

AVALIAÇÃO DA ECONOMIA DE ENERGIA, ATRIBUÍDA A AÇÕES DE ETIQUETAGEM ENERGÉTICA, EM MOTORES DE INDUÇÃO NO BRASIL

Rafael Balbino Cardoso¹

Luiz Augusto Horta Nogueira²

Edson da Costa Bortoni³

Jamil Haddad⁴

Edson Palhares de Souza⁵

EXCEN / UNIFEI⁶

RESUMO

Desde 1995 o Brasil tem implementado o programa de etiquetagem energética Selo PROCEL para estimular os fabricantes a aumentarem a eficiência de muitos eletrodomésticos e equipamentos. Em 2003 os motores de indução começaram a receber o Selo PROCEL o que ajudou a ampliar a eficiência desses equipamentos devido aos limites de eficiência estabelecidos pelo programa de etiquetagem. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo para calcular os impactos energéticos (economia de energia e redução de demanda de ponta) obtidos por ações de etiquetagem energética, no caso do presente estudo, pelo uso de motores com o Selo PROCEL. O modelo desenvolvido faz o uso de informações de vendas e de uma função de descarte para as estimativas do parque de motores. Aproximações quanto aos efeitos do carregamento e degradação de desempenho dos motores ao longo da vida útil são consideradas nos cálculos do consumo.

Palavras Chave: Etiquetagem, Eficiência Energética, Motores elétricos

1 e-mail: cardosorb@excen.com.br/Fone: (35) 3629-1411

2 e-mail: horta@unifei.edu.br/Fone: (35) 3629-1442

3 e-mail: bortoni@unifei.edu.br/Fone: (35) 3629-1411

4 e-mail: jamil@unifei.edu.br/Fone: (35) 3629-1411

5 e-mail: edson@excen.com.br/Fone: (35) 3629-1411

6 Centro de Excelência em Eficiência Energética – EXCEN, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Av. BPS 1303, 55-35-3629-1000, Itajubá-MG.



ABSTRACT

Since 1995 Brazil has been applying its labeling program to increase the efficiency of application of many household appliances and equipments. From 2003 on inductions motors have also been receiving the PROCEL⁷ prize, which helped push motors efficiency over than those limits established by the labeling program. Therefore, this work presents the development of a model to estimate the amount of savings which is obtained with the usage of the minimum efficiency performance standards (MEPS) labels in standard- and in energy efficient- motors. The estimated peak demand reduction is also inferred. The developed model makes the usage of sales information and of a discard function to estimate the Brazilian motor stock. New approaches such as the use of efficiency loading and efficiency aging factors are employed to estimate motors consumption.

Key Words: Labeling, Energy Efficiency, Electric Motors

1. INTRODUÇÃO

Programas de etiquetagem energética vêm sendo adotados em diversos países para aumentar os níveis de eficiência energética de eletrodomésticos e equipamentos industriais, contribuindo para a economia de energia e a redução de emissões de gases do efeito estufa. O processo de etiquetagem normalmente começa com o estabelecimento de padrões mínimos de desempenho para equipamentos e eletrodomésticos, junto com um método de teste padronizado para avaliação da eficiência (Mahlia, et. al, 2002). Depois de testado e classificado o equipamento recebe uma etiqueta informando seu nível de eficiência, com o propósito de informar o consumidor sobre o desempenho dos equipamentos elétricos e estimular os fabricantes para melhorar o desempenho de seus produtos.

A experiência internacional indica significativas de economia de energia devido a programas de etiquetagem (Vine, et. al., 2006; Murray, et. al. 2001 e Becker, et. al., 2008). No Brasil, uma das ações governamentais relevantes para a promoção do uso racional de energia foi o estabelecimento do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE/INMETRO e mais tarde, em 1993 o Programa Selo PROCEL. Em 1995, refrigeradores e congeladores fo-



ram os primeiros equipamentos a receberem o Selo PROCEL, posteriormente, lâmpadas fluorescentes, reatores eletromagnéticos, condicionadores de ar, motores elétricos, coletores solares e reservatórios térmicos foram incluídos na lista de produtos que recebem o Selo. Mais recentemente, lavadoras de roupa e televisores também foram considerados neste programa. Em 2007, o rótulo foi aplicado em 2341 equipamentos diferentes, cobrindo 21 categorias de produtos, alcançando economias de energia estimadas em cerca de 3,7 TWh.

Entre os vários eletrodomésticos e equipamentos elétricos, os motores de indução trifásicos merecem atenção especial considerando que são responsáveis por uma grande parte do consumo de energia elétrica no país (Almeida, et. al., 2005; Yanti e Mahlia, 2009 e Garcia, et. al., 2007). Os motores são utilizados como fonte de energia mecânica, principalmente em sistemas para circulação de fluídos (bombas, ventiladores, compressores) e compõem diversos equipamentos, como máquinas operatrizes e sistemas de movimentação e transporte. No Brasil, os motores de indução trifásicos são responsáveis por aproximadamente 60% do consumo industrial e aproximadamente 30% do consumo total de eletricidade, constituindo um grande potencial de economia de energia.

