



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

CENTRO DE ENGENHARIAS

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL AUGUSTO DUARTE DE PAIVA

**AVALIAÇÃO DA TRANSIÇÃO DO ÍNDICE DE RENDIMENTO MÍNIMO IR3
PARA IR4 NO BRASIL PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATÉ 10 CV**

MOSSORÓ - RN

2019

GABRIEL AUGUSTO DUARTE DE PAIVA

**AVALIAÇÃO DA TRANSIÇÃO DO ÍNDICE DE RENDIMENTO MÍNIMO IR3
PARA IR4 NO BRASIL PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATÉ 10 CV**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Orientador(a): Victor de Paula Brandão
Aguiar- UFERSA

MOSSORÓ

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P142a Paiva, Gabriel Augusto Duarte de .

AVALIAÇÃO DA TRANSIÇÃO DO ÍNDICE DE RENDIMENTO
MÍNIMO IR3 PARA IR4 NO BRASIL PARA MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATÉ 10 CV / Gabriel Augusto
Duarte de Paiva. - 2019.

68 f. : il.

Orientador: Victor de Paula Brandão Aguiar.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

1. Motores industriais. 2. População de
motores. 3. Teste de viabilidade técnico-

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas

da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

GABRIEL AUGUSTO DUARTE DE PAIVA

**AVALIAÇÃO DA TRANSIÇÃO DO ÍNDICE DE RENDIMENTO MÍNIMO IR3
PARA IR4 NO BRASIL PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATÉ 10 CV**

Projeto apresentado ao Conselho do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural do Semiárido, como requisito para elaboração do Projeto de Conclusão de Curso (PCC II).

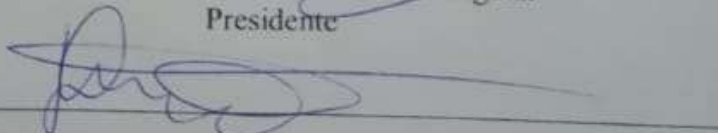
Orientador: Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar

APROVADA EM: 13/08/19

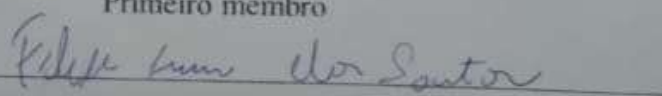
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar
Presidente



Prof. Ms. Herick Talles Queiroz Lemos
Primeiro membro



Prof. Ms. Filipe Lima dos Santos
Segundo membro

RESUMO

Desde 1984 o Brasil tem a preocupação com a economia de energia e distribuição de produtos de alta qualidade no mercado. Neste ano surgiu a discussão por parte do INMETRO, que acabou trazendo o programa brasileiro de etiquetagem (PBE), que no fim de 2001 com a lei nº 10.295, acabou tornando obrigatórios os “selos” de eficiência energética. A partir daí a preocupação sobre economia e eficiência energética só aumentou, e hoje o país está sobre a “égide” do Plano Nacional de Energia 2030, o qual prevê 53000 GWh de economia através de incentivos. Em 2002 vieram os primeiros índices mínimos de rendimento de motores no Brasil: IR1 e IR2 conhecidos como motores tipo *padrão* e *alta eficiência*. Índices análogos para estes tipos de motores já tinham sido previamente definidos pela Comissão Internacional de Eletrotécnica, IEC. Em 2005 a portaria interministerial nº 553 deu um prazo final para fabricação e comercialização de motores *padrão*. Por último, em 2017 a portaria interministerial Nº 1 determinou que motores IR3 sejam os únicos circulando no mercado até meados de 2020. O trabalho consiste em analisar a diminuição das perdas entre os índices para caracterizar um novo índice IR4 e além disto também é objetivo a comparação com a meta do Plano Nacional de Eficiência Energética 2030 (PNEF 2030), com a energia economizada pela implementação do índice em 2030. Através de equação definida pela Procel junto a UNIFEI, para cálculo do consumo energético de uma população de motores, foi definido o consumo ano a ano dos motores IR3 e IR4, separadamente, de 2019 até 2030. A aplicação do equacionamento dependeu da previsão de demanda feita para 2013, considerando um comportamento sazonal e tendencial dos dados de venda obtidos. Os novos rendimentos foram calculados a partir da reprodução do comportamento “médio” das diminuições percentuais de perdas para as transições de índices. A análise feita consistiu em comparar o consumo dos motores em duas situações, a primeira em que apenas motores IR3 sendo vendidos, enquanto a outra considera estagnação da população de IR3 e apenas vendas de IR4 no ano posterior a implementação do novo índice. A diferença entre os consumos das situações representa a economia de energia, e a comparação desses valores para diferentes anos de implementação também fez parte da avaliação do trabalho. Com os rendimentos IR4 estimados, uma implementação em 2019 levaria a uma economia de aproximadamente 0,82% da meta do PNEF 2030, o que pode não ser um número tão expressivo, mas representa energia suficiente para abastecer 109 mil residências por um ano. A diminuição dessa energia economizada com o adiamento da implementação do novo índice, pode chegar até a mais da metade para um atraso de 4 anos.

Palavras-chave: Motores industriais. População de motores. Teste de viabilidade técnico-econômica.

ABSTRACT

Since 1984 Brazil has been concerned with energy saving and high quality products in the market. In this year INMETRO brought up a discussion, which has led up to the Brazilian Labeling Program (PBE), which at the end of 2001 with the Law No. 10.295, ended up making the "seals" of energy efficiency mandatory. From then on the concern about energy economy and efficiency has just increased, today, the country, is facing the "aegis" of the 2030 National Energy Plan, which predicts 53000 GWh of savings through incentives. In 2002 came the first minimum energy performance standards in Brazil: IR1 and IR2 known as standard and high efficiency motors. Similar indexes for these types of motors had been previously defined by the International Electrotechnical Commission, IEC. In 2005 Interministerial Ordinance No. 553 gave a deadline for the manufacture and marketing of standard motors. Finally, in 2017 Interministerial Ordinance No. 1 determined that IR3 motors should be the only circulating engines in the market until mid-2020. The main objective of this work is to analyze the decreasing of losses between indexes to characterize a new IR4 index and in addition it is also an objective the comparison between the 2030 National Energy Efficiency Plan (PNEF 2030) target, with the energy saved by the index implementation in 2030. Through an equation defined by Procel with UNIFEI, to calculate the energy consumption of a motor population, the year-to-year consumption of the IR3 and IR4 engines was defined separately from 2019 to 2030. The application of the equation depended on the demand forecast made for 2013, considering a seasonal and trend behavior of the sales data obtained. The new yields were calculated from replicating "average" behavior of the percentage decreases in losses for index transitions. The analysis consisted of comparing motor consumption in two situations, the first in which only IR3 engines are being sold, while the other considers stagnation of the IR3 population and only IR4 sales in the year following the implementation of the new index. The difference between the consumption of the situations represents the energy saving, and the comparison of these values for different years of implementation was also part of the evaluation of this study. With estimated IR4 yields, an implementation in 2019 would lead to savings of approximately 0.82% of the PNEF 2030 target, which may not be as significant, but represents enough energy to power 109,000 houses for a year. The reduction in this energy saved by postponing the implementation of the new index could be more than half to a 4-year delay.

Keywords: Industrial motors. Motor population. Technical and economic feasibility test.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meus pais Senubia Duarte e Francisco Augusto, que me deram todo o suporte para que eu pudesse chegar onde estou, tanto nesta jornada acadêmica que se encerra, quanto nos outros aspectos da vida. Além de tudo são exemplos de integridade e me ensinaram a querer só o que é meu e a lutar pelos meus objetivos.

Agradeço ao meu irmão Eduardo Augusto por toda ajuda que pode dar, mesmo que indiretamente, e por todas as vezes que torceu por mim.

Agradeço a meus primos Ana Clara, Sival Filho e Laura Elizabete, que sempre me acompanham, torcendo por mim nas vitórias e me consolando nas derrotas.

Agradeço a meus amigos que conheci fora do meio acadêmico, Guilherme Gadelha, um grande amigo, sempre empático e disposto a ajudar, nunca esquecerei que me ajudou em minha primeira matrícula no curso.

Agradeço a todos os outros amigos que também estiveram ao meu lado durante todo este tempo. Andrezza Seychelles, amiga capaz de passar por cima dos próprios para me ajudar, Thais Noelly, uma ótima companhia para descontrair, e todos os outros que não foram citados, mas que são de muita importância.

Agradeço a minha grande companheira desta jornada acadêmica, Kamilla Rayssa, por todas as noites viradas, mesmo que nem sempre fosse estudando, todas as vezes que me defendeu, que me fez rir e que me ajudou esperando nada em troca. A minha passagem por este curso não seria a mesma sem você.

Agradeço a outro grande amigo de curso Francisco de Assis, pela companhia divertida, pelo companheirismo e pelo desespero compartilhado nos estudos de última hora. Fico muito feliz que tenhamos conseguido chegar até o fim desta jornada.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo do curso, todos contribuíram de alguma forma para minha experiência acadêmica. Ingrid Maia, uma companheira de estudos prestativa. Edel Mary, uma mulher batalhadora e determinada que é um exemplo para mim. Danrley Lima, com sua bondade e inteligência, está sempre disposto passar conhecimento. Agradeço também a todos os outros companheiros que esqueci de citar aqui.

Agradeço ao meu orientador Victor Aguiar, por ter sido um orientador paciente e compreensivo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 REVISÃO SOBRE O TEMA	3
1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO	5
1.3.1. Objetivo geral	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
2. REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1. MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	6
2.2. POTÊNCIA NOMINAL DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	11
2.3. MÉTODOS DE PREVISÃO DE DEMANDA.....	11
2.4.1. Média móvel simples	12
2.4.2. Média Móvel Ponderada (MMP).....	12
2.4.3 Ajustamento da Sazonalidade.....	12
2.4.4 Ajustamento de Tendência	13
2.4.5 Ajustamento para Demanda e Tendência ao mesmo tempo	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1 DETERMINAÇÃO DE IR ₄	15
3.1.1 Interpretação do índice α	21
3.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ATRAVÉS DA ECONOMIA DE ENERGIA.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1 DETERMINAÇÃO DE IR ₄	32
4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ATRAVÉS DA ECONOMIA DE ENERGIA.....	36
4.3 QUEDA DE ECONOMIA POR ANO DE IMPLEMENTAÇÃO	38
5. CONCLUSÃO	40
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
APÊNDICE A – Figuras Para Análise do Comportamento das Reduções percentuais na Faixa de 1 a 10 cv e na Faixa completa.....	43
APÊNDICE B – Alguns dos Comportamentos das Reduções de perdas em kW para motores de 1 a 10 cv	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Consumo de eletricidade no setor industrial	3
Figura 2 – Classes de eficiência IE para motores de 4 polos em 50 Hz	4
Figura 3 - Circuito do estator	7
Figura 4 – Circuito equivalente do MIT rotor gaiola de esquilo	9
Figura 5– Diagrama do Fluxo de potência do motor de indução	9
Figura 6 – Circuitos equivalentes para situações específicas: (a) – apresentando a potência entregue ao entreferro; (b) – apresentando potência mecânica ou convertida	10
Figura 7 – Comportamento das reduções percentuais nas perdas para a transição IR1-IR2 dos motores seis polos	17
Figura 8 – Comparação do percentual de perdas na faixa de 1 a 10 cv e em toda faixa prevista por norma	18
Figura 9– Relação entre rendimento e perdas para motores 1cv, dois pólos.	19
Figura 10– Gráfico do consumo de energia por ano dos motores IR3 e IR4	22
Figura 11 – Comportamento da demanda de vendas dos motores de 1 a 10 cv entre os anos de 2006 e 2009	24
Figura 12- Previsão de demanda de venda de motores 1 cv a 10 cv	25
Figura 13– Fator de Eficiência para motores de 1 a 10 cv	28
Figura 14– Fator de depreciação de acordo com a idade do motor	29
Figura 15– Redução de perdas entre os índices IR1 e IR2 para motores 2 polos de 1 a 10 CV	32
Figura 16– Redução de perdas entre os índices IR1 e IR2 para motores 2 polos	33
Figura 17– Redução de perdas entre os índices IR2 e IR3 para motores 2 polos de 1 a 10 CV	33
Figura 18 – Redução de perdas entre os índices IR2 e IR3 para motores 2 polos	34
Figura 19 – Comportamento dos motores 1 cv 4 polos	36
Figura 20– Consumo anual para implantação em 2019.	37
Figura 21 – Consumo anual para implantação em 2020.	37
Figura 22 – Redução percentual da economia de energia para a meta em 2030.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de redução percentual de perdas para a transição IR3 – IR4	20
Tabela 2– Vendas de motores elétricos no Brasil	23
Tabela 3– Divisão da população de motores por número de pólos.....	26
Tabela 4– Estoque de motores elétricos de indução por ano	27
Tabela 5– Índices Mínimos de rendimentos IR3 e IR4 usados para cálculo.....	27
Tabela 6- Fatores para cálculo do consumo médio unitário dos motores IR3	30
Tabela 7- Fatores para cálculo do consumo médio unitário dos motores IR4	30
Tabela 8 – Comportamento da Perda percentual entre transições.....	35
Tabela 9 – Resumo dos dados importantes para os anos de 2021, 2022 e 2023.	38

