instrumento.

No caso de medição de cargas não lineares, devem-se utilizar equipamentos *true rms*. A utilização de equipamentos inadequados para a medição de cargas não lineares induz erros de leitura que aumentam de acordo com os valores de distorção harmônica.

A.2. SEGURANÇA NAS MEDIÇÕES ELÉTRICAS

A utilização da energia elétrica em todas as atividades vem aumentando consideravelmente nas últimas décadas. Desta forma, circuitos de alimentação para transporte de grandes quantidades de energia exigem condutores com maiores seções transversais, tendo como consequência o aumento da potência envolvida em casos de curto-circuito.

Assim, a comutação de cargas com potência elevada pode ocasionar surtos de tensão que, combinado com procedimentos ou equipamentos de medição inadequados, provocam arcos elétricos, causando acidentes de elevada gravidade ou morte.

Desta forma, padrões internacionais de segurança tornaram-se cada vez mais rigorosos, principalmente em se tratando de instrumentos de medição. No ano de 1988, a IEC – *International Electrotechnical Commission* substituiu o antigo padrão IEC-348 por outro bem mais rigoroso, denominado de IEC 61.010-1, sendo utilizado como referência nas seguintes normas:

- ANSI / ISA – S82.01 Ano 1994 - Estados Unidos.
- CAN C 22.2 N° 1010.1-1992 - Canadá.
- EM 61.010-1-1993 - Europa.

Este padrão apresenta categorias de sobretensão que são baseadas na distância do local de medição em relação à fonte de alimentação. As categorias mais elevadas (3 e 4) encontram-se mais próximas do ponto de conexão da concessionária, exigindo maiores proteções.

As categorias são as seguintes:

- Categoria 1: circuitos internos de equipamentos eletrônicos.
- Categoria 2: circuitos terminais de tomadas com mais de 10 m da fonte de categoria 3, ou 20 m da fonte de categoria 4.

- Categoria 3: sistemas de distribuição principais e auxiliares, dentro das edificações. Esses circuitos são na maioria das vezes, separados por um transformador.
- Categoria 4: sistema de distribuição da concessionária de energia elétrica, tanto fornecendo energia por meio de condutores aéreos, quanto em subterrâneos.

A seguir, serão apresentados alguns equipamentos analisadores de potência e qualidade de energia, testados durante este trabalho e que poderão ser utilizados na aplicação da Metodologia MHmit.

A.3. ANALISADOR DE POTÊNCIA E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA FLUKE 43B

O equipamento analisador de potência e qualidade de energia elétrica da marca Fluke, modelo 43B, monofásico, está de acordo com os padrões ANSI/ISA S82.01-1994, EM/IEC 61.010-1 (1993), CAN/CSA-C22 010.1-92, UL 3111-1, tendo sido aprovado para medições em equipamentos elétricos, controle e uso em laboratório.

A Figura A.1 apresenta o equipamento Fluke 43B.



Figura A.1 - Equipamento Fluke 43B.

Segundo o fabricante, este equipamento foi projetado e testado para utilização em medições Categoria III (até 600 Vrms), com frequências variando de 0 a 66 kHz.

A seguir serão apresentadas as principais funções do equipamento Fluke 43B.

Modo tensão, corrente e frequência

Nesta função, apresentam-se simultaneamente os sinais de tensão e corrente. É possível também alternar para as telas de potência e harmônicos.

Modo potência

Nesta opção apresentam-se os valores de potências ativa, aparente e reativa, fator de potência e frequência.

De acordo com o fabricante, este equipamento é capaz de realizar medições de potência em sistemas trifásicos balanceados, com 3 condutores. Neste caso a carga deve estar bem balanceada e possuir configuração em Delta.

A Figura A.2 apresenta o esquema de ligação para medição de potência em sistemas trifásicos.