No caso brasileiro, padrões mínimos de desempenho energético foram estabelecidos pelo Decreto Federal 4.508/2002 para os motores de indução trifásico de rotor gaiola de esquilo, até 250 cv, como marco nos programas de conservação de energia no Brasil (Garcia, et. al., 2007 e Haddad, 2005). Desde 2003 o PROCEL estabelece índices de desempenho para motores elétricos concedendo o Selo PROCEL para os mais eficientes. O Decreto Federal e o Selo PROCEL são aplicados para duas categorias de motores, alto rendimento e padrão, de 1 a 4 pólos com rotações de 3600, 1800, 1200 ou 900 rpm. A Figura 1 mostra as curvas médias de desempenho de motores de 4 pólos para várias potências.

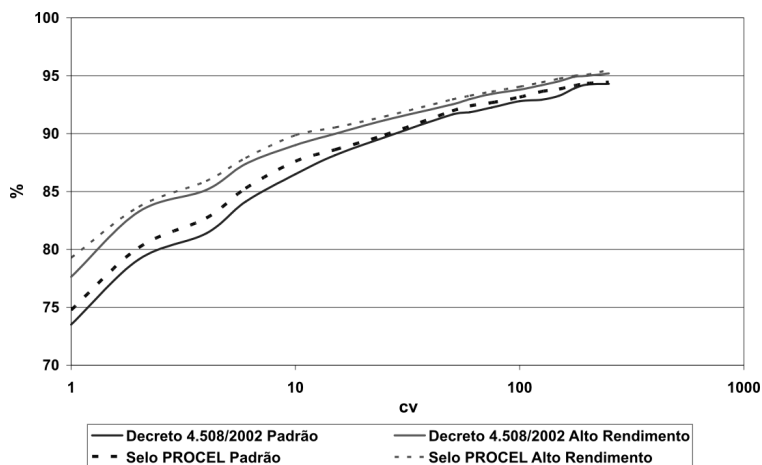


Figura 1 - Eficiência média de motores elétricos com e sem o Selo PROCEL

A Figura 1 mostra que o Selo PROCEL ajudou a ampliar a eficiência de motores elétricos que atendem o Decreto Federal. Como resultado das melhorias dos fabricantes nos procedimentos de produção dos motores, a partir de dezembro de 2009, os motores do tipo padrão não serão mais fabricados no Brasil (Garcia, et. al., 2007 e Haddad, 2005).

A contribuição dos motores mais eficientes para reduzir o consumo de energia no Brasil é notável, mas pouco avaliada, principalmente devido às incertezas inerentes ao processo de medição dos resultados alcançados. Este trabalho aborda esse aparente paradoxo: medir a energia que não foi usada, apresentando o desenvolvimento de um modelo para calcular a quantidade de energia economizada devido ao uso de motores mais eficientes, com o Selo PROCEL, do tipo alto rendimento e padrão, operando no Brasil. O modelo foi elaborado com base em estimativas do parque de equipamentos e consumo unitário, incluindo os efeitos de carregamento e envelhecimento dos motores.

2. MODELO DESENVOLVIDO

A modelagem proposta para avaliar o impacto energético do Programa Selo PROCEL em motores de indução trifásicos, em termos de economia de energia e redução de demanda de ponta, se baseia em três hipóteses da composição do parque de motores no Brasil, do tipo padrão e alto rendimento.



A primeira dessas hipóteses, que define a Linha de Base, refere-se a um mercado fictício com o parque de motores instalados no país sendo composto apenas por motores elétricos sem o Selo PROCEL. A segunda hipótese, que caracteriza o Mercado Real, se refere à situação existente, em que o parque em operação apresenta motores com e sem o Selo PROCEL. Por fim, na terceira hipótese, Mercado Potencial, se assume que todos os motores do mercado tenham o Selo PROCEL. Para cada hipótese de composição do parque de equipamentos tem-se um consumo unitário de motores correspondente. A Figura 2 representa os três cenários de mercado considerados no presente estudo. Com as diferenças entre os consumos estimados para a Linha de Base e Mercado Real, e entre os consumos estimados para o Mercado Real e o Mercado Potencial, obtém-se, respectivamente à economia de energia alcançada e à economia de energia alcançada e à economia de energia ainda possível de se obter.

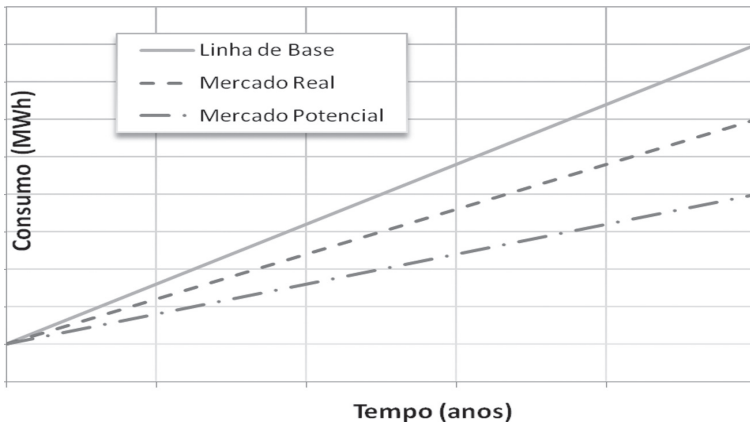


Figura 2 - Hipóteses de mercado de motores elétricos ao longo do tempo

O desenvolvimento de equações da modelagem para a avaliação dos impactos energéticos atribuídos ao Programa Selo PROCEL é apresentado nas seções seguintes. Em geral, a metodologia para os cálculos dos impactos energéticos se baseia nos cálculos do parque de motores instalados, considerando as três hipóteses (ou cenários) de composição do parque de motores, e do consumo unitário anual.