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Ministério de Minas e Energia et al. (2002), os motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo, tem regulamentação de seus índices mínimos para eficiência energética no país. Esta regulamentação oficial foi responsável pela criação das primeiras tabelas de níveis mínimos de eficiência para motores de indução de 1 a 250 cv, com 2,4,6 ou 8 polos, e correspondentes a motores de desempenho padrão e de alto rendimento. Para que fosse alcançado este ponto de criação dos primeiros níveis mínimos de rendimento no Brasil, em 2001 fez-se necessário o surgimento do Comitê Gestor de Indicadores e níveis de Eficiência Energética (CGIEE). Este comitê é responsável por desenvolver a regulamentação específica para cada tipo de aparelho elétrico, e estabelecer o programa de metas para avançar o nível de rendimento dos equipamentos regulamentados. De acordo com o Ministério de Minas e Energia et al.(2002), o prazo máximo de fabricação e comercialização dos motores padrão e de alto rendimento fora da norma foi 31 de junho de 2003, podendo ser prorrogado até o final do ano. Os níveis criados com esta primeira regulamentação correspondiam aos índices de rendimento mínimo IR1 (motores *padrão*) e IR2 (motores de *alto rendimento*), que são nomenclaturas criadas pela Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) para descrever tais índices. Esta nomenclatura se assemelha a usada na Europa, a *IE*, a qual foi adotada pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), onde os níveis de mesmo índice tem uma equivalência, por exemplo, IE1 e IR1 são ambos referidos a motores padrão. Após a aparição de dois níveis mínimos simultâneos, caracterizando motores *padrão* e de *alto rendimento*, o próximo passo lógico foi tirar de circulação os motores que fossem classificados como *padrão*. Segundo o Ministério de Minas e Energia et al. (2005) isto se deu em 8 de dezembro de 2005, com 4 anos e seis meses de tempo limite para circulação de motores de classificação *padrão* ou menor no mercado nacional. Para o crescimento da competitividade no mercado e da economia de energia por diminuição das perdas, no cenário brasileiro se fez necessária uma nova transição de índices mínimos de rendimento. Esta mudança está em fase de estabelecimento, e segundo o Ministério de Minas e Energia et al. (2017) é obrigatório o cumprimento deste novo índice chamado IR3 ou índice *premium*, com prazo máximo de comercialização dos motores pertencentes ao índice inferior IR2 em meados de 2020.

1.1 JUSTIFICATIVA

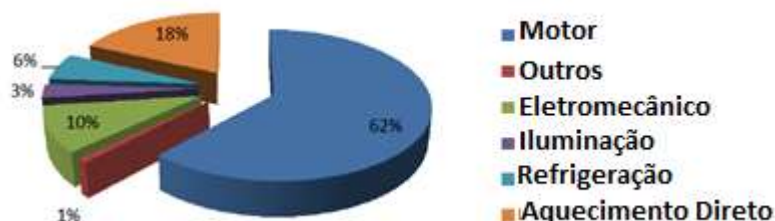
A preocupação com a economia de energia é uma realidade em diversas partes do mundo e o Brasil não é exceção, tendo o Ministério de Minas e Energia (MME) como um dos órgãos públicos responsáveis pelas medidas cabíveis para crescimento dos níveis de eficiência energética. Desde o ano de 1984 o país já mostrava preocupação com as questões energéticas, com a criação de um protótipo do atualmente conhecido Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) de autoria do INMETRO (INMETRO, 2014). O PBE era um programa voluntário, não sendo obrigatória a conformidade com ele até o ano de 2001, pois a partir desta data segundo Brasil (2001), era obrigatório para todo fabricante de importador de máquinas e aparelhos a concordância com índices mínimos de eficiência energética. Em vários países além do Brasil os programas de etiquetagem são uma medida comum de incentivo à fabricação, consumo e comercialização de produtos de melhor qualidade. Só nos Estados Unidos (EUA), anualmente, o consumo total de eletricidade foi reduzido em cerca de 5% em 2014, que corresponde a 360 TWh, através do uso do sistema de etiquetagem, chamado “Energy Star” (EPA, 2014). Existe uma estimativa de que pelo ano de 2035 a redução das perdas vai representar cerca de 14% no total do consumo do país (MEYERS; WILLIAMS; CHAN, 2013). No Brasil, o PBE representa um dos incentivos do governo federal a melhoria da eficiência dos equipamentos elétricos circulando no mercado, e a partir deste e de decretos, portarias, e outras medidas, o governo é responsável por guiar os usuários a compra de produtos mais eficientes, maximizando a economia de energia. O País está tão engajado na causa, que até criou o plano nacional de energia (PNE2030), o qual traçou a meta de 11,57% de economia de energia em relação à produção até o ano de 2030 (Andrade; Pontes, 2017).

Um dos produtos alvos das medidas governamentais são os motores de indução trifásicos (MIT), e isto se deve ao grande e bem estabelecido mercado industrial brasileiro de fabricação e comercialização de motores elétricos industriais (Soares et al., 2013). Além de um grande mercado os motores têm uma grande fatia do consumo de energia elétrica do setor industrial, sendo que esta ultrapassa metade do consumo total. As afirmações anteriores podem ser vistas na Figura 1.

A partir de uma análise detalhada dos aspectos envolvidos na escolha dos valores de rendimento mínimo para cada índice, considerando os anteriormente já estabelecidos no país, é possível propor uma nova tabulação para um futuro índice IR4 ou *super premium*, já definido pela IEC como IE4, pode ser analisada e adaptada da tabela já existente, ou

simplesmente, criada uma nova tabela considerando as estratégias usadas nas diminuições de perdas entre os índices existentes.

Figura 1– Consumo de eletricidade no setor industrial

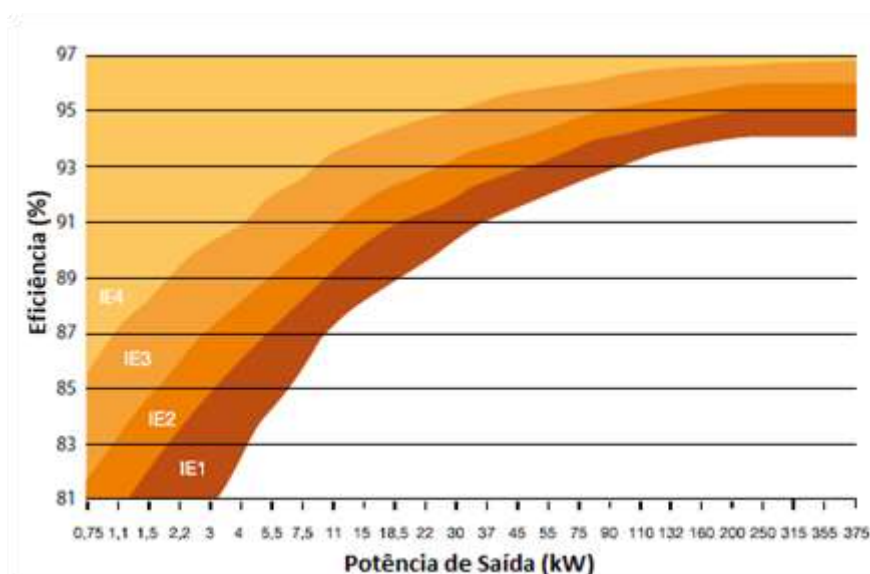


Fonte: Adaptado de Soares et al. (2013)

1.2 REVISÃO SOBRE O TEMA

O estudo para criação de índices mínimos de rendimento, ou MEPS, “minimum energy performance standards”, é feito pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), que é um órgão mundial que tem como função criar e publicar normas internacionais que dizem respeito a tecnologias na área elétrica, eletrônica e afins (COMISSÃO ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL, 2008). Além de trazer uma ótima ambientação para melhorar a segurança e aperfeiçoar a utilização de eletricidade, as normas internacionais da IEC dão suporte à comercialização entre os países, fornecendo uma referência para o funcionamento do acordo sobre barreiras técnicas da Organização Mundial do Comércio (OMC) (COMISSÃO ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL, 2008). Este órgão é responsável pela criação dos níveis mínimos *IE*, que servem de base para que países pelo mundo inteiro produzam seus próprios índices. Tem-se o Brasil como um grande exemplo onde o índice IR3, prestes a entrar em vigor como índice obrigatório, foi desenvolvido com base no IE3 (Soares et al., 2013). A Figura 2 mostra os números relacionados aos índices em MIT em 50 Hz, como exemplo.

Figura 2 – Classes de eficiência IE para motores de 4 polos em 50 Hz



Fonte: Adaptado de Comissão Eletrotécnica Internacional (2008)

Os índices de rendimento mínimo IE4/*super premium* já estão definidos pela IEC, (ALMEIDA; FERREIRA, 2014; IEC, 2007), sendo encontrado no mercado motores que já atendam esse índice (ANDRADE, 2017).

A única maneira de confirmar a real efetividade de custo benefício desta troca de índices é pela análise da viabilidade. Esta análise pode ser feita por diferentes métodos. Um deles consiste em considerar o maior custo inicial do novo motor, e comparar com a diminuição de custos pela maior eficiência, para que se possa saber se a diferença no investimento inicial é coberta pelo valor economizado em energia elétrica ao longo da vida útil da máquina. Esta análise deve considerar a mudança dos fatores ao longo do tempo, como por exemplo, depreciação da moeda e aumento da tarifa sobre consumo. Outra metodologia de avaliação possível é a desenvolvida pela Procel/Eletrobrás, que simplesmente subtrai os valores das duas curvas de custo por tempo dos motores pertencentes a índices diferentes. O resultado da subtração é correspondente à economia de energia, e esta pode ter sua significância avaliada se comparada a meta de economia de energia do PNE 2030. Tabulando o novo índice *super premium* através da análise da redução de perdas usada na transição entre índices anteriores (IE1,2 e 3) e avaliando a viabilidade através do índice de economia de energia, chega-se ao objetivo do presente trabalho, confirmando ou não a possibilidade de implementação do índice IE4 no Brasil.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

O tópico abordado nesta sessão do trabalho é o objetivo geral do mesmo, e consequentemente as especificidades em que este se desdobra.

1.3.1. Objetivo geral

Para este projeto, objetiva-se avaliar uma possível transição de nível mínimo de rendimento obrigatório no Brasil, de um índice IR3 (em atual implantação) para um possível índice IR4.

1.3.2. Objetivos específicos

- Definição do índice IR4 a partir da avaliação dos critérios usados para montar os outros índices que existem ou já existiram no país;
- Avaliação de motores de 1 a 10 CV de 2 a 8 polos;
- Analisar a economia energética dos motores na transição IR3 para IR4;
- Analisar a diminuição de economia da transição IR3 para IR4 atrasando a transição.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta sessão será apresentado o referencial teórico sobre motores de indução e outros assuntos contidos dentro desta grande área, como perdas, torque mecânico e os métodos de previsão das populações de motores.

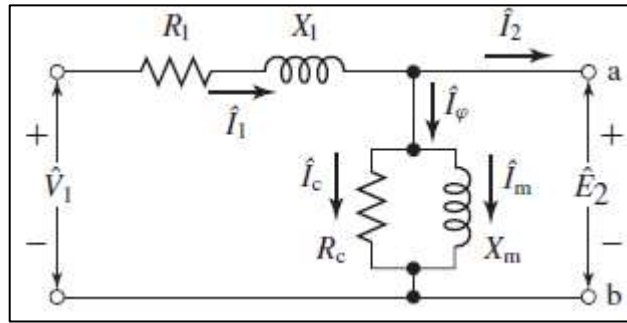
2.1. MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Um MIT com rotor gaiola de esquilo tem como característica as barras encrustadas no rotor eletricamente curto-circuitado e sem conexões externas (UMANS, 2014). Os motores de indução são um dos exemplos de máquinas de indução e, para se entendê-los, faz-se necessário a compreensão do circuito equivalente monofásico correspondente. O entendimento do circuito traz conhecimentos importantes sobre perdas localizadas, que interferem no rendimento da máquina.

O primeiro fato sobre o MIT é que estes são considerados como um sistema com três fases ligados em Y ou Δ , no qual as correntes e tensões dadas são referentes a uma fase e a única diferença entre os valores destas grandezas para cada fase é o atraso de 120 graus elétricos de uma em relação à outra (UMANS, 2014). A força magnetomotriz no entreferro é correspondente ao fluxo magnético criado a partir da corrente no estator, mais o campo disperso devido à reatância de dispersão do estator, assim como seus equivalentes no rotor. O circuito para o estator é exatamente igual ao circuito de um transformador. Daí o sistema se divide em dois subsistemas: um onde se tem a produção da corrente do rotor $\hat{I}_2$, e o outro o ramo de excitação. Este ramo representa a corrente necessária para criação do fluxo resultante do entreferro $\hat{I}_\phi$, sendo esta corrente dividida em duas componentes, uma relativa às perdas no ferro, $\hat{I}_c$, e outra relativa à magnetização, $\hat{I}_m$ (CHAPMAN, 2013). A Figura 3 mostra a construção final do circuito do estator de um motor de indução, no qual $\hat{E}_2$ é igual à força contraeletromotriz gerada pelo fluxo resultante no entreferro.

Para adição dos efeitos do rotor no circuito, precisa-se calcular uma impedância de dispersão Z_2 correspondente, a qual pode ser calculada através da razão da Tensão $\hat{E}_2$ pela corrente $\hat{I}_2$.