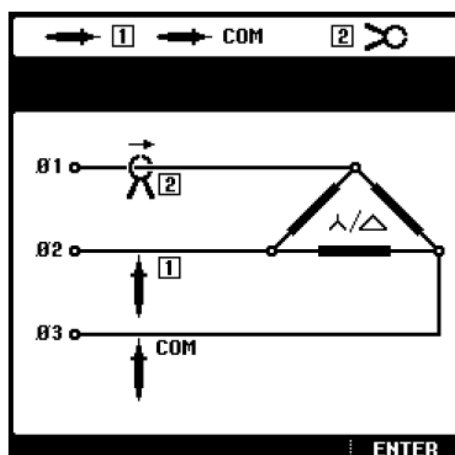


Figura A.2 - Medição de potência em sistemas trifásicos.

Fonte: (FLUKE 43B, 2008).

Modo harmônicos

Nesta opção, são apresentadas as distorções periódicas de tensão, corrente e potência, sendo o sinal expresso como uma combinação de várias ondas senoidais com frequências diferentes. A contribuição de cada componente é apresentada num gráfico de barras. Este equipamento detecta até a 51ª harmônica.

A Figura A.3 apresenta a tela com a componente fundamental (primeira ordem) e os respectivos componentes harmônicos.

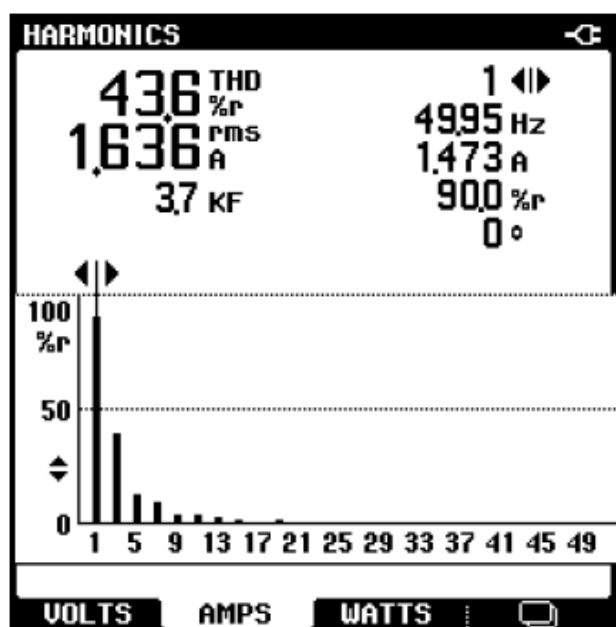


Figura A.3 - Tela de harmônicos de corrente do Fluke 43B.

Fonte: (FLUKE 43B, 2008).

Modo sags – swells

Nesta função, o equipamento é capaz de medir os *sags* e *swells* ocorridos num curto espaço de tempo (de um ciclo a alguns segundos) do sinal de tensão.

A Figura A.4 apresenta a tela de *sags – swells* do Fluke 43B.

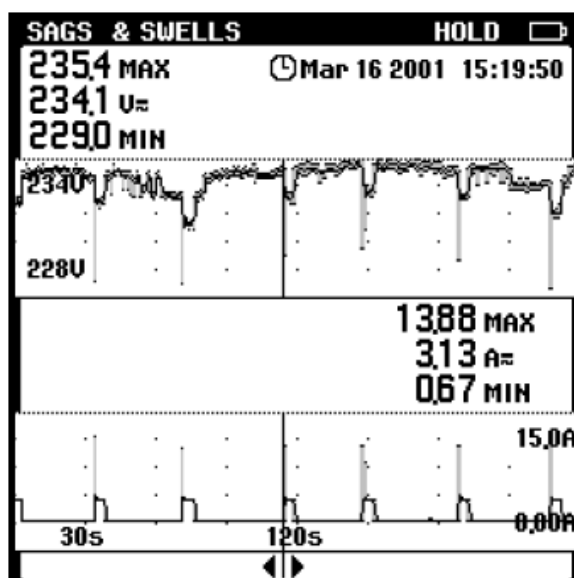


Figura A.4 - Tela de sags - swells do Fluke 43B.

Fonte: (FLUKE 43B, 2008).

Modo transients

Nesta função o Fluke 43B é capaz de detectar fenômenos transitórios que podem danificar equipamentos.