As equações seguintes se referem a um determinado tipo de motor. Para uma avaliação global, elas devem ser aplicadas a todos os tipos de motores avaliados, quanto à categoria, faixa de potência e número de pares de pólos.



a. Estimativa do parque de motores

A quantidade de motores instalados em um determinado ano é calculada pela adição de motores vendidos ao longo de sua vida útil menos uma função de descarte de motor (Cardoso e Nogueira, 2007).

$$M_j = \left(\sum_{i=j-n}^j V_i \right) - D_j \quad (1)$$

Onde M é a quantidade de motores instalados (unidades) no ano j , n é a vida útil do motor (anos), V_i é a quantidade de motores vendidos no ano i (unidades) e D_j é uma função de descarte que descreve o número de motores retirados do mercado no final da vida útil (unidades).

De acordo com Cardoso e Nogueira (2007) a função de descarte de equipamentos pode ser equacionada como:

$$D_j = \alpha \cdot V_{j-n-1} + \beta \cdot V_{j-n} + \gamma \cdot V_{j-n+1} \quad (2)$$

Onde α , β , e γ são coeficientes de descarte conhecidos, determinados estatisticamente por informações de vendas e descarte de motores, por $n-1$, n , e $n+1$ anos ante do ano j , respectivamente.

b. Consumo médio anual de energia

O consumo de energia de um motor operando em carga parcial em um determinado ano j é:

$$ce_j = \frac{0.745 \cdot P \cdot F_c \cdot t}{R \cdot f_{id} \cdot f_{Fc}} \quad (3)$$

Onde ce é o consumo anual de energia (kWh), P é a potência do motor (cv), F_c é o fator de carregamento, t é o tempo médio anual de operação em horas (h), R é o rendimento nominal do motor, f_{id} é um fator de rendimento devido à idade do motor, e f_{Fc} é um fator de redução do rendimento devido ao carregamento.

O motor elétrico perde cerca de 3 a 4% de seu rendimento ao longo de sua vida útil. Esta redução ocorre devido a várias razões como: má manutenção, limpeza e lubrificação, esforços elétricos e mecânicos, consertos repetitivos ao longo da vida do motor, e instalação de motor em diferentes condições ambiente (Bortoni, et. al., 2007).



A correção do rendimento do motor em função do carregamento é feita de acordo com curvas de desempenho em função do carregamento. Pelas curvas de desempenho observa-se que a eficiência máxima de um motor ocorre entre carregamentos de 85-95%. Em geral a eficiência para carregamentos de 75% é a mesma da nominal (Bortoni, 2009).

O consumo médio anual de energia do parque de motores é obtido pela média ponderada dos consumos médios unitários de equipamentos de diferentes idades pelas vendas anuais (PROCEL, 2009).

$$cma_j = \frac{\left(\sum_{i=j-n}^j ce_i \cdot V_i \right)}{\sum_{i=j-n}^j V_i} \quad (4)$$

Onde cma_j é o consumo médio anual de energia do parque de motores no ano j (kWh).

c. Consumo de energia total

O consumo de energia total anual relaciona o parque de motores de um determinado ano com o consumo médio anual do parque.

$$CET_j = M_j \cdot cma_j \quad (5)$$

Onde CET é o consumo de energia total de um tipo de motor no ano j (MWh).

d. Contribuição da demanda de ponta

A contribuição de demanda de um determinado tipo de motor é uma função de seu consumo de energia global e de suas horas de operação anuais. Considerando que todos os motores não funcionam ao mesmo tempo durante horários de pico, um fator de coincidência de ponta é considerado. Logo, a contribuição de demanda de ponta de um determinado tipo de motor é:

$$CDP_j = \frac{CET_j \cdot FCP}{t} \quad (6)$$

Onde CDP é a contribuição de demanda de ponta de um tipo de motor (GW) e FCP é um fator de coincidência de ponta.

e. Economia de energia e redução de demanda de ponta

A discussão sobre economia de energia e redução de demanda de ponta devido ao uso de motores de indução mais eficientes faz sentido se comparados com dois ou mais cenários de composição do parque.

Todas as equações descritas anteriormente foram desenvolvidas para ser aplicadas em um único tipo de motor. Não obstante, todo cenário considerado neste trabalho como, Linha de Base, Mercado Real e Mercado Potencial, possui vários tipos de motores. A quantidade de cada tipo de motor em um cenário está automaticamente definida pelos parâmetros de vendas e descarte de equipamentos.