Figura 3 - Circuito do estator



Fonte: Umans (2014)

Considerando a construção do circuito equivalente, esta impedância encontrada Z_2 é uma representação da impedância do secundário referida ao primário e na frequência de alimentação, sendo que neste caso quando se fala de primário refere-se à estator e, secundário a rotor. O que se pode deduzir é que Z_2 é a impedância do rotor referida ao estator e todas as grandezas relacionadas a ele são equivalentes das grandezas reais do rotor, Z_{rotor} (CHAPMAN, 2013).

Para referenciar a impedância do secundário de um transformador ao primário necessita-se apenas da relação de espiras, pois multiplicando o quadrado desta pela impedância a ser transformada, é obtido o valor da impedância referenciada. Segundo Umans (2014):

“No caso de um motor de indução polifásico, quando o rotor é substituído por um rotor equivalente, tendo um enrolamento polifásico com os mesmos números de fases e espiras que o estator mas produzindo a mesma FMM e fluxo de entreferro que o rotor real o desempenho não será alterado quando for observado do ponto de vista dos terminais do estator.”

A relação entre a impedância referida ao estator e ao rotor se dá pela Equação 1, na qual o índice 2s indica que as grandezas estão referenciadas ao estator, mas numericamente na frequência do rotor. A relação de espiras equivalente entre estator e rotor, N_{ef} , representa a relação de espiras entre o rotor e o estator.

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = N_{ef}^2 \frac{\hat{E}_{rotor}}{\hat{I}_{rotor}} = N_{ef}^2 Z_{rotor} , \quad (1)$$

onde $\hat{E}_{rotor}$ e $\hat{I}_{rotor}$, são respectivamente tensão induzida e corrente induzida equivalentes por fase, não referenciadas ao estator e na frequência do rotor.

O próximo passo a ser dado na construção do circuito equivalente é considerar agora o movimento relativo entre o estator e o rotor, para que o rotor real possa ser substituído por um equivalente que seja estático, trocando assim as características dele, como tensões, correntes e escorregamento, por novos valores à frequência do estator (UMANS, 2014). A Equação 2 define uma forma de calcular a impedância referenciada do rotor a partir das impedâncias originais e o escorregamento.

$$Z_{2s} = \frac{E_{2s}}{I_{2s}} = R_2 + jsX_2 . \quad (2)$$

Com relação à impedância referenciada, a atualização do valor para ajustar-se à frequência do estator deve ser feita multiplicando a reatância X_2 pelo escorregamento s . Isto se dá por causa da relação que existe entre as frequências,

$$f_r = sf \quad (3)$$

onde f_r é frequência do rotor e f a frequência de alimentação.

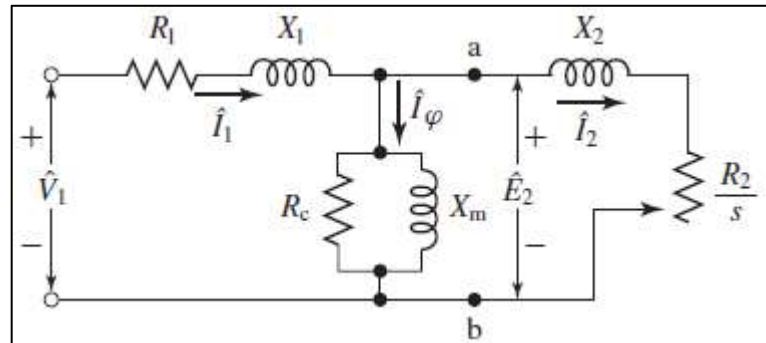
Como a reatância é uma função da frequência, acaba-se utilizando a mesma relação para este (CHAPMAN, 2013). Duas considerações precisam ser feitas sobre a corrente e a tensão no rotor referido ao estator, para que assim possa ser calculada. Sobre as correntes, se sabe que estas são de igual frequência as do estator, já que a curva da força magnetomotriz depende das correntes $\hat{I}_1$, referente ao estator, e $\hat{I}_2$ referente ao carregamento no rotor. Para a tensão precisa-se considerar a proporcionalidade entre esta grandeza e a frequência tanto no rotor quanto no estator. O escorregamento serve de fator de proporcionalidade entre as frequências dos dois componentes, logo, pode ser usado da mesma maneira para as tensões. As Equações 4 e 5 mostram o passo a passo para chegar a fórmula final da transposição da impedância do rotor para o lado do estator.

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = \frac{s\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = R_2 + jsX_2 \quad (4)$$

$$\frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (5)$$

O circuito final do motor de indução é mostrado na Figura 4. Após a montagem do circuito equivalente, é importante fazer a análise do balanço de energia e das perdas localizadas e generalizadas no motor, para que assim possa ser determinada a potência de saída do motor. Segundo Chapman (2013) um motor de indução trifásico, nada mais é que um “transformador rotativo”, que tem suas saídas em curto circuito, ou seja, ao invés de ter uma saída em forma de energia elétrica, ele tem a saída em forma de potência sobre um eixo.

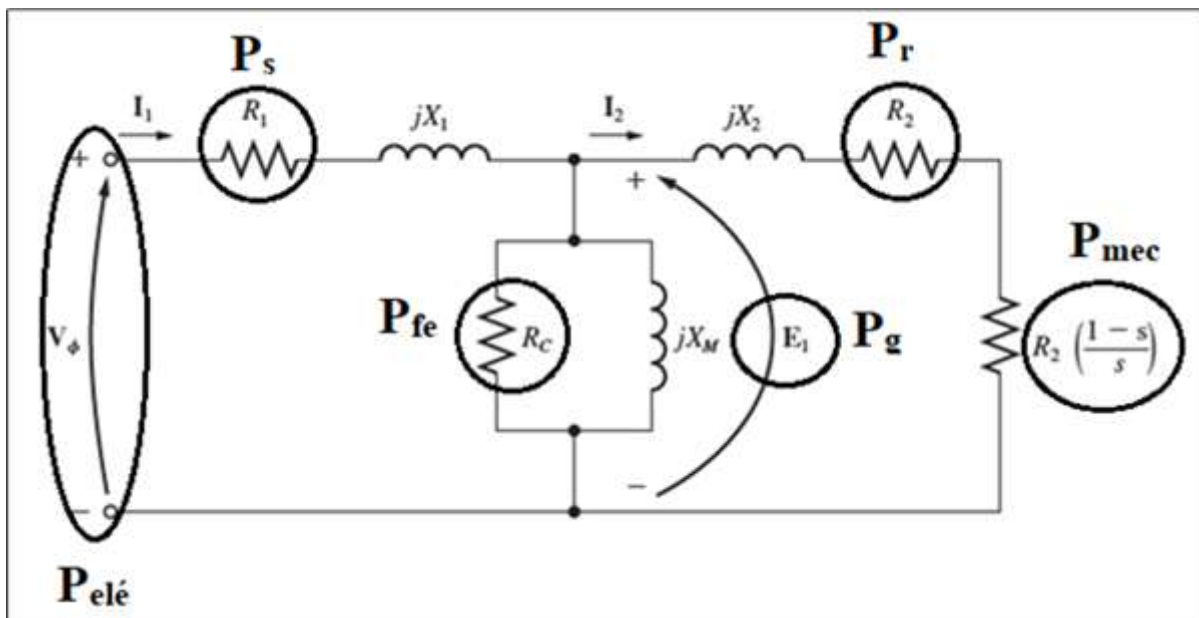
Figura 4 – Circuito equivalente do MIT rotor gaiola de esquilo



Fonte: Umans (2014)

A potência que entra no motor é chamada de $P_{el\acute{e}}$ e vem através da instalação elétrica ao qual o motor está ligado. O que vai acontecer com esta potência é ser reduzida ao longo do percurso até que chegue ao eixo do motor e seja aplicada para a realização de trabalho útil a alguma máquina. A Figura 5 mostra o circuito equivalente do motor, o qual discrimina as perdas que ocorrem em cada parte do motor.

Figura 5– Diagrama do Fluxo de potência do motor de indução



Fonte: Chapman (2013)

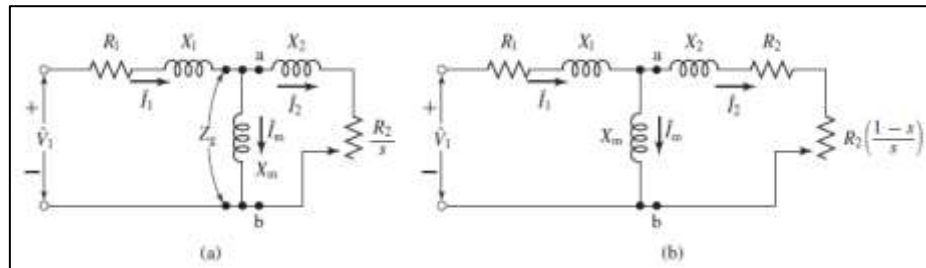
A $P_{el\acute{e}}$ corresponde a potência fornecida pela rede elétrica quando o equipamento é ligado. As primeiras perdas encontradas na máquina ocorrem relativas à queda de tensão na resistência do estator e a derivação na resistência equivalente as perdas no ferro. Logo esta

potência é relativa às perdas Joule. Estas perdas citadas, em relação ao estator e ao núcleo, P_s e P_{fe} , respectivamente. Neste ponto, depois de descontadas tais perdas, a potência que se tem é entregue ao entreferro, sendo ela chamada de “Potência entregue ao entreferro”, P_g , mostrada na Equação 6.

$$P_g = P_{elé} - P_s - P_{fe} \quad (6)$$

O rotor também tem perdas, estas são devido à resistência de barras e anéis de curto circuito, P_r . Esta última também é considerada perda Joule. Depois do rotor ocorre à conversão eletromecânica da energia, daí tem-se a “Potência convertida” ou “Potência mecânica”, P_{mec} . Por último têm-se as perdas por atrito e ventilação, P_{AV} , além das perdas suplementares, P_{sup} , chegando-se assim a potência real de saída (P_{eixo}). Existem duas formas simplificadas de circuito equivalente de um motor de indução, e ambas estão representadas na Figura 6.

Figura 6 – Circuitos equivalentes para situações específicas: (a) – apresentando a potência entregue ao entreferro; (b) – apresentando potência mecânica ou convertida.



Fonte: Umans (2014)

No circuito não estão previstas formas analíticas de cálculo de perdas mecânicas (atrito e ventilação), assim como formas de calcular as perdas suplementares.

O torque gerado em um MIT é resultado da ação dos campos magnéticos girantes do rotor e do estator, utilizando o mesmo princípio de ímãs permanentes que estão sob a ação dos campos um do outro e tendem a alinhar os polos opostos (CHAPMAN, 2013). O torque mecânico (T_{mec}) é o resultado da transformação eletromecânica ocorrida do MIT, porém, devido às perdas de ventilação e atrito (P_{av}) e perdas suplementares (P_{sup}), existe uma diferenciação entre este e o torque entregue ao eixo (T_{eixo}). Através das Equações 7 e 8 pode-

se calcular estes dois torques, ω_s e ω_m são as velocidades angulares síncrona e mecânica do eixo respectivamente.

$$T_{mec} = \frac{P_g}{\omega_s} = \frac{P_{mec}}{\omega_m} \quad (7)$$

$$T_{eixo} = \frac{P_{mec} - P_{av} - P_{sup}}{\omega_m} \quad (8)$$

2.2. POTÊNCIA NOMINAL DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Tecnicamente se as máquinas elétricas levassem apenas a resistência do eixo em consideração, poderiam trabalhar a potências bem maiores que sua potência nominal. O fato é que a determinação desta potência máxima de trabalho ou potência nominal depende prioritariamente do aquecimento dos enrolamentos da máquina (CHAPMAN, 2013). A potência nominal é definida pelos fabricantes dos motores, e são os valores usados nas tabelas de índices de rendimento.

2.3. MÉTODOS DE PREVISÃO DE DEMANDA

Segundo Gonçalves (2004), os modelos para previsão de demandas podem ir de uma simples estimativa até um modelo computacional sofisticado. Toda esta variedade de modelos está subdividida em dois grupos: métodos quantitativos e métodos qualitativos.

As técnicas qualitativas são mais básicas e subjetivas, sendo utilizada em situações onde existe pouca informação, logo, a análise depende da experiência de um grupo na observação de tal situação. Este tipo de técnica é mais utilizado em casos de produto novo e tecnologia nova, onde ela é a única possível de aplicar (GONÇALVES, 2004).

As técnicas quantitativas são divididas em modelos temporais e modelos causais. Os modelos causais são utilizados para correlacionar a demanda com alguma outra variável, para descobrir a efetividade deste fator como determinante para as variações de demanda. As séries temporais utilizam o histórico anterior para determinar o futuro da demanda considerando que ela irá replicar o comportamento apresentado anteriormente. (PACHECO, SILVA, 2003).

As técnicas para séries temporais têm como exemplos as médias móveis, alisamento exponencial, ajustamento de sazonalidade e ajustamento de tendência.

2.4.1. Média móvel simples

A estimativa é feita a partir da média de valores de demandas passadas, sem uma regra sobre a quantidade de períodos a levar em consideração. A média móvel pode acumular muito erro para o caso de uma demanda tendencial crescente ou decrescente (MOREIRA, 1998). A média móvel é calculada através da Equação 9, na qual D é a demanda do período “g” e “n” a quantidade de períodos considerados no somatório.

$$MM = \frac{\sum_{g=1}^n D_g}{n} \quad (9)$$

2.4.2. Média Móvel Ponderada (MMP)

Semelhante à média simples, esta adiciona um peso a valores mais atuais, para que valores antigos que não sejam tão condizentes com a realidade afetem menos a média calculada.