A Figura A.5 apresenta a tela de fenômenos transitórios do Fluke 43B.

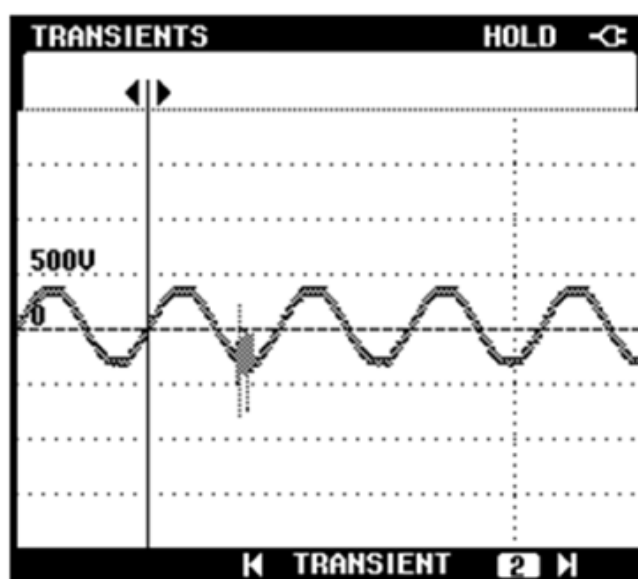


Figura A.5 - Tela de fenômenos transitórios do Fluke 43B.

Fonte: Adaptado de (FLUKE 43B, 2008).

Modo *inrush current*

Correntes *inrush* são surtos que podem ocorrer, por exemplo, na partida de motores elétricos de grande porte. Neste caso, o equipamento apresenta o sinal de corrente no momento do surto e o valor pico a pico da forma de onda.

A Figura A.6 apresenta a tela de corrente *inrush* do Fluke 43B.

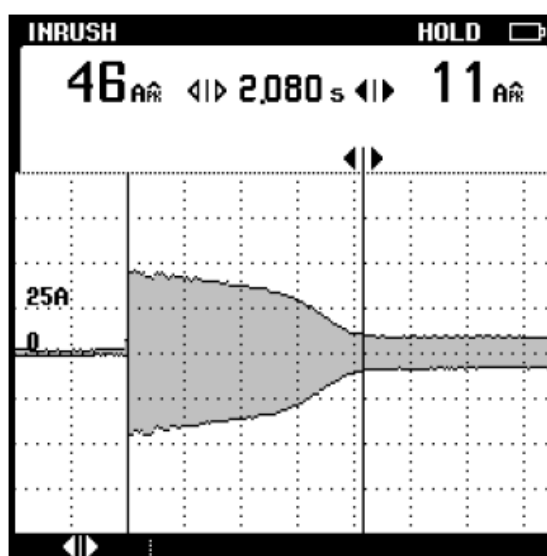


Figura A.6 - Tela de corrente *inrush* do Fluke 43B.

Fonte: (FLUKE 43B, 2008).

Registro de dados

O Fluke 43B possui memória para registro de dados de parâmetros elétricos de até 16 dias.

O registro de dados no tempo possui importância significativa, principalmente em medições de ciclos de operação de processos, onde existem variações de carga, solicitando ao motor elétrico trabalhar em diversos pontos de carregamento. Neste caso, o equipamento fornece a potência média de um ciclo.

A Tabela A.1 apresenta os tempos de registros e seus respectivos intervalos de plotagem do Fluke 43B.

Tabela A.1 – Tempos de registros e intervalos de plotagem do Fluke 43B.

Tempo de Registro	Intervalo de Plotagem	Tempo de Registro	Intervalo de Plotagem
4 minutos	1 segundo	8 horas	2 minutos
8 minutos	2 segundos	16 horas	4 minutos
16 minutos	4 segundos	24 horas	6 minutos
30 minutos	8 segundos	48 horas	12 minutos
1 hora	15 segundos	4 dias	24 minutos
2 horas	30 segundos	8 dias	48 minutos
4 horas	60 segundos	Infinito (16 dias)	1 a 96 minutos

Fonte: (FLUKE 43B, 2008)

Especificações

A Tabela A.2 apresenta as especificações do equipamento, com os respectivos desvios percentuais para cada parâmetro de medição (FLUKE 43B, 2008).