As equações (5) e (6) podem ser ampliadas para incluir o “mix” de vários tipos de motores que compõem um determinado cenário. Neste caso, as equações de (1) a (4) devem ser aplicadas para cada tipo de motor para cobrir todas as unidades instaladas. O consumo de energia total de um cenário é a adição do consumo de energia de cada tipo de motor pertencente àquele cenário. Os mesmos cálculos devem ser feitos para a contribuição de demanda de ponta.

$$CE = \sum_{\Omega} CET \quad (7)$$

$$CD = \sum_{\Omega} CDP \quad (8)$$

Onde Ω representa diferentes tipos de motores que compõem um determinado cenário, CE e CD representam o consumo de energia (MWh) e contribuição de demanda de ponta (GW), respectivamente.

Assim, as economias de energia e a redução de demanda de ponta em comparação de um determinado cenário com outro, são obtidas pela diferença entre o consumo de energia e contribuição de demanda de ponta de ambos os cenários, respectivamente.

$$EE = CE_A - CE_B \quad (9)$$

$$RDP = CD_A - CD_B \quad (10)$$

Onde EE é a economia de energia e RDP é a redução de demanda de ponta comparando dois cenários A e B.

3. PARÂMETROS DO MODELO

a. Considerações iniciais

A metodologia apresentada foi desenvolvida para calcular as economias de energia e redução de demanda de ponta atribuída ao uso de motores mais eficientes, conforme o programa de etiquetagem brasileiro, Selo PROCEL.

Atualmente, há quatro classes de eficiência de motores no Brasil, quatro números de pares de pólos cobertos pelo processo de etiquetagem energética e dúzias de potências avaliadas de 1 a 250 cv. A consideração de todos estes fatores levaria a centenas de combinações de categorias de motores a serem avaliados para cada cenário considerado.

Para reduzir essas combinações, algumas simplificações foram realizadas, como a consideração de apenas quatro faixas de potência que representam vários modelos de diferentes potências, com dois pares de pólos, como mostra a Figura 3.

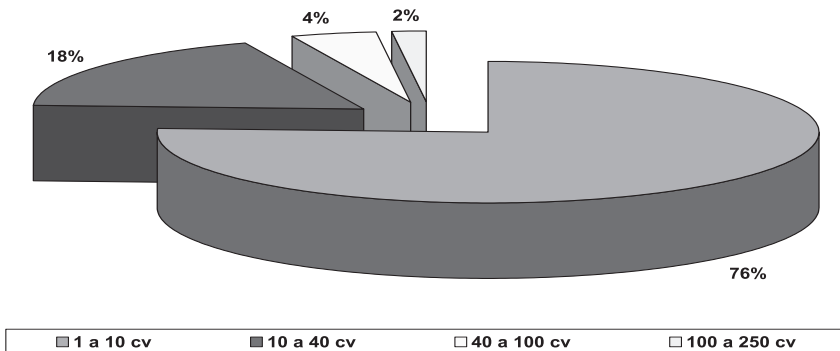


Figura 3 - Distribuição dos motores por faixa de potência

A Figura 3 mostra que os motores de 1 a 40 cv, representam 94% dos motores instalados no mercado brasileiro. Além disso, para efeito de cálculos, cada faixa de potência de motores é representada por sua potência mediana. Então, motores de 5 cv, 25 cv, 70 cv, e 175 cv, com 1800 rpm são representativos para as suas faixas de potências. Isto simplificou as análises realizadas, pois, os motores de uma mesma faixa de potência apresentam aproximadamente as mesmas características de operação, como horas operacionais anuais e vida útil.



b. Parâmetros do parque de motores

Como descrito anteriormente, o desenvolvimento de uma base de dados sobre a operação de motores no Brasil, é de extrema importância para a aplicação da metodologia proposta. As vendas de motores de indução trifásicos foram obtidas pela ABINEE, a associação brasileira de bens elétricos indústrias industriais que são apresentadas pela Tabela 1.

Tabela 1 - Venda anual de motores no Brasil.

Ano \ cv	1-10	>10-40	>40-100	>100-250	Total
1995	716855	98614	19390	7395	842254
1996	600791	88195	17798	6778	713562
1997	711519	113125	23024	9695	857363
1998	704677	132524	25621	10981	873803
1999	676130	115207	22203	9224	822764
2000	770264	132125	26461	10360	939210
2001	760608	132857	28356	11451	933272
2002	758017	136692	28093	12348	935150
2003	779439	152191	31247	13338	976215
2004	915329	182306	37858	14695	1150188
2005	910902	188442	42305	16923	1158572
2006	1034762	233083	55408	20030	1343283

Motores do tipo padrão são responsáveis por 93% das vendas, a parte restante é atribuída aos motores de alto rendimento. O Selo PROCEL é timbrado nos melhores motores de acordo com um critério estatístico. A porcentagem das vendas de motores rotulados com esse Selo é apresentada na Tabela 2. A porcentagem de motores que não recebem o Selo é o complemento da porcentagem de motores com o Selo PROCEL.