2.4.3 Ajustamento da Sazonalidade

Sazonalidade é um comportamento da demanda caracterizado por variações periódicas geralmente associadas a algum evento ou acontecimento que nunca falha em influenciar a demanda do produto. Ovos de páscoa é um exemplo, todos os anos existem um pico de vendas motivado pelo feriado e todo o resto dos meses a demanda é muito baixa. Para desenvolver o método deve-se calcular a média total das demandas, a média móvel simples para as demandas é calculada e representa um valor base para o cálculo do coeficiente de sazonalidade (CS). A diminuição entre a demanda e a média móvel calculada representa o CS, uma média destes coeficientes dos períodos equivalentes em diferentes ciclos vai apresentar o CS médio, que realmente será usado para o cálculo. A estimativa agora só depende de descobrir qual tipo de período se quer estimar, se é tipo 1,2, ...n, e multiplicar a média de todas as demandas pelo coeficiente correspondente (GONÇALVES, 2004).

2.4.4 Ajustamento de Tendência

Segundo Gonçalves (2004) tendência é a característica que a demanda tem de crescer ou decrescer com o tempo. Para tendência o método de previsão é simples, regressão linear sobre os valores de demanda para descobrir a equação que dá o comportamento da demanda. Uma vez com a equação em mãos, é só substituir o número referente a data que se quer prever a demanda.

2.4.5 Ajustamento para Demanda e Tendência ao mesmo tempo

A metodologia utilizada para previsão de demanda com sazonalidade e tendência é dividida em quatro etapas. A primeira etapa da previsão consiste no cálculo dos coeficientes de sazonalidade (CS), que representa o quanto que os valores de demanda para cada período se distanciam da média móvel calculada considerando cada valor de demanda como localizado no meio do ciclo (MOREIRA, 2011). Para um ciclo com 13 períodos, o valor do meio é o sétimo, tendo 6 valores de demanda anteriores e posteriores a ele. Para obter-se a média móvel para o oitavo valor de demanda do ciclo, é só “mover” a janela de dados utilizados, para que este fique no centro do grupo e tenha a mesma quantidade de demandas anteriores e posteriores a ele. Isto significa dizer que para a média móvel do oitavo valor de demanda do primeiro ciclo, precisa-se dos 6 valores de demanda anteriores a este os 5 valores posteriores mais a primeira demanda do segundo ciclo. Após o cálculo da média móvel para cada demanda possível, a Equação 10 e 11 mostram o cálculo do CS e CS médio, no qual o subscrito “g” representa o tipo de período para o qual está se calculando o CS (para o exemplo varia de 1 a 13) e “a” é o número do ciclo ao qual pertence o valor utilizado. O subscrito “b” representa o número total de ciclos analisados.

$$CS_{g,a} = MM - D_{g,a} \quad (10)$$

$$CS \text{ médio}_g = \frac{\sum_{a=1}^b CS_{g,a}}{b} \quad (11)$$

O próximo passo da metodologia é a retirada da característica sazonal do grupo de valores de demanda, para que assim a tendência possa ser analisada separadamente (MOREIRA,

2011). A diminuição da demanda, para cada período, dos respectivos CS médio, resulta nos valores de demanda dessazonalizada (DD). Este cálculo é feito a partir da Equação 12.

$$DD_{g,a} = D_{g,a} - g \quad (12)$$

Depois de isolado o comportamento tendencial, uma regressão linear se faz necessária para determinar o comportamento destes valores (MOREIRA, 2011). As equações 13, 14 e 15 são utilizadas na regressão, na qual AA representa o coeficiente linear da reta e BB o coeficiente angular além de X, Y e n representam tempo, demanda e número de valores usados respectivamente.

$$BB = \frac{\sum XY - n * X_{médio} * Y_{médio}}{\sum X^2 - n * X^2} \quad (13)$$

$$AA = Y_{médio} - BB * X_{médio} \quad (14)$$

$$Y = BBX + AA \quad (15)$$

O último passo consiste no cálculo da previsão de demanda dessazonalizada através da equação encontrada por regressão e posterior incorporação do fator sazonal, somando-se o CS médio a este valor Y. Utiliza-se a Equação 16 para o cálculo da demanda prevista (DP).

$$DP_{g,a} = Y_{i,a} + CS\ médio_g \quad (16)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para que os objetivos do presente trabalho fossem atingidos, algumas metodologias foram utilizadas, pois considerando a pluralidade destes, cada etapa precisou de uma abordagem diferente, sendo assim alcançados os resultados necessários.

3.1 DETERMINAÇÃO DE IR4

A primeira etapa do processo consistiu em aproximar valores para a construção de uma tabela de índices mínimos de rendimento IR4, utilizando como base os valores dos outros índices já conhecidos no país, IR1 à IR3.

Antes de qualquer análise, foi necessário desenvolver uma formulação para o cálculo da diminuição percentual de perdas entre as mudanças de índice de rendimento. Existem algumas fórmulas possíveis para o cálculo do rendimento, mas em resumo, o rendimento diz respeito a quanto em percentual representa a diferença entre a potência de entrada de um sistema de transformação energético e a saída. A Equação 17 mostra as diferentes maneiras de escrever o rendimento de um equipamento, inclusive levando em conta o somatório das perdas já apresentadas no capítulo anterior (P).

$$\eta = \frac{P_{eixo}}{P_{elé}} = 1 - \frac{P}{P_{entrada}} = \frac{P_{eixo}}{P_{eixo} + P} \quad (17)$$

Rendimento e perdas no dispositivo estão fisicamente ligados, por este motivo, uma avaliação passível de ser feita nos índices de rendimento é a de comparação da diminuição de perdas de um índice de rendimento fixado para um motor com certa potência. Para relacionar dois rendimentos diferentes precisa-se achar uma grandeza que os dois motores tenham em comum. Como a intenção é comparar a redução das perdas, nada mais lógico que igualar suas potências de saída. Como os índices mínimos de rendimento são dados apenas na característica nominal do MIT, a potência de saída será a potência nominal. Considerando uma diminuição de $\alpha\%$ nas perdas de um motor com certa quantidade de potência, têm-se as Equações 18 e 19 correspondendo aos rendimentos dos dois motores.

$$R_1 = \frac{P_{eixo}}{P_{eixo} + P} \quad (18)$$

$$R_2 = \frac{P_{eixo}}{P_{eixo} + (P - \alpha P)} \quad (19)$$

onde R_1 é o rendimento do motor de certa potência em um IR menor e R_2 é o rendimento do motor de mesma potência no IR maior.

Colocando a potência de saída em evidência nos denominadores obtêm-se as Equações 20 e 21.

$$R_1 = \frac{1}{1 + \frac{P}{P_{eixo}}} \quad (20)$$

$$R_2 = \frac{1}{1 + \frac{P(1 - \alpha)}{P_{eixo}}} \quad (21)$$

Isolando as potências de saída e, igualando as Equações 20 e 21, é encontrada a Equação 22.

$$\frac{P}{\left(\frac{1}{R_1} - 1\right)} = \frac{(1 - \alpha) \cdot P}{\left(\frac{1}{R_2} - 1\right)} \quad (22)$$

Eliminando as parcelas relativas às perdas da máquina e isolando a redução percentual α , tem-se a equação que relaciona esta aos dois índices de rendimento, ou seja, a Equação 23 é capaz de mostrar o comportamento dos índices de rendimento, e avaliar qual o padrão usado para a transição de índices.

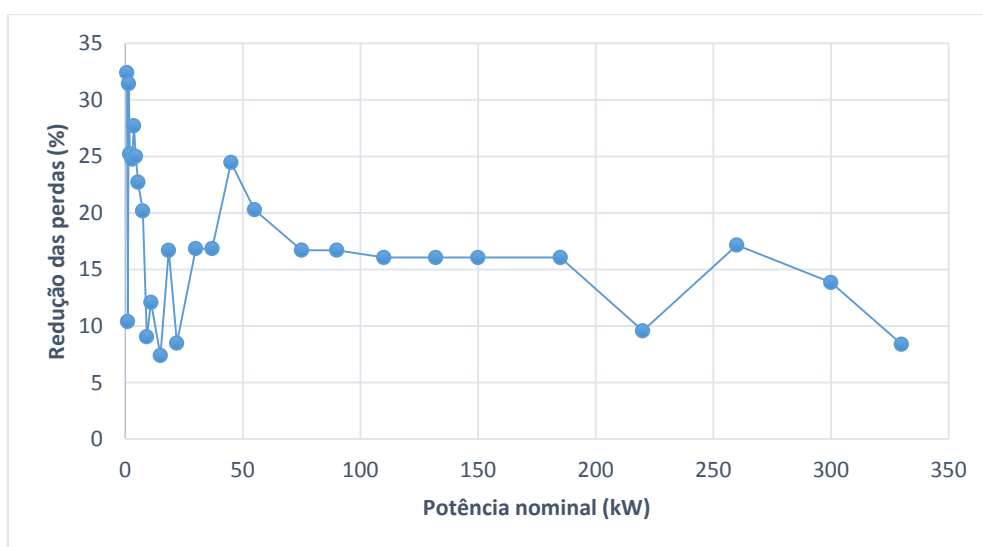
$$\alpha = 1 - \left[\frac{\left(\frac{1}{R_1} - 1\right)}{\left(\frac{1}{R_2} - 1\right)} \right] \quad (23)$$

A Equação 23 foi aplicada na avaliação da diminuição percentual de perdas para os motores dependendo de sua potência nominal e número de polos. Como o foco do presente trabalho é avaliar somente a viabilidade de um novo índice para motores na faixa de 1 a 10 cv (0,75 a 7,5 kW), este foi o grupo utilizado na avaliação destas perdas.

As potências nominais de motores em análise foram de 1 cv a 10 cv, porém o estudo começou com uma avaliação da redução de perdas de trabalho em toda a faixa considerada pelas tabelas normatizadas no Brasil pela ABNT. Na tabela do índice IR3 novas faixas de potência foram introduzidas, os valores menores que 1 cv e maiores que 350 cv (já existia

normalização em IR2, porém não considerava números de polos), impossibilitando uma análise para estas faixas. A primeira análise foi feita com o intuito de encontrar algum padrão de comportamento nestas mudanças de índices de rendimento, e comparar o comportamento da faixa adotada (1 cv a 10 cv) em relação a faixa total de trabalho, considerando que todas essas análises são feitas para as quantidades de polos disponíveis (2, 4, 6 e 8). A Figura 8 foi utilizado para análise do comportamento da diminuição de perdas para os motores de 6 pólos na transição IR1 – IR2.

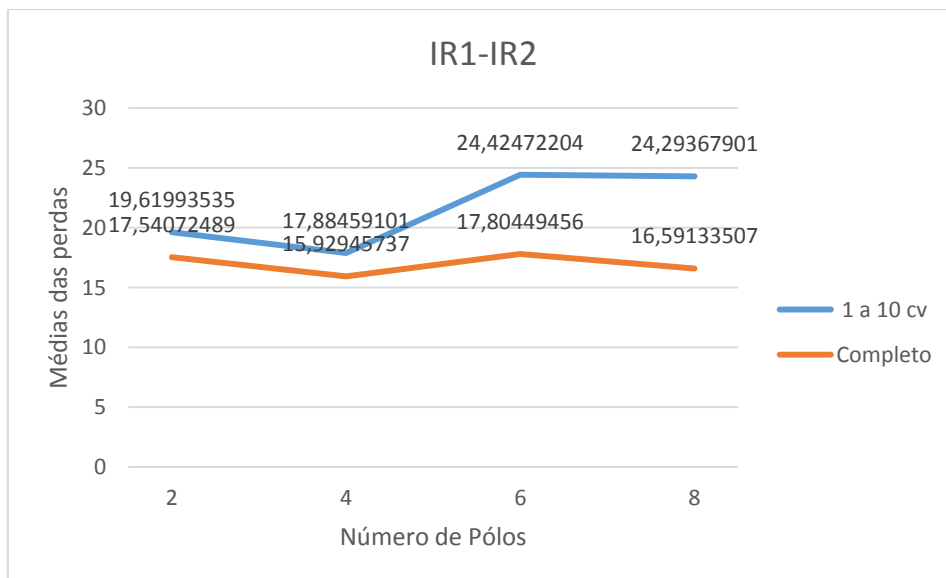
Figura 7 – Comportamento das reduções percentuais nas perdas para a transição IR1-IR2 dos motores seis polos



Fonte: Autoria própria (2019)

Gráficos com o mesmo teor foram feitos para os motores de 1 a 10 cv para que uma análise comparativa fosse feita. Estes gráficos podem ser vistos no Apêndice A. Na procura de alguma característica que desse a esta faixa de potência, indícios para ser usada como faixa representativa de todo o grupo, uma comparação de comportamento das reduções percentuais médias foi realizada, e a Figura 9 foi utilizado neste propósito.

Figura 8 – Comparação do percentual de perdas na faixa de 1 a 10 cv e em toda faixa prevista por norma.