Tabela A.2 – Especificações do equipamento Fluke 43B.

Especificações	Desvio
Tensão [V]	$\pm 1\%$
Intensidade de Corrente [A]	$\pm 1\%$
Frequência [Hz]	$\pm 0,5\%$
Potência Ativa, Reativa e Aparente - Resultante [W]	$\pm 2\%$
Potência Ativa, Reativa e Aparente - Fundamental [W]	$\pm 4\%$
Fator de Potência - Resultante	$\pm 4\%$
Fator de Potência - Fundamental	$\pm 4\%$
Harmônicos [%]	$\pm 3\%$

Fonte: (FLUKE 43B, 2008)

O equipamento Fluke 43B opera em condições de temperatura de 0 a 50 °C com umidade relativa do ar de até 95%. O Índice de Proteção do equipamento é 51.

A.4. ANALISADOR DE POTÊNCIA E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA FLUKE 434

O equipamento analisador de potência e qualidade de energia elétrica da marca Fluke, modelo 434, trifásico, também está de acordo com os padrões ANSI/ISA S82.01-1994, EM/IEC 61.010-1 (1993), CAN/CSA-C22 010.1-92, UL 3111-1, tendo sido aprovado para medições em equipamentos elétricos, controle e uso em laboratório.

A Figura A.7 apresenta o equipamento Fluke 434.



Figura A.7. Analisador trifásico de potência e qualidade de energia elétrica Fluke 434.

Fonte: (Fluke 434, 2008).

Este analisador possui 4 entradas para pinças de corrente e 5 entradas para garras de tensão. Para não haver erros na instalação dos acessórios de medição, a Fluke disponibiliza adesivos que podem ser colados em cada acessório, antes do início das medições.

A Fluke recomenda primeiramente a instalação das pinças de corrente: Fase A, B, C e condutor neutro. Deve-se atentar para a polaridade de cada pinça, que possui uma seta indicando o sentido do fluxo de energia. Em seguida, conectam-se as garras de tensão, iniciando-se com a conexão de terra, neutro e Fases A, B e C sucessivamente.

Antes de iniciar as medições, o fabricante recomenda verificar se todas as conexões estão corretas e as pinças de corrente estão totalmente fechadas ao redor do condutor.

A Figura A.8 apresenta a conexão do analisador ao sistema trifásico.

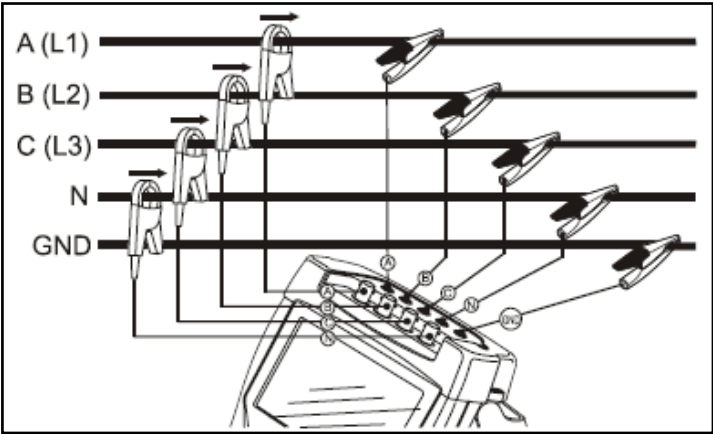


Figura A.8. Conexão do analisador Fluke 434 ao sistema trifásico.
Fonte: (Fluke 434, 2008).

O Fluke 434 possui cinco telas diferentes para apresentação de resultados, que são as seguintes:

Tela 1 – Medidor

A Tela 1 fornece uma visão geral das medições que estão sendo efetuadas, conforme Figura A.9.