Tabela 2 - Mercado de motores com o Selo PROCEL do tipo padrão/alto rendimento (%).

cv \ ano	2004	2005	2006	2007
1-10	65 / 64	65 / 64	66 / 92	99 / 100
>10-40	55 / 69	55 / 69	80 / 79	97 / 100
>40-100	62 / 77	62 / 77	81 / 67	100 / 100
>100-250	58 / 41	58 / 41	94 / 53	100 / 98

A estimativa da vida útil de motores elétricos baseou-se em vários trabalhos de pesquisa (Nadel, et. al., 2002; Andreas, 1992). A vida útil de motores está relacionada aos aspectos construtivos e operacionais dos equipamentos, como por exemplo as condições ambiente, podendo apresentar variações de um motor para o outro com a mesma potência elétrica. A Tabela 3 apresenta a vida útil de motores elétricos para as faixas de potências estudadas.

Tabela 3 - Vida útil por faixa de potência de motores (anos).

P (cv)	Mínima	Máxima	Média
1-10	10	19	13
>10-40	16	24	20
>40-100	22	34	25
>100-250	25	38	29

Apesar do descarte de motores elétricos ocorrer gradualmente ao longo do tempo, considerou-se que o motor é descartado no final da vida útil média. Então, considerou-se os valores de 0, 1 e 0 para os coeficientes da função de descarte, α , β e γ , respectivamente.

c. Parâmetros do consumo de energia

Com relação ao consumo de energia, o modelo desenvolvido faz uso do fator de carregamento, horas anuais de operação, potência nominal, fator de perda de rendimento devido à idade, e fator de carregamento. As Tabelas 4 e 5 apresentam a eficiência de motores do tipo padrão e alto rendimento, relativas ao Decreto Federal 4.508/2002 e aos níveis para a concessão do Selo PROCEL, respectivamente. O Selo PROCEL foi concedido em 2003 para os primeiros motores a serem etiquetados, do tipo padrão. Os motores do tipo alto rendimento começaram a receber o Selo em 2004.



Tabela 4 - Eficiência de motores Padrão/Alto Rendimento (%)
Decreto Federal 4.508/2002.

cv \ Ano	2003	2004	2005	2006	2007
1-10	81,1 / 83,6	81,1 / 83,6	81,1 / 83,6	82,6 / 82,2	75,0 / -
>10-40	89,7 / 90,9	89,7 / 90,9	89,7 / 90,9	89,7 / 91,7	90,6 / -
>40-100	92,4 / 93,2	92,4 / 93,2	92,4 / 93,2	95,2 / 93,3	- / -
>100-250	93,9 / 94,6	93,9 / 94,6	93,9 / 94,6	93,0 / 94,7	- / -

Tabela 5 - Eficiência de motores Padrão/Alto Rendimento (%)
Selo PROCEL.

cv \ Ano	2003	2004	2005	2006	2007
1-10	82.2 / 86.3	82.2 / 86.3	76.6 / 85.3	82.8 / 85.9	82.2 / 86.3
>10-40	89.2 / 92.1	89.2 / 92.1	89.6 / 92.2	89.7 / 91.8	89.2 / 92.1
>40-100	92.5 / 93.7	92.5 / 93.7	92.7 / 93.6	92.6 / 93.7	92.5 / 93.7
>100-250	92.3 / 94.6	92.3 / 94.6	93.9 / 94.9	94.1 / 94.9	92.3 / 94.6

O tempo de operação anual foi considerado como uma função da potência do motor, quanto maior for a potência, maior o tempo de operação. Os fatores relacionados ao carregamento e rendimentos dos motores, foram obtidos por pesquisas de campo (Schaeffer, 2005), como mostrado a Tabela 6.

O fator de carregamento corresponde à relação entre a potência média de operação do motor e a potência nominal. Com base em informações de catálogos de fabricantes de motores elétricos, como comentado anteriormente, observou-se que para carregamentos de 75% o motor opera com praticamente o mesmo rendimento do nominal, tendo o pico de desempenho entre 75% e 100% de carregamento. Dessa forma, foi ajustada uma função quadrática para representar o rendimento dos motores em função do carregamento.

O fator de eficiência do carregamento do motor, correspondente a relação entre o rendimento de operação e o rendimento nominal, está representada na Tabela 6.



Tabela 6 - Operação anual e fatores relacionados ao carregamento de motores.

P (cv)	1-10	>10-40	>40-100	100 – 250
Fc (%)	55%	61%	70%	74%
t (h)	800	1000	1200	2000
$f_{Fc, 50\%}$	0,975	0,980		

Com base em estudos sobre a vida útil de motores, estimou-se a redução de eficiência de motores com o passar dos anos de operação (Nadel, et. al., 2002 e Andreas, 1992). Foi criado um fator de perda de rendimento devido à idade para a correção do rendimento nominal do motor. Constatou-se que os motores perdem cerca de 3 a 4% de seu rendimento no final de sua vida útil e, com isso, adotou-se um modelo linear para as estimativas do fator de perda de rendimento ao longo da vida útil dos motores, como mostra a Figura 4. Considerou-se que todo motor perde 4% de seu rendimento ao longo de sua vida útil.