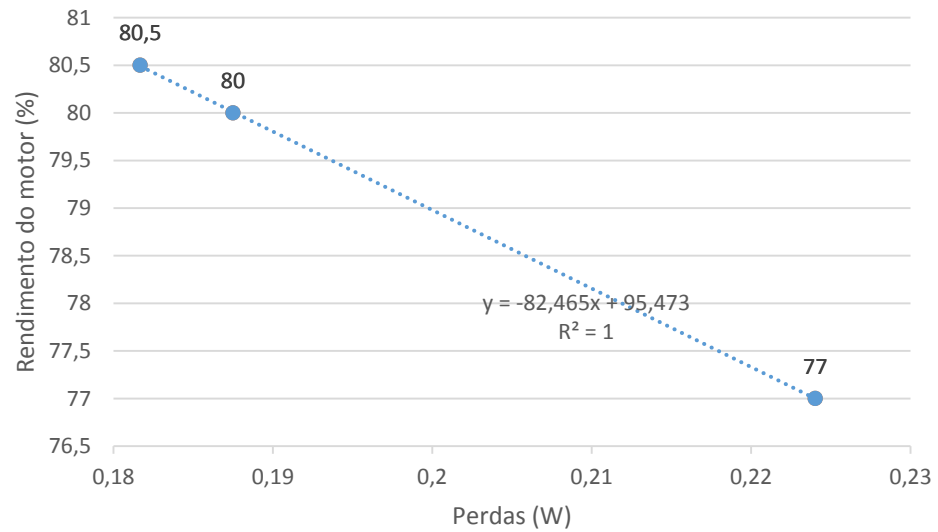


Fonte: Autoria própria (2019)

Os índices seguem um padrão de redução de perdas entre eles, considerando que o objetivo das normas ABNT, os tornando obrigatórios, é justamente aumentar a economia energética. O início deste processo foi utilizar a Equação 23 para encontrar os valores destas diminuições percentuais de perdas e assim tabelas para as transições IR1-IR2 e IR2-IR3 foram construídas.

Para estimar os novos valores, foi utilizada a afirmação de que os motores dependem do avanço das tecnologias de formas de produção, utilização de materiais, e isso torna mais difícil manter viáveis grandes reduções de rendimento com o passar do tempo. Aliada a esta afirmação alguns gráficos foram construídos, para mostrar que existe essa diminuição na maioria das reduções de perdas entre as transições de MEPS. A Figura 10 mostra a relação “rendimento x perdas”, em Watts, para motores de 1 cv e dois polos, denotando o comportamento discutido da redução de perdas, no qual a transição IR1 para IR2 tem uma diminuição percentual de aproximadamente 16,3%, enquanto a transição IR2 para IR3 tem um valor de 3,1%.

Figura 9– Relação entre rendimento e perdas para motores 1cv, dois pólos.



Fonte: Autoria própria (2019)

A partir da avaliação das reduções percentuais foram linearizadas estas transições, para que fosse replicada na transição de IR3 para IR4. No Apêndice B encontram-se as figuras utilizadas para os outros motores analisados. A manipulação tomada para os dados foi a de considerar o valor menor entre as duas mudanças de MEPS para sua utilização na transição atual IR3 – IR4. Vê-se na Tabela 1 cada valor adotado.

Tabela 1 – Valores de redução percentual de perdas para a transição IR3 – IR4

Potência Nominal		Redução percentual de perdas (%) (α)			
kW	CV	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0,75	1	3,10559	14,11632	15,15152	16,80672
1,1	1,5	10,20408	14,60707	10,38961	8,307948
1,5	2	14,17686	16,08752	23,80143	10,20408
2,2	3	11,56069	13,84083	25,21715	10,96491
3	4	16,80672	20,51984	24,7678	14,91702
3,7	5	9,039548	17,87709	17,87709	7,972892
4,4	6	4,708098	9,715812	17,87709	7,972892
5,5	7,5	9,715812	15,69859	22,72727	7,972892
7,5	10	7,390983	17,87709	20,17756	9,715812

Fonte: autoria própria (2019)

Com os valores de redução de perdas entre os índices, o único dado necessário são as perdas em kW, oriundas dos motores com índice de rendimento IR3. Estas foram calculadas a partir da Equação 24, na qual P_{nom} representa a potência nominal do motor.

$$P = \frac{P_{nom}(1 - \eta)}{\eta} \quad (24)$$

Utilizando-se de P , em kW, e a taxa α , os valores de perdas para o índice IR4 foram calculados a partir da equação 25, na qual os valores de redução percentual utilizados são os dados pela Tabela 1.

$$P_{IR4} = P_{IR3} \cdot (1 - \alpha)/100 \quad (25)$$

Assim, é possível calcular os rendimentos do novo índice IR4 a partir da equação 17.

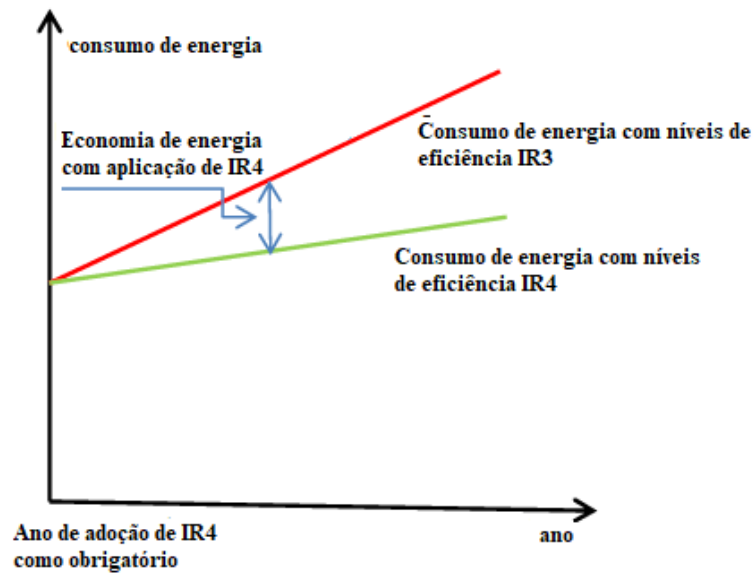
3.1.1 Interpretação do índice α

Utilizou-se a Equação 23 para calcular a diminuição percentual de perdas entre as transições de índices mínimos de rendimento. O valor obtido representa o quanto que a diferença entre as perdas para motores com a mesma potência enquadrados em dois índices de rendimentos consecutivos é relevante em relação ao índice menor. Isto significa dizer que para uma dada potência, tem-se um motor classificado como IR2 com 2 kW de perdas e um classificado como IR3 com 1kW de perdas e, portanto, uma diminuição de 1 kW na transição entre índices. 1 kW de diminuição representa 50% do valor inicial, ou seja, para este caso o valor de α seria 0,5.

3.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ATRAVÉS DA ECONOMIA DE ENERGIA

Com a tabela IR4 montada, a primeira etapa do trabalho foi finalizada sendo que o próximo passo consiste em calcular a viabilidade desta troca de índices em relação à economia de energia feita ano a ano até 2030. Este ano foi o adotado, pois é o ano de referência para as pesquisas feitas pelo Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030). O teste feito consistiu em calcular o consumo dos motores instalados a partir do ano de adoção do IR4, assim, a partir do ano de referência até 2030, o consumo foi calculado separadamente para o caso de motores vendidos a partir de tal ano ser apenas IR3 ou IR4. A Figura 11 mostra um modelo do gráfico montado para cálculo da economia energética anual, sendo esta calculada ponto a ponto pela diferença entre o consumo nas duas situações apresentadas.

Figura 10– Gráfico do consumo de energia por ano dos motores IR3 e IR4



Fonte: Adaptado de Soares (2013)

A metodologia de trabalho para avaliação de consumo foi desenvolvida pela Procel, vinculada a Eletrobrás aliada a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e utilizada por Soares (2013). A Equação 26 é definida para cálculo do consumo dos motores da faixa j a cada ano de aplicação i , no qual Ce representa o consumo médio unitário da faixa em um dado ano, enquanto V representa as vendas desta mesma faixa neste mesmo ano.

$$CP_k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Ce_{ji} * V_{ji} \quad (26)$$

onde CP é o consumo médio total.

Considerando que apenas uma faixa de potência foi trabalhada, o somatório para as faixas j some, esta subdivisão foi substituída por quantidade de pólos, representado pelo subscrito p . simplificando a Equação 26 em apenas um somatório considerando os anos de aplicação, assim como mostrado na Equação 27, consumo médio em dado ano para a faixa e 1 cv a 10 cv.

$$CP_k = \sum_{p=1}^8 \sum_{i=1}^n Ce_{pi} * V_{pi} \quad (27)$$

O cálculo do consumo médio por ano e por faixa também é dado por Soares (2013) e está denotado na Equação 28, na qual os subscritos j e i são usados com a mesma finalidade da equação anterior.

$$Ce_{ji} = \frac{0,736 \cdot Pot_j \cdot T_j \cdot FD_{ji} \cdot FC_j}{\eta_j \cdot FR_j} \quad (28)$$

O subscrito j mais uma vez será desconsiderado, já que o cálculo será feito para uma única faixa de potência (1 cv a 10 cv), sendo substituído pelo número de polos da faixa (p). Na equação, Pot_j representa a potência média da faixa, T são as horas trabalhadas por ano, FD é o fator de depreciação, FC é o fator de carregamento, η representa a eficiência média e FR representa o fator de eficiência. Todos esses valores são calculados para a faixa de potência em estudo. A Equação 29 mostra a simplificação descrita para o consumo médio da faixa para determinado número de pólos, Ce_{pi} .

$$Ce_{pi} = \frac{0,736 * Pot_p * T_p * FD_{pi} * FC_p}{\eta_p * FR_p} \quad (29)$$

Para cálculo do consumo total da faixa de motores estudada, são necessários dois dados, o consumo unitário e as vendas por ano i , portanto esta etapa do trabalho foi subdividida no estudo desses dois fatores.

Nenhum arquivo atual de vendas de motores de indução trifásico esteve disponível no desenvolvimento deste estudo e a informação mais precisa e de fonte confiável disponível está contida na Tabela 2, na qual se tem as vendas dos anos 2006 até 2009 dos motores de diferentes faixas de potência.

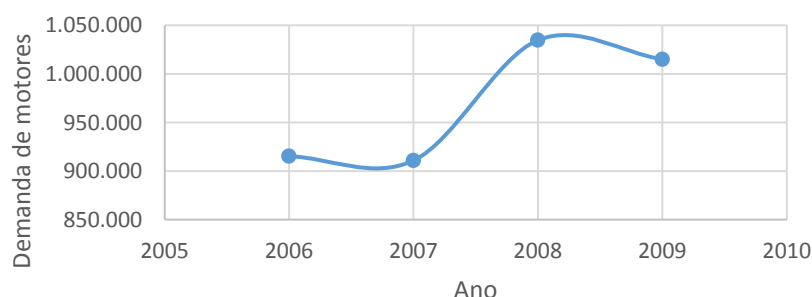
Tabela 2– Vendas de motores elétricos no Brasil

Faixa (cv)	2006	2007	2008	2009
1 a 10	915.329	910.902	1.034.762	1.015.076
10 a 40	182.306	188.442	233.083	253.769
10 a 100	37.858	42.305	55.408	56.346
100 a 250	14.695	16.923	20.030	20.134
Total	1.150.188	1.158.572	1.343.283	1.345.325

Fonte: (ABINEE, 2010, APUD CARDOSO, 2012)

Considerando a falta de dados atuais, o caminho adotado foi o de previsão da demanda para os anos adiante até 2030. Segundo Tersandro (2017) no ano de 2013, a população de motores seria de 16,5 milhões, o que dá uma base de comparação e autenticação da estimativa feita. A montagem de forma gráfica dos valores de demanda obtidos foi necessária para a avaliação do comportamento dos dados, pois a escolha da técnica de previsão de demanda depende do mesmo. A Figura 12 mostra os dados de interesse da Tabela 2 dispostos graficamente.

Figura 11 – Comportamento da demanda de vendas dos motores de 1 a 10 cv entre os anos de 2006 e 2009



Fonte: Autoria própria (2019)

O comportamento gráfico dos dados de demanda foi tomado como uma sazonalidade adicionada de tendência, ou seja, um comportamento cíclico e crescente. Em relação ao comportamento sazonal (cíclico), uma série ou ciclo engloba apenas dois períodos (anos), já que depois de dois anos o comportamento da demanda começa a se repetir. Tendo valores para 4 períodos em posse, apenas dois ciclos puderam ser utilizados na previsão. Enquanto isto, o comportamento de tendência se mostra através do aumento de demanda entre valores dos períodos equivalentes em cada ciclo. Nenhuma pesquisa detalhada sobre as causas desse comportamento sazonal tendencial foi feita, já que não é o foco deste trabalho, e apenas a concordância da previsão com os valores dados por Tersandro (2017) serviu de base de validação para o resultado final. O resultado final da aplicação da metodologia para previsão de demanda, com sazonalidade e tendência, está mostrado na Figura 13, que compreende os anos de 2010 até 2017.