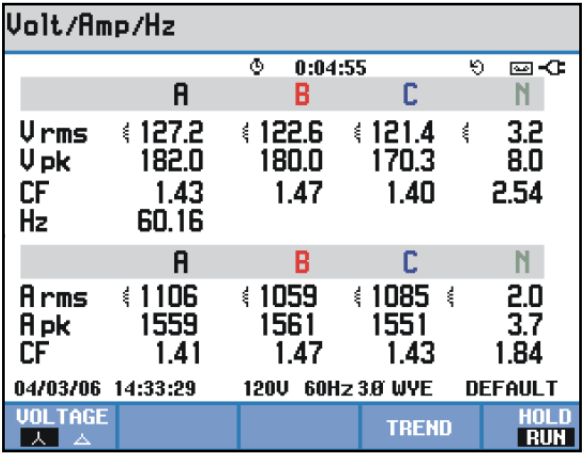


Figura A.9 - Tela 1 (Medidor).
Fonte: (Fluke 434, 2008).

Tela 2 – Tendência

A Tela 2 apresenta as alterações dos valores de medição ao decorrer do tempo, exibidos no eixo horizontal. A exibição inicia-se do lado direito da tela, sendo que o eixo de tempo é compactado sempre que necessário, permitindo o registro contínuo dos dados.

A Figura A.10 apresenta a tela de tendência.

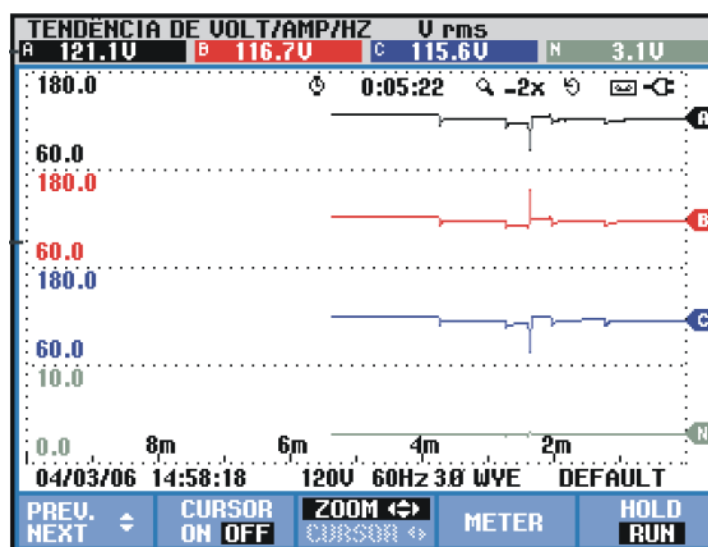


Figura A.10 - Tela 2 (Tendência).

Fonte: (Fluke 434, 2008).

Tela 3 – Formas de onda

Neste modo, o Fluke 434 apresenta formas de onda de tensão e corrente semelhantes a um osciloscópio, de acordo com a Figura A.11.

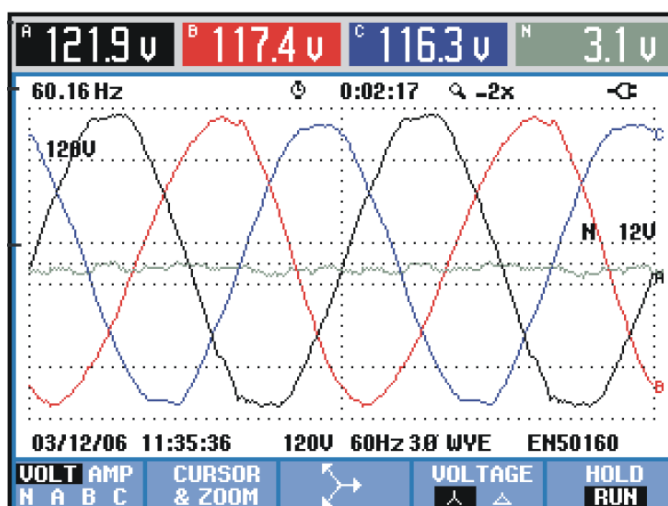


Figura A.11 - Tela 3 (Formas de onda).