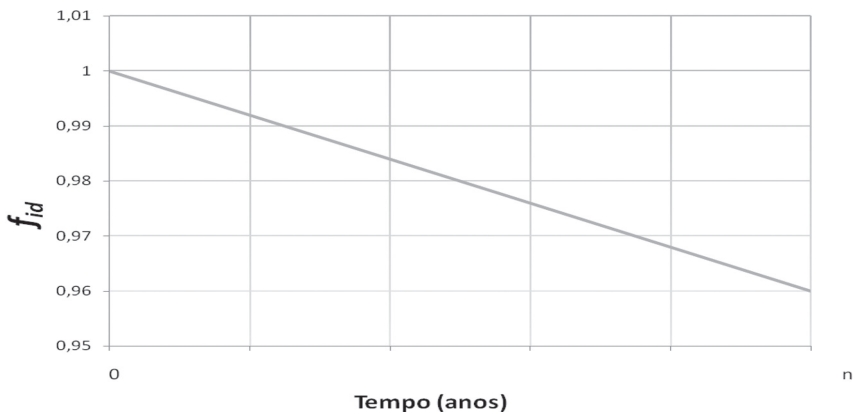
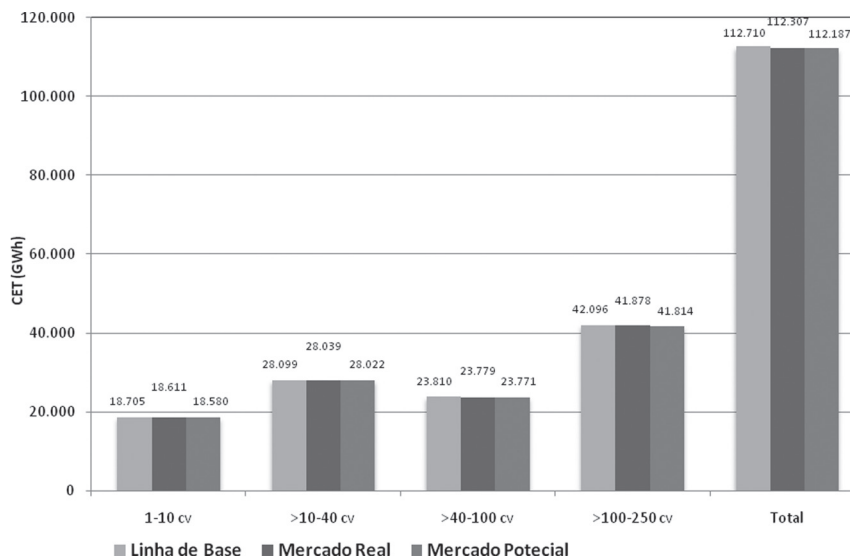


Figura 4 - Fator de eficiência da idade ao longo da vida útil

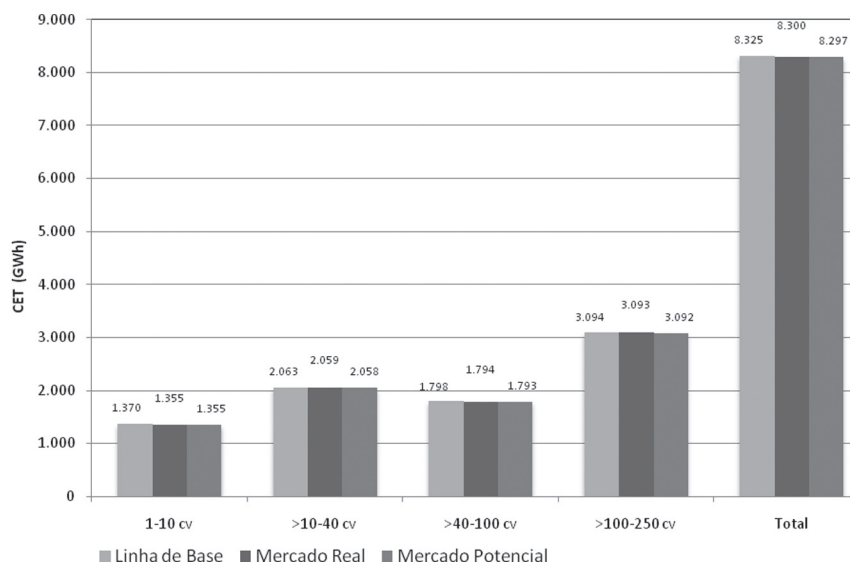
4. RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE ECONOMIA DE ENERGIA

Aplicando a metodologia desenvolvida, constatou-se que operam no Brasil cerca de 12,9 milhões de unidades de motores elétricos, em 2007, distribuídas em faixas de potência como mostrado na Figura 3. A Figura 5 (a) e 5 (b) apresentam o consumo de energia para os dois tipos de motores

estudados, padrão e alto rendimento no ano de 2007, considerando todos os três cenários, linha base, mercado real e mercado potencial.



(a)



(b)

Figura 5 - Estimativa da CET de cada faixa de potência de motores, do tipo padrão e alto rendimento em 2007.



O consumo total de energia calculado, atribuído aos motores elétricos em 2007 no Brasil, foi de cerca de 120 TWh, 29% do consumo total de energia brasileiro e 62% do consumo do setor industrial naquele ano.