Figura 12- Previsão de demanda de venda de motores 1 cv a 10 cv



Fonte: autoria própria (2019)

A confirmação dos valores estimados se deu a partir da comparação com os 16,5 milhões de população, mas antes de qualquer análise, este valor teve que ser estratificado para as faixas de potência. Segundo Andrade e Pontes (2017), o Brasil utiliza em grande número motores de 1 cv a 10 cv, representando entre 42% e 54% do estoque dos motores do país. Utilizando-se 54% como valor de referência, 8,91 milhões será a população estimada de motores de 1 cv a 10 cv em 2013. O somatório das demandas de 2006 até 2009 com as estimativas até 2013 foi obtido um valor para população de 8,65 milhões de motores, que é um resultado próximo à referência com um erro de aproximadamente 3%. Este erro pode ter sido causado pela população anterior a 2006, a qual não se obteve informação, além da constante troca de motores, seja por avarias ou fim da sua vida útil. Na Equação 29 o rendimento médio é calculado para a faixa de potência e não para quantidade de polos, mas com a modificação, o rendimento médio e, portanto, o consumo médio unitário iria considerar cada número de pólos. Para que esta modificação ficasse completa, as vendas foram também subdivididas e a Tabela 3 mostra a distribuição para os EUA e para a União Europeia, das quais foram utilizadas de base para calcular um possível comportamento no Brasil. O comportamento de cada faixa de número de pólos é semelhante entre as regiões: apenas motores de 2 polos tem uma discrepância, logo, o cálculo foi diferente para esta faixa. Para os motores de 4, 6 e 8 polos a estimativa foi feita a partir da média entre os valores intermediários das faixas de cada região. Com as contribuições de todos os outros motores calculados, os MIT de dois polos representam a parcela restante para completar a população percentual total.

Tabela 3– Divisão da população de motores por número de pólos

Região	2 pólos	4 pólos	6 pólos	8 pólos
Brasil	N/A	N/A	N/A	N/A
União Europeia	15% - 35%	50% - 70%	7% - 15%	1% - 7%
EUA	7% - 8%	60% - 70%	12% - 16%	2% - 3%

Fonte: Andrade e Pontes (2017)

Com os valores de venda e população em 2013, dividiu-se a população de motores em quantidade fixa anterior a este ano e acumulado de vendas a partir do ano. Esta primeira representa o número de motores que estavam em circulação antes do ano de 2013, calculado a partir da diferença da população de 8,91 milhões em relação aos 1,24 milhões de motores que foram estimados para serem vendidos no mesmo ano. De acordo com Soares (2013), o crescimento de vendas por ano aconteceu a uma taxa de 4,1% ao ano e de acordo com o possível cenário de crescimento de consumo de energia elétrica. Foi utilizada a Equação 30 para cálculo das vendas em função do ano, e o número 1.242.500 representa as vendas do ano de 2013, no qual a taxa de 4,1% começa a ser considerada. O subscrito a representa o ano em questão, sendo 2013 o ano “0”, e B_a é o número de vendas de motores por ano a partir de 2013.

$$B_a = 1242500.1,041^a \quad (30)$$

Para o cálculo do consumo dos motores ano a ano foi considerando o estoque total de motores disponíveis, já que mesmo os motores vendidos em anos anteriores também irão consumir energia nos anos subsequentes. A Tabela 4 mostra os valores utilizados de estoque total, sendo este subdividido nas parcelas fixo e vendas totais.

No cálculo do consumo médio unitário alguns fatores entram em jogo, sendo o mais simples deles a potência média da faixa que é 5 cv ou 3,7 kW. Outro fator é o rendimento médio da faixa subdividido para cada uma das quantidades de pólos, sendo que os valores utilizados para fazer as médias estão contidos na Tabela 5, a qual reúne os valores dados pelo Ministério de Minas e Energia et al. (2017) e os valores estimados de IR4. Os valores de IR3 têm algumas modificações dos rendimentos para tipos de carcaça específicos, sendo essas modificações casos especiais que não foram considerados nas avaliações feitas no presente estudo.

Tabela 4– Estoque de motores elétricos de indução por ano

Ano	A (Parcela Fixa)	B _a (vendidos no ano)	B (total de vendidos)	Total (em estoque)
2013	7667499,75	1242500,25	1242500,25	8910000
2014	7667499,75	1293442,76	2535943,01	10203442,76
2015	7667499,75	1346473,91	3882416,92	11549916,67
2016	7667499,75	1401679,34	5284096,27	12951596,02
2017	7667499,75	1459148,20	6743244,46	14410744,21
2018	7667499,75	1518973,27	8262217,74	15929717,49
2019	7667499,75	1581251,18	9843468,91	17510968,66
2020	7667499,75	1646082,48	11489551,39	19157051,14
2021	7667499,75	1713571,86	13203123,25	20870623,00
2022	7667499,75	1783828,30	14986951,55	22654451,30
2023	7667499,75	1856965,26	16843916,81	24511416,56
2024	7667499,75	1933100,84	18777017,65	26444517,40
2025	7667499,75	2012357,97	20789375,63	28456875,38
2026	7667499,75	2094864,65	22884240,28	30551740,03
2027	7667499,75	2180754,10	25064994,38	32732494,13
2028	7667499,75	2270165,02	27335159,40	35002659,15
2029	7667499,75	2363241,79	29698401,18	37365900,93
2030	7667499,75	2460134,70	32158535,88	39826035,63

Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 5– Índices Mínimos de rendimentos IR3 e IR4 usados para cálculo

Potência nominal		IR4				IR3			
kW	cv	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0,75	1	81,0	85,0	84,7	78,7	80,5	83,0	82,5	75,5
1,1	1,5	85,4	86,0	86,8	79,9	84,0	84,0	85,5	78,5
1,5	2	87,3	88,4	89,4	85,4	85,5	86,5	86,5	84,0
2,2	3	87,9	89,0	89,9	86,9	86,5	87,5	87,0	85,5
3	4	90,2	91,5	91,9	88,3	88,5	89,5	89,5	86,5
3,7	5	89,4	91,2	91,2	87,4	88,5	89,5	89,5	86,5
4,4	6	89,0	90,4	91,2	87,4	88,5	89,5	89,5	86,5
5,5	7,5	90,4	92,3	92,9	87,4	89,5	91,0	91,0	86,5
7,5	10	90,9	93,1	92,7	90,4	90,2	91,7	91,0	89,5

Fonte: Adaptado de Ministério de Minas e Energia et al. (2017)

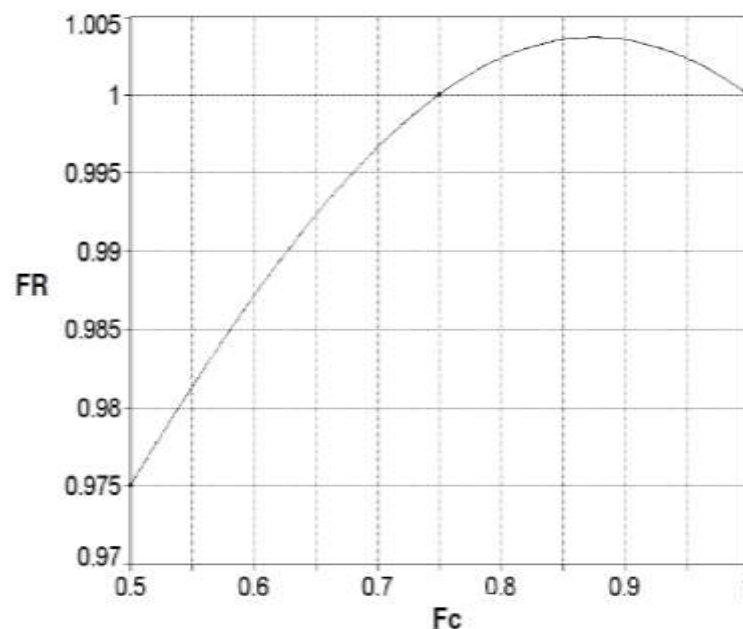
Para o tempo de utilização dos motores elétricos (T) foi considerado o que determina Cardoso (2012), que tomou 800 horas/ano como o T para a faixa de potência de 1 cv a 10 cv, sendo este valor baseado em pesquisa da empresa WEG, a qual comercializa estes motores no

Brasil. Este valor é também utilizado por Soares (2013), dando uma maior credibilidade ao valor adotado.

O fator de carregamento (FC) diz respeito à taxa de uso do carregamento do motor e, assim como todos os outros fatores no cálculo do consumo médio unitário, são relacionados à faixa de potência em estudo. O valor utilizado é de 55%, e este é também dado por Cardoso (2012) que diz que os dados são resultados de pesquisa feita em amostras de motores brasileiros pelas entidades PPE/COPPE/UFRJ em 2009, utilizando o software BD MOTOR como base de dados. Este valor adotado quer dizer que para os motores de 1 cv a 10 cv em uso no Brasil, em média, 55% do seu carregamento nominal é utilizado.

Outro índice utilizado foi o fator de eficiência (FR), que segundo Cardoso (2012) é uma relação de diminuição de eficiência do motor para a o carregamento no qual o motor trabalha em relação ao rendimento para o carregamento nominal. Isto quer dizer que o fator de eficiência é como uma correção no rendimento nominal do motor, pois esta varia caso o carregamento nominal do motor não é totalmente utilizado. O Comportamento de FR em relação ao FC é mostrado na Figura 14, e a partir desta pode-se desprender que com um carregamento de 55% o fator adequado é igual a aproximadamente 98,20%.

Figura 13– Fator de Eficiência para motores de 1 a 10 cv

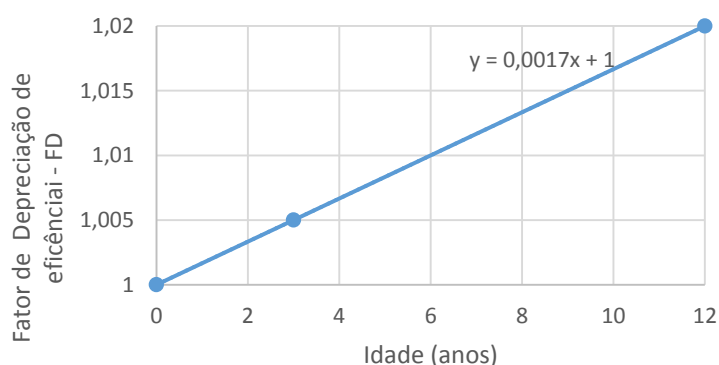


Fonte: Cardoso (2012)

Por meio de dados apresentados por Rise (1997, APUD CARDOSO, 2012), os motores elétricos chegam a perder no máximo 2% de sua eficiência ao longo do seu tempo de

vida, e isso se dá devido às partidas e paradas seguidas. Exatamente, pela existência destas perdas, o cálculo do consumo de um motor necessita do Fator de Depreciação do rendimento (*FD*), o qual, assim como o *FR*, funciona como uma correção no rendimento, só que desta vez se refere ao desgaste que ocorre passado certo tempo de operação do motor. A Figura 15 mostra como se comporta o *FD*.

Figura 14– Fator de depreciação de acordo com a idade do motor



Fonte: Cardoso (2012)

Com todos os fatores necessários contemplados, o próximo passo foi o cálculo do consumo para a posterior comparação e cálculo da economia ano a ano. A situação hipotética considerada foi a de que o Brasil já tem os motores IR3 devidamente regulamentados, e sem nenhum motor IR2 circulando no mercado ou sendo fabricado. Dito isto, considerou-se a regulamentação do novo índice IR4 como tendo início nos anos de 2019 até 2023, para que pudesse ser mensurada a diminuição de economia de energia a cada ano perdido de fixação do novo índice. Outro quesito considerado na suposição feita foi o de que o prazo máximo para que o fim da circulação do IR3 seria de um ano, ou seja, uma implantação no ano de 2019 significa que em 2020 exclusivamente os motores IR4 serão comercializados. O resultado final dependia da comparação de duas situações, uma na qual os motores IR3 continuariam sendo exclusivamente vendidos e a outra com apenas motores IR4 sendo vendidos a partir do ano de adoção. Uma consideração também importante é a de que os motores IR4 consumiriam juntamente a população estagnada dos IR3 vendidos até o ano de adoção. Para o cálculo do consumo médio unitário dos motores IR3 foram utilizados valores que estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Fatores para cálculo do consumo médio unitário dos motores IR3

Polos	Faixa de potência (CV)	POT (CV)	T (horas de operação/ano)	FC (Fator de carregamento)	η (rendimento)	FR (fator de eficiência)
2	1 - 10	5	800	55%	86,86%	98,20%
4	1 - 10	5	800	55%	88,66%	98,20%
6	1 - 10	5	800	55%	88,72%	98,20%
8	1 - 10	5	800	55%	84,33%	98,20%

Fonte: autoria própria (2019)

Utilizando-se das Equações 29 e 30 e dos valores das Tabelas 4 e 6 foi calculado o valor do consumo total dos motores de indução trifásico IR3, sendo que a cada ano o valor de consumo foi calculado sobre a população inteira de motores. O que não foi considerado no valor da população de motores foi a quantidade destes que chegam ao fim de sua vida útil, que segundo Soares (2013), para os motores de 1 cv a 10 cv, é de 13 anos. A maioria dos fatores utilizados no cálculo é constante em relação ao ano, ou seja, o que faz com que o consumo total aumente para cada conjunto de motores com número de pólos diferentes é o fator de depreciação e a quantidade de motores em circulação. O cálculo de consumo total consistiu em quantificar o consumo médio unitário, que é diferente para cada quantidade de pólos, utilizando o fator de depreciação de acordo com o ano, por exemplo, no ano 1 (implantação) *FD* é igual a 1. Já nesta primeira etapa do cálculo as duas situações hipotéticas se diferenciam, pois, o rendimento dos motores IR4 são maiores, logo o consumo unitário diminuirá. A Tabela 7 mostra os valores usados no cálculo para os motores que estão dentro deste outro índice.