Fonte: (Fluke 434, 2008).

Tela 4 – Fasores

Neste modo, apresentam-se as relações de fase entre tensões e correntes em um diagrama vetorial. Os valores das formas de onda são exibidos no cabeçalho, bem como os valores do diagrama vetorial e dados adicionais como tensões de fase fundamentais, frequência e ângulos de fase.

A Figura A.12 apresenta a tela de fasores do Fluke 434.

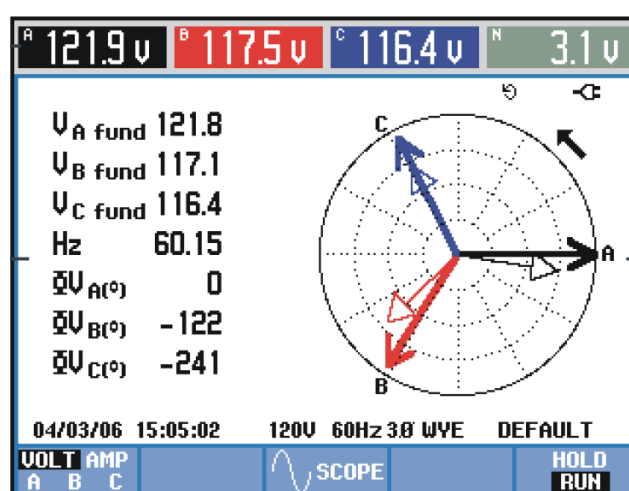


Figura A.12 - Tela 4 (Fasores).

Fonte: (Fluke 434, 2008).

Tela 5 – Histograma

O modo histograma disponível no Fluke 434 auxilia na monitoração da qualidade de energia elétrica. Os parâmetros disponibilizados pelo equipamento são tensões, harmônicos, oscilações, interrupções, desequilíbrios e frequência.

A Figura A.13 apresenta a tela de histogramas do Fluke 434.

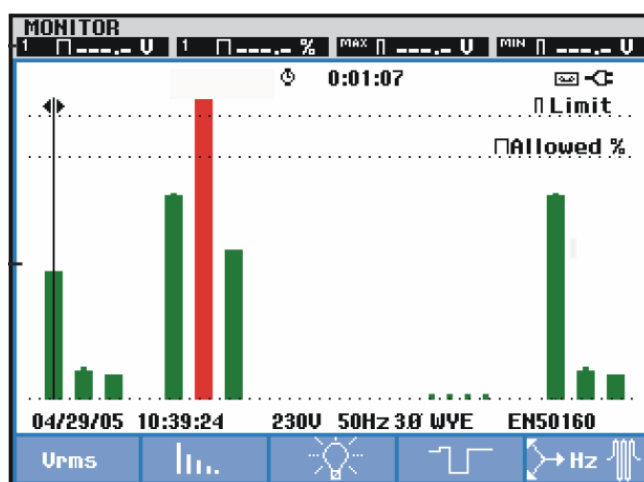


Figura A.13 - Tela 5 (Histograma).

Fonte: (Fluke 434, 2008).

Desequilíbrios de tensão e corrente

O Fluke 434 oferece a opção de medições de desequilíbrios de tensão e corrente. Os resultados baseiam-se na componente de frequência fundamental 60 Hz utilizando o método das componentes simétricas.

Nesta opção, o equipamento exibe os percentuais de seqüências negativa, positiva e zero, bem como tensões, correntes, frequência e ângulos entre tensão e corrente de cada fase.

Capacidade de registro de dados

O Fluke 434 possui 3 modos de armazenar dados de medições em sua memória:

1. Armazena uma cópia da tela atual.
2. Salva todo o conjunto de dados correspondente à medição atual. Após salvar o conjunto de dados, é possível exibir e analisar todas as telas da medição, utilizando também recursos de cursor e zoom.
3. Função Logger.