O consumo de energia de um determinado cenário é a adição de ambos os tipos de motores, padrão e alto rendimento. As economias de energia devido ao Programa Selo PROCEL foram obtidas subtraindo o consumo de energia da Linha de Mercado Real do consumo de energia da Linha base. As economias de energia, associado a cada faixa de potência de motores, são apresentadas na Figura 6.

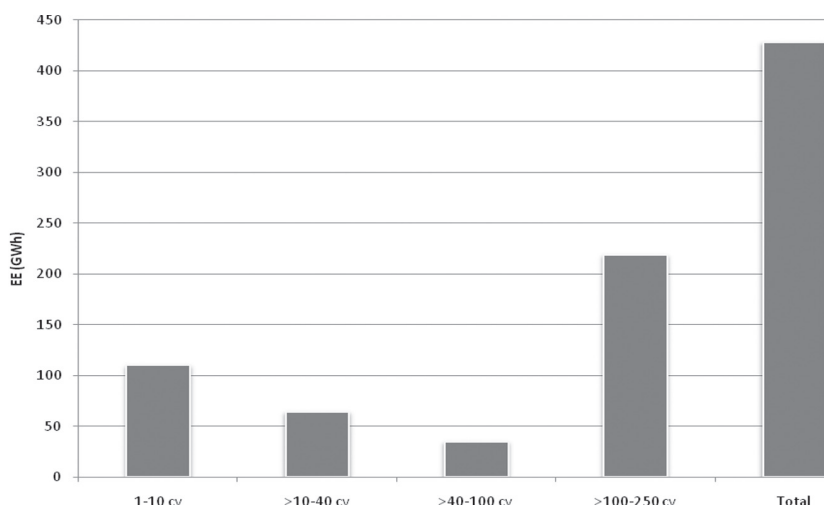


Figura 6 - Estimativa da EE de cada faixa de potência de motores em 2007.

As economias reais de energia totais em 2007 foram de 428 GWh com uma redução de demanda de ponta de 119 MW, associado a um fator de coincidência de ponta de 0,35. Na situação potencial do cenário potencial as economias de energia seriam de 551 GWh, com uma redução de demanda de ponta de 153 MW. A contribuição de cada faixa de potência para as economias de energia no cenário de mercado é apresentada na Tabela 7.



Tabela 7 - Contribuição de cada faixa de potência na EE e RDP

Potência (cv)	EE (GWh)		RDP (MW)	
	Padrão	Alto Rendimento	Padrão	Alto Rendimento
1-10	94,0	16,0	41,0	7,0
>10-40	60,0	4,0	21,0	1,0
>40-100	31,0	4,0	9,0	1,0
>100-250	218,0	1,0	38,0	0,2
Total	403,0	25,0	110,0	10,2

Pelos resultados apresentados na Tabela 7, pode se constatar que a grande contribuição para as economias de energia devido ao Selo PROCEL ocorrem em motores do tipo padrão para faixa de potência de 100-250 cv que representa 54% das economias de energia totais. Apesar de esta categoria representar apenas 2% do mercado de motores, a grande quantidade de economia de energia ocorre porque apresenta alta potência de equipamentos e maiores tempos de operação. Por outro lado, com relação aos motores de alto rendimento, a maior contribuição da economia de energia vem de motores de faixa de potência de 1-10 cv.

5. ANÁLISE DE INCERTEZAS

As incertezas associadas ao Modelo Proposto estão relacionadas à propagação de incertezas decorrente da entrada de dados para o cálculo do consumo de energia elétrica e parque de equipamentos.

Sabendo que a economia de energia, calculada pelo Modelo Proposto, é função das variáveis do parque de equipamentos e consumo unitário, o modelo de propagação de incertezas das variáveis utilizado pelo presente trabalho foi a lei geral de propagação das incertezas:

Seja:

$$EE = f(x, y, \dots) \quad (11)$$

$$\Delta EE = \sqrt{\left(\frac{\partial EE}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial EE}{\partial y} \cdot \Delta y\right)^2 + \dots} \quad (12)$$



Na Equação (12) EE é economia de energia (GWh), ΔEE é a incerteza do modelo (%), Δx é a incerteza da variável x (%) e Δy a incerteza da variável y (%).

A Tabela 8 apresenta a incerteza adotada para as variáveis utilizadas no modelo e o impacto de cada uma delas sobre a economia de energia. As incertezas foram estimadas com base nos procedimentos utilizados para a sua determinação.

Tabela 8 - Impacto de incertezas das variáveis no modelo

	Variável	Fonte de Informação	Incerteza
Consumo (CE)	Potência Nominal	PBE/INMETRO	$\pm 0\%$
	Eficiência	PBE/INMETRO	$\pm 0\%$
	Fator degradação	Campo	$\pm 1\%$
	Participação do Selo	PROCEL	$\pm 15\%$
	Fator de Eficiência	WEG	$\pm 0\%$
	Fator de carregamento	COPPE/UFRJ	$\pm 10\%$
	Tempo utilização	Estimado	$\pm 20\%$
	CE	-	$\pm 26,9\%$
Parque (M)	V	ABINEE	$\pm 1,0\%$
	S	Estimado	$\pm 10\%$
	M	-	$\pm 10\%$

Não se conseguiu obter as incertezas de alguns dados de entrada, assim, estimou-se tais incertezas com base em pesquisas similares. Ou seja, foram adotadas as mesmas incertezas daquelas pesquisas similares.