Tabela 7- Fatores para cálculo do consumo médio unitário dos motores IR4

Polos	Faixa de potência (CV)	POT (CV)	T (horas de operação/ano)	FC (Fator de carregamento)	N (rendimento)	FR (fator de eficiência)
2	1 - 10	5	800	55%	87,94%	98,20%
4	1 - 10	5	800	55%	89,67%	98,20%
6	1 - 10	5	800	55%	90,09%	98,20%
8	1 - 10	5	800	55%	85,77%	98,20%

Fonte: autoria própria (2019)

Depois desta etapa o cálculo continua a se diferenciar para os dois casos hipotéticos. Para a situação onde só IR3 será vendido, multiplicou-se o resultado anterior pela quantidade total de motores consumindo naquele ano, o qual também foi subdividido por número de

pólos, com as porcentagens mencionadas de 21,75%, 62,5%, 12,5% e 3,25% para os motores de 2, 4, 6 e 8 polos, respectivamente. Já para a situação de obrigatoriedade do maior índice, um ano depois da implantação, o consumo total é dividido em duas seções. Uma delas consiste em calcular o consumo de uma população estagnada de motores IR3, que terá um aumento anual leve, sendo este decorrente da depreciação do rendimento. A outra seção consiste no consumo dos motores IR4 que terão seu número de motores em operação indicado pela venda de motores um ano após a implantação do novo índice de rendimento e, o somatório do estoque com a quantidade de unidades vendidas para os anos subsequentes. Valores como porcentagens de venda, e quantidade de vendas são comuns a ambos os casos citados, sendo os valores deste último apresentados da Tabela 4.

Depois de calculados os valores de consumo em GWh para os dois casos hipotéticos, a diferença entre os valores calculados para os dois casos leva ao valor da economia de energia esperada. Como a avaliação foi feita para diferentes anos para a adoção, mais de um gráfico de resultado foram gerados para a avaliação final. O último passo da pesquisa foi à produção de um gráfico com a redução percentual da economia de energia a partir da data de regulamentação de IR4, mostrando o quanto se perde de economia (considerando até o ano de 2030) devido ao ato de adiar a implantação do índice (de 1 a 4 anos) sendo 2019 o ano tomado como o padrão de adoção.

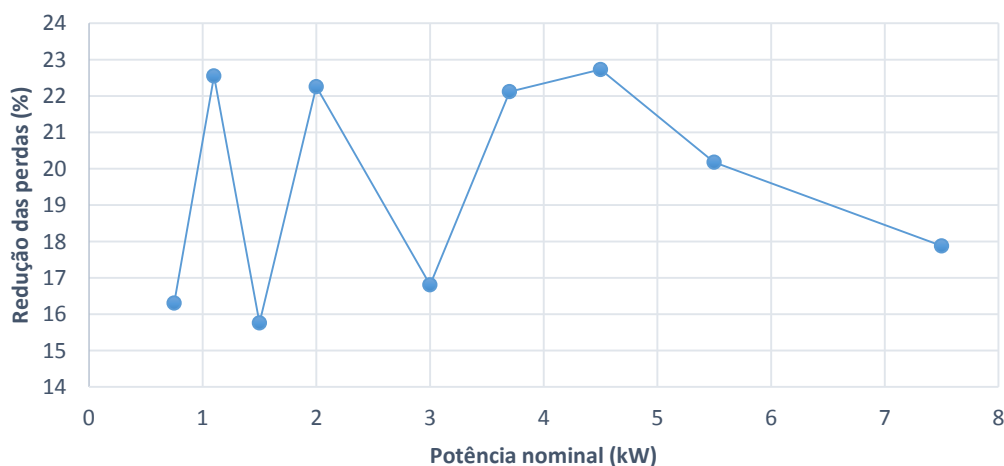
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O foco do presente trabalho é avaliar somente a viabilidade de um novo índice de rendimento mínimo para motores na faixa de 1 a 10 cv (0,75 a 7,5 kW).

4.1 DETERMINAÇÃO DE IR4

Foi necessária também a avaliação de toda a faixa de potência disponível em cada índice, para que pudesse ser feita uma comparação do comportamento dos valores, indicando uma maior ou menor centralização dos valores ao redor de uma média. Para a transição entre os índices IR1 e IR2 tomando-se como exemplo os motores de dois pólos, pode-se observar uma pequena dispersão entre os valores de diminuição de perda dentro da faixa selecionada. Para os motores dois polos o desvio padrão encontrado foi de aproximadamente 2,76, enquanto a média dos valores foi 19,62. A Figura 16 mostra exatamente os valores encontrados de perdas para cada potência.

Figura 15– Redução de perdas entre os índices IR1 e IR2 para motores 2 polos de 1 a 10 CV



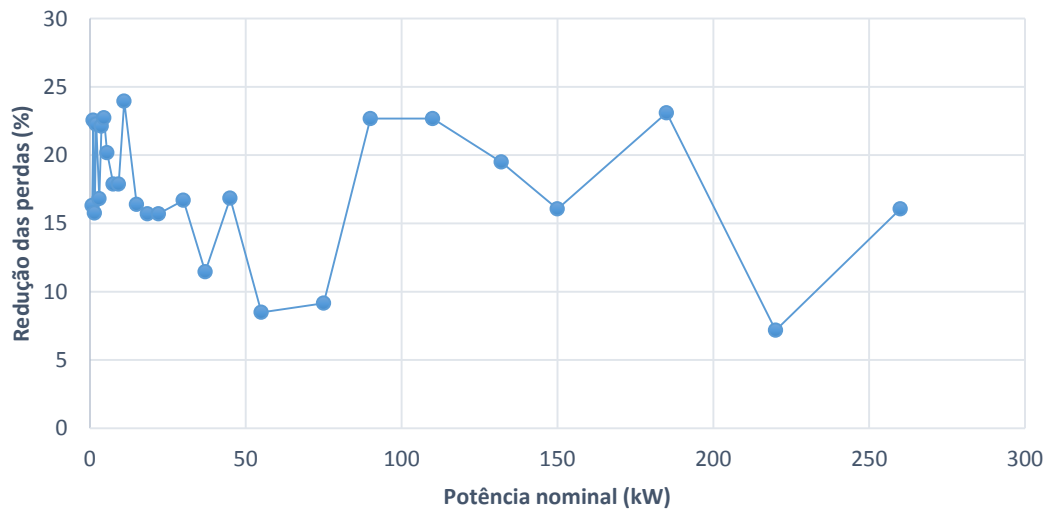
Fonte: Autoria própria (2018)

Considerando a faixa completa de potências regulamentadas a dispersão é bem maior, os valores de média e desvio padrão são respectivamente 17,54 e 4,58. A Figura 17 ilustra a relação potência e perdas para todos os valores existentes em norma.

A mesma análise feita para os motores de dois polos na transição entre os índices IR1 e IR2 foi feita para os motores com 4, 6 e 8 polos. Os valores de média e desvio padrão para estas outras quantidades de pólos, considerando a faixa escolhida, foram respectivamente 17,

88 e 3,27 para 4 polos; 24, 42 e 6,17 para 6 polos e; 24,29 e 7,36 para 8 polos. Já os valores para a faixa completa foram 15,93 e 5,05 para 4 polos; 17,8 e 6,8 para 6 polos e; 16,6 e 7,8 para 8 polos.

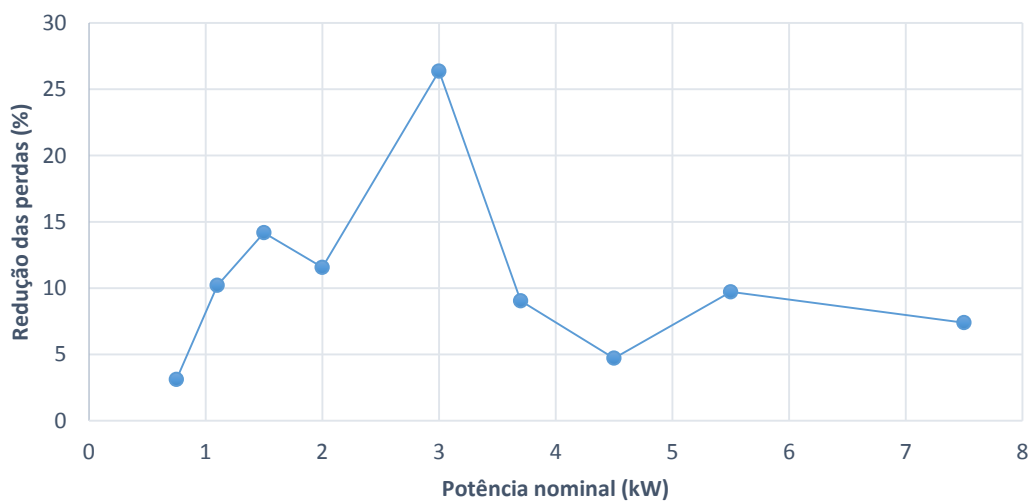
Figura 16– Redução de perdas entre os índices IR1 e IR2 para motores 2 polos



Fonte: Autoria própria (2018)

A próxima análise diz respeito à transição entre os índices IR2 e IR3, tendo sido utilizada a mesma metodologia da primeira avaliação. Para a faixa escolhida, e considerando os motores dois pólos, a média encontrada foi de 10,70 enquanto o desvio padrão foi de 6,38. A Figura 18 mostra a curva característica resultante.

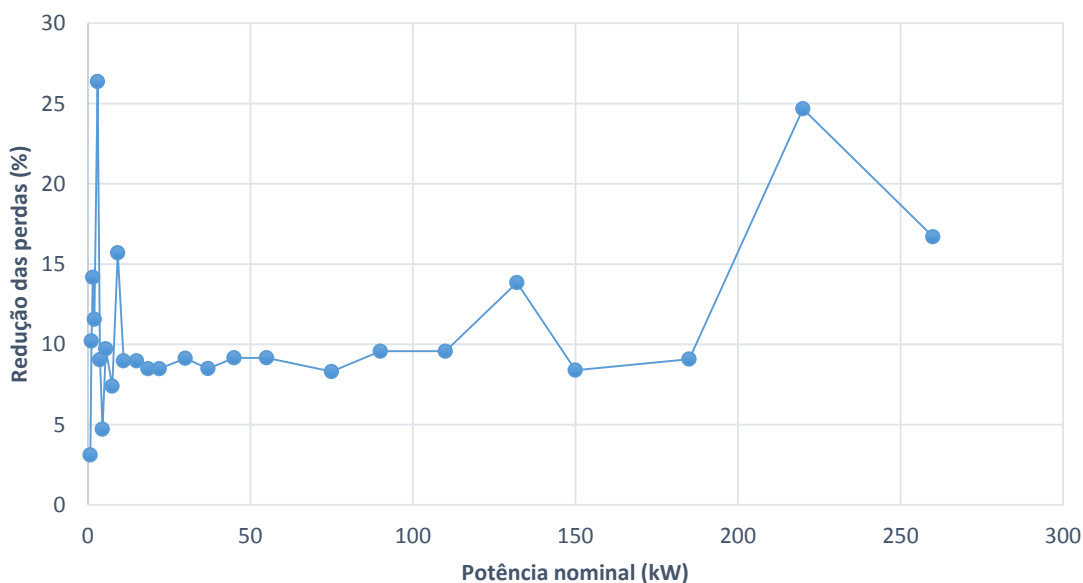
Figura 17– Redução de perdas entre os índices IR2 e IR3 para motores 2 polos de 1 a 10 CV



Fonte: Autoria própria (2018)

Por último tem-se a avaliação da faixa completa de potências da qual se obteve média e desvio padrão de respectivamente 10,88 e 5,1. A Figura 19 mostra a curva característica para a faixa completa.

Figura 18 – Redução de perdas entre os índices IR2 e IR3 para motores 2 polos



Fonte: Autoria própria (2018)

Os valores restantes de média e desvio padrão para os motores de dois pólos na transição entre os índices IR2 e IR3, considerando a faixa escolhida, foram respectivamente 18,08 e 4,80 para 4 polos; 25,54 e 8,26 para 6 polos e; 11,37 e 5,03 para 8 polos. Já os valores para a faixa completa foram: 18,72 e 4,77 para 4 polos; 19,05 e 7,39 para 6 polos e; 9,84 e 5,04 para 8 polos.

Quando comparada as médias das duas transições para a faixa escolhida, percebe-se que a redução sobre as perdas baixou (no caso dos motores de 2 e 8 polos) ou se manteve próximo (no caso dos motores de 4 e 6 polos) da primeira transição (de IR1 para IR2) para a segunda (de IR2 para IR3). Diminuir perdas significa melhorar a tecnologia dos motores e, as vezes, uma redução nas perdas muito baixa pode fazer com que a economia de energia ao longo da vida do motor não pague pelo custo de investimento inicial. Para determinação do “comportamento médio” das perdas em kW, construiu-se a Tabela 8, a qual mostra a avaliação das transições, onde “redução” significa que o valor das perdas em Watts segue a

regra de diminuir da primeira para a segunda transição, enquanto “aumento” denota a situação oposta.