A configuração de memória do Fluke 434 libera espaço para capturas de tela e conjuntos de dados da seguinte forma:

- 8 MB de memória: 10 conjuntos de dados e 50 capturas de tela.
- 4 MB de memória: 5 conjuntos de dados e 25 capturas de tela.
- 1 MB de memória: 1 conjunto de dados e 15 capturas de tela.

O medidor também é equipado com uma interface óptica RS-232 para comunicação com o computador ou impressora. Por meio da utilização do *software Fluke View* pode-se fazer a transferência dos dados de medição no formato bitmap.

Especificações

A Tabela A.3 apresenta as especificações do equipamento, com os respectivos desvios percentuais para cada parâmetro de medição (FLUKE 434, 2008).

Tabela A.3 – Especificações do equipamento Fluke 434.

Especificações	Desvio
Tensão [V]	$\pm 0,5 \%$
Intensidade de Corrente [A]	$\pm 1 \%$
Frequência [Hz]	$\pm 0,5 \%$
Potência Ativa, Reativa e Aparente - Resultante [W]	$\pm 1,5 \%$
Potência Ativa, Reativa e Aparente - Fundamental [W]	$\pm 1,5 \%$
Fator de Potência - Resultante [adimensional]	$\pm 4 \%$
Fator de Potência - Fundamental [adimensional]	$\pm 4 \%$
Harmônicos [%]	$\pm 3 \%$

Fonte: (Fluke 434, 2008).

O equipamento Fluke 43B opera em condições de temperatura de 0 a 50 °C com umidade relativa do ar de até 95%. O Índice de Proteção do equipamento é 51.

A.5. ANALISADOR MARH-21 (993)

O analisador de energia, harmônicos e oscilografia de perturbações fabricado pela RMS Sistemas Eletrônicos é um registrador portátil, trifásico, programável, destinado ao registro de tensões, correntes, potências, energias, harmônicos e oscilografia de perturbações em sistemas de geração, consumo e distribuição, bem como circuitos que alimentam motores elétricos em geral (RMS, 2008).

O MARH-21 possui mostrador e teclado alfanumérico permitindo efetuar a programação diretamente no equipamento.

O medidor registra os dados de medição em sua memória interna do tipo RAM e possui também porta serial para a transferência dos dados registrados para um computador. O *software* denominado ANAWIN possibilita a análise dos dados em forma de gráficos e relatórios.

A Figura A.14 apresenta o analisador MARH-21.



Figura A.14 – Analisador MARH-21.

Aplicações

O equipamento MARH-21 possui as seguintes aplicações:

- Registro das formas de onda das tensões e correntes, distorções harmônicas e variações de frequência.
- Análise dos harmônicos.
- Estudos de demanda e otimização do uso de energia.
- Simulações para estudos de correção do fator de potência.
- Monitoramento de processos visando à obtenção de curvas de temperatura, pressão e vazão, juntamente com as grandezas elétricas como tensão, corrente, demanda e energia.
- Análise de desligamentos e falhas causados por variações nas características da tensão.
- Obtenção de curvas de partida de motores elétricos.

Grandezas Registradas

O equipamento MARH-21 registra as seguintes grandezas:

- Tensões de fase e de linha.
- Correntes.
- Fator de potência.
- Potências ativa, reativa e aparente.
- Energias ativa, reativa e aparente.
- Distorção harmônica total de tensão e corrente.
- Seqüência de fases.
- Grau de desequilíbrio de tensão.
- Demandas ponta e fora de ponta.

Autonomia

Dependendo do modo de operação selecionado, bem como do tempo de integração, sua autonomia pode variar de 13 a 36 dias de registro de dados, de acordo com o fabricante. Esses valores referem-se a um analisador com 4M bytes de memória.

Alimentação

A alimentação do analisador pode ser feita diretamente na rede elétrica, nas tensões de 90 a 600 V, bem como por meio de bateria de 9 V (RMS, 2008).

A Figura A.15 apresenta o equipamento MARH-21 instalado em painel elétrico para aquisição de dados de consumo de energia em motores de indução trifásicos.



Figura A.15 – Aquisição de dados de consumo em motores de indução trifásicos.