Com as incertezas dos cálculos de consumo de energia e parque de equipamentos determinados, estima-se a incerteza do modelo de cálculo de economia de energia atribuída ao Programa Selo PROCEL utilizando a equação 11.

Tabela 9 - Incerteza do modelo

Variável	Incerteza
M	$\pm 10\%$
CE	$\pm 26,9\%$
EE	$\pm 28,8\%$

Conclui-se que a incerteza do Modelo Proposto de Avaliação de Economia de Energia atribuída ao Programa Selo PROCEL, no âmbito de motores elétricos, está na ordem de 29%.



6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou análises simples e satisfatórias para calcular os impactos energéticos, em termos de economia de energia e redução de demanda de ponta, atribuído ao Programa de Etiquetagem Energética, Selo PROCEL, em motores de indução trifásicos.

Os motores de indução trifásicos são responsáveis por 62% do consumo de energia do setor residencial brasileiro e 29% de todo o consumo de energia elétrica no país. A introdução de motores mais eficientes no mercado brasileiro resultou em economias de energia na ordem de 428 GWh e em redução de demanda de ponta de 119 MW no ano de 2007. Cerca de 91% dos impactos alcançados são atribuídos aos motores do tipo padrão. Considerando o cenário potencial, ou seja, no caso todos os motores do mercado possuíssem o Selo PROCEL, a economia de energia seria na ordem de 551 GWh e a redução de demanda de ponta na ordem de 153 MW.

A maior contribuição da economia de energia ocorre para motores na faixa de potência de 100-250 cv, responsáveis por 54% de toda a economia de energia alcançada. Apesar de esta categoria representar apenas 2% do mercado de motores, a grande quantidade de economia de energia ocorre porque apresenta alta potência de equipamentos e maiores tempos de operação. Por outro lado, com relação aos motores de alto rendimento, a maior contribuição da economia de energia vem de motores de faixa de potência de 1-10 cv.

Devido às dificuldades de obtenção de alguns parâmetros para a aplicação da modelagem, estimou-se um nível de incertezas na ordem de 29% dos resultados obtidos. Essas incertezas ocorrem devido às margens de erro de cada variável utilizada no modelo. Entretanto, os resultados se mostram satisfatórios quando comparados com pesquisas correlatas de outros países.

REFERÊNCIAS

Almeida A.T., Fonseca P., Falkner H., Bertoldi, P. Market transformation of energy-efficiency motor technologies in the EU. *Energy Policy* 32, p. 563-575, 2005.

Andreas J.C., *Energy-efficient Electric Motors: Selection and Application*. Marcel Dekker, 1992.



- Becker N, Fishman Y, Lavee D. Economic evaluation of investment in electricity conservation. *Energy Conversion and Management* 49, p. 3517-3530, 2008.
- Bortoni E.C., Haddad J., Santos A.H.M., Azevedo E.M., Yamachita R.A. Analysis of Repairs on Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors Performance. *IEEE Trans. on Energy Conversion* 22-2, p. 383-388, 2007.
- Bortoni EC. Are my motors oversized? *Energy Conversion and Management* 50, p. 2282-2287, 2009.
- Cardoso R.B., Nogueira L.A.H. Estimativa do consumo de energia de refrigeradores no setor residencial brasileiro, *Revista Brasileira de Energia*, 13-2, p. 55-67, 2007.
- Garcia A.G.P., Szklo A.S., Schaeffer R., McNeil M.A. Energy-efficiency Standards for electric motors in Brazilian industry. *Energy Policy* 35, p.3424-3439, 2007.
- Haddad J., A lei de eficiência energética e o estabelecimento de índices mínimos de eficiência para equipamentos no Brasil, *Revista Brasileira de Energia* 11-1, p. 7-20, 2005.
- Mahlia T.M.I., Masjuki H.H., Choudhury I.A., Theory of energy efficiency standards and label. *Energy Conversion and Management* 43, p. 743-761, 2002.
- Murray C., Osborn J., Webber C., End-use efficiency to lower carbon emissions. *IEEE Power Engineering Review*, p. 10-18, 2001.
- Nadel S., Elliott R.N., Shepard M., Greenberg S., Katz G., Almeida A.T., Energy-efficient motor systems: a handbook on technology, program, and policy opportunities, 2nd Edition. ACEEE, 2002.
- PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, Avaliação dos Resultados do Programa Selo PROCEL (ano base 2008), em preparação, 2009.
- Schaeffer R., Oliveira S.E.M., Garcia A.G.P., Silva T.L.V., Monteiro L.F.C., Avaliação dos índices de eficiência de motores de indução trifásicos. UN/DESA/CLASP, 2005.
- Vine E., Rhee C.H., Lee K.D., Measurement and evaluation of energy efficiency programs: California and South Korea. *Energy*, 31, p.1100-1113, 2006.
- Yanti P.A.A., Mahliah T.M.I., Considerations for the selection of an applicable energy efficiency test procedure for electric motors in Malaysia: Lessons for other developing countries. *Energy Policy* 37, p. 3467-3474, 2009.