Tabela 8 – Comportamento da Perda percentual entre transições

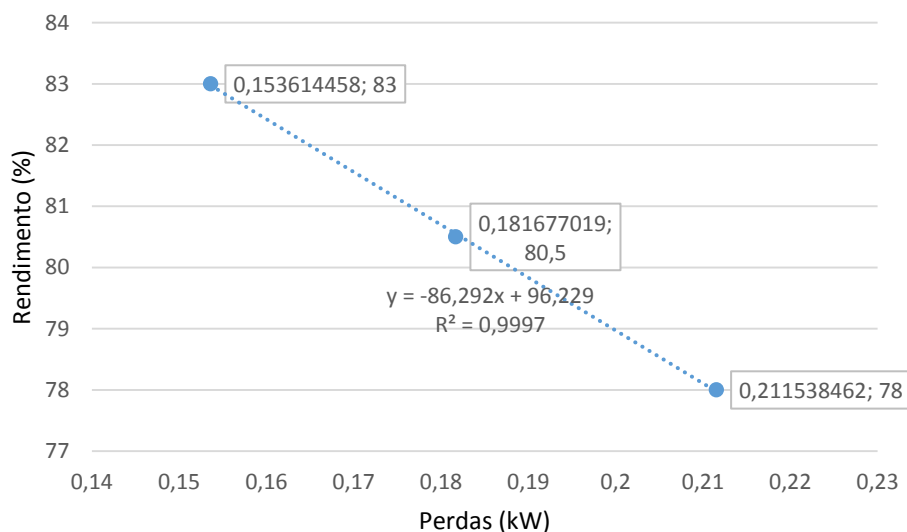
Potência Nominal		Números de polos			
kW	Cv	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos
0,75	1	Redução	Aumento	Redução	Aumento
1,1	1,5	Redução	Aumento	Aumento	Redução
1,5	2	Redução	Aumento	Redução	Redução
2,2	3	Redução	Aumento	Aumento	Redução
3	4	Aumento	Aumento	Aumento	Redução
3,7	5	Redução	Redução	Redução	Redução
4,4	6	Redução	Redução	Redução	Redução
5,5	7,5	Redução	Redução	Aumento	Redução
7,5	10	Redução	Aumento	Aumento	Redução

Fonte: autoria própria (2019)

Percebe-se uma predominância do comportamento de redução nas perdas entre transições, pois aproximadamente 64% dos casos, dentro do intervalo fechado de 1 cv a 10 cv, segue a regra. Sendo assim, o passo adequado a se tomar para determinar as reduções nas perdas do MIT para a transição IR3 - IR4 foi considerar que estas seguiriam a regra e não seriam maiores que a da transição anterior. Dos índices que não seguem a regra, alguns ainda têm uma redução nas perdas bem próximas para as duas transições, o que só reafirma a predominância do comportamento citado anteriormente: transições entre índices mínimos de rendimento geram reduções nas perdas do MIT cada vez menores. A Figura 20 mostra um exemplo do comportamento citado, o motor usado é o de 1 cv e quatro polos.

A metodologia descrita pela IEC na norma IEC 60034-2-1, para o cálculo dos índices de rendimento mínimo, não foi utilizada no processo feito por este trabalho, logo, fez-se necessário um teste avaliativo sobre os resultados obtidos. O teste consistiu em caracterizar como não anômalo o comportamento dos resultados, comparando estes aos outros índices existentes em relação ao padrão mundial IEC.

Figura 19 – Comportamento dos motores 1 cv 4 polos



Fonte: Autoria própria (2019)

Considerado que existe uma similaridade nos índices IR com os IE formulados pela IEC, a comparação a partir dos erros percentuais foi o método de comparação dos valores IR4 encontrados. Quando analisados os outros índices percebe-se um leve aumento nas eficiências das tabelas nacionais, e isso pode ocorrer pela diferença nas datas de implantação dos índices em cada país. Segundo Brunner e Zurich (2016), enquanto o Brasil só teve seu primeiro índice em 2002, os Estados Unidos já tinham políticas de obrigatoriedade dos índices desde 1997, e já utilizava um equivalente ao IE2.

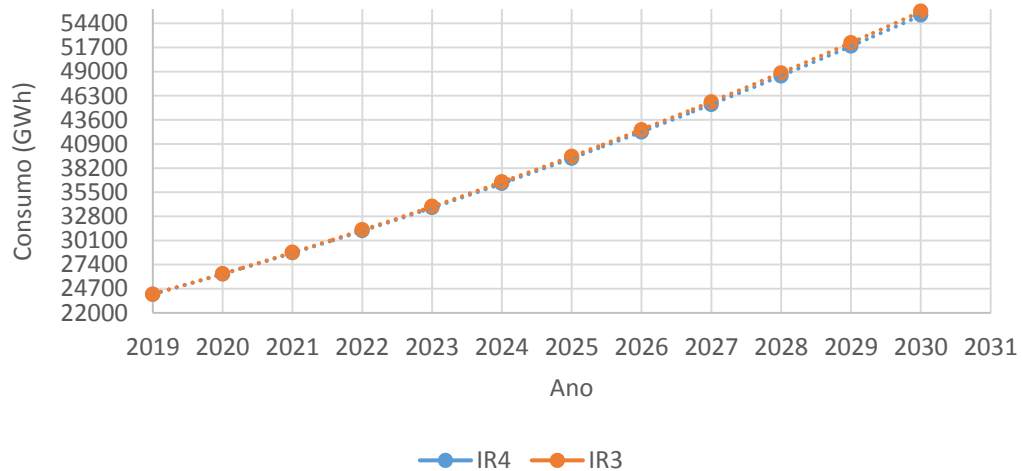
4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ATRAVÉS DA ECONOMIA DE ENERGIA

Outro resultado obtido foi à economia energética para a aplicação dos motores, o qual será analisado separadamente para cada ano de implantação considerado. A Figura 21 mostra a relação consumo por ano para os casos de implantação ou não de IR4 no ano de 2019.

Com os valores da Figura 21, pôde-se calcular uma economia apenas em 2030 de 432 GWh, o que comparando com a meta de 53000 GWh do PNE2030 representa uma contribuição de 0,82%. Isto pode não representar muito, mas deve-se lembrar que a análise feita aqui considera que IR3 já é obrigatório no país, o que não é verdade, então a contribuição dos MEPS para economia deve também considerar a transição atual IR2-IR3, sem falar da única faixa de motores considerada (1 cv a 10 cv). Segundo Soares (2013),

considerando um crescimento de consumo de energia de 4,1% ao ano, em 2030 o consumo de uma residência será de 328 kWh/mês. Menos de 1% pode parecer uma contribuição ínfima para a economia de energia, porém, será capaz de abastecer 109 mil residências por um ano. A economia total feita no final do ano de 2030 será de 2408,82 GWh.

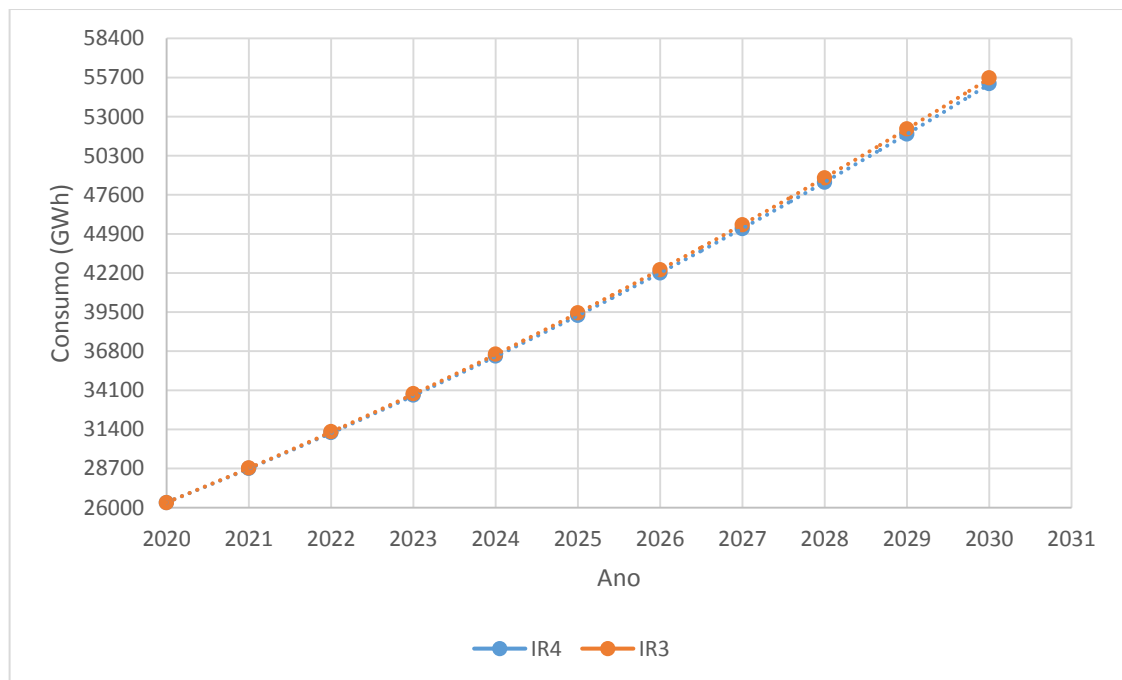
Figura 20– Consumo anual para implantação em 2019.



Fonte: Autoria própria (2019)

Para um cenário no qual o ano de adoção de IR4 seja 2020 foi construído a Figura 22, mostrando o consumo ano a ano para os dois cenários de consumo.

Figura 21 – Consumo anual para implantação em 2020.



Fonte: Autoria própria (2019)

Com 2020 como ano de implantação do índice IR4, os valores de economia em 2030, quanto representa da meta e, a economia total foi respectivamente: 399,74 GWh; 0,75% e; 2057,65 GWh. Com este atraso de um ano, 8 mil casas deixariam de ser abastecidas em relação ao número para a análise anterior, totalizando 101 mil casas abastecidas pela energia economizada.

Para os anos de 2021, 2022 e 2023, o resumo dos dados necessários está contido na Tabela 9, estes são a economia em 2030, a porcentagem da meta, a economia total e a quantidade de casas abastecida por ano pela economia feita.

Tabela 9 – Resumo dos dados importantes para os anos de 2021, 2022 e 2023.

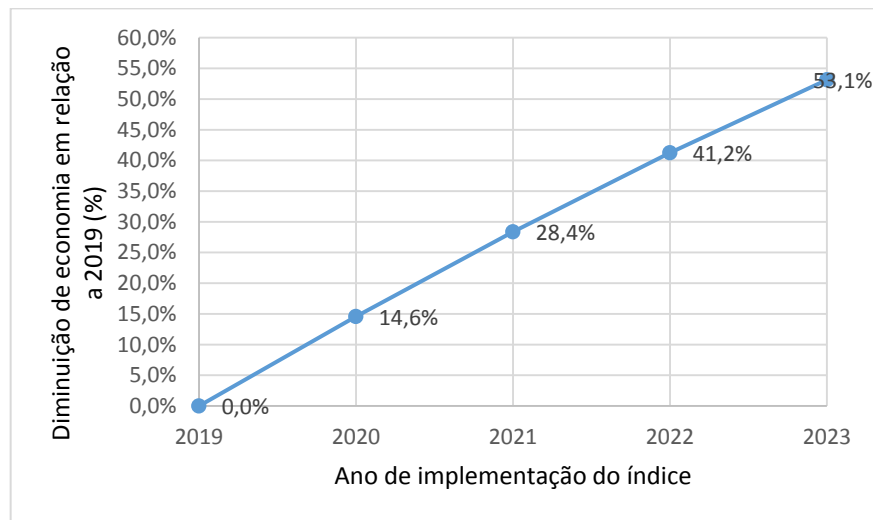
Ano	Economia no ano de 2030 (GWh)	Porcentagem da meta	Economia total (GWh)	Casas abastecidas em um ano
2021	366,06	0,69	1725,89	93.002
2022	331,12	0,62	1415,58	84.126
2023	294,88	0,56	1128,93	74.918

Fonte: Autoria Própria (2019)

4.3 QUEDA DE ECONOMIA POR ANO DE IMPLEMENTAÇÃO

Percebe-se uma leve queda na economia de energia dependendo de quantos anos de atraso na implantação da transição IR3 - IR4, isto em relação ao ano base utilizado, 2019. A Figura 23 mostra exatamente a diminuição percentual da economia de energia em relação ao ano base de análise, denotando-se uma perda de mais da metade da economia para o caso de atraso de 4 anos para a implantação do IR4 no Brasil.

Figura 22 – Redução percentual da economia de energia para a meta em 2030.



Fonte: Autoria própria (2019)

5. CONCLUSÃO

Atualmente o Brasil se encontra defasado em relação a algumas outras regiões do mundo que também adotam os índices mínimos de rendimento de motores de indução trifásicos, já que, enquanto a União Européia (UE) tem o índice IE4 normatizado pela IEC e um dos principais efeitos dos países pertencentes a UE só vão parar de fabricar e comercializar motores IR2 em 2021. A fabricante de motores WEG já tem produtos com a qualidade de Super Premium, ou seja, o atraso não se deve à falta de tecnologia para atendimento das necessidades e sim a aspectos políticos e econômicos da nossa sociedade.

O presente trabalho não levou em consideração a vida dos motores de 1 a 10 cv, que é de 13 anos, já que não se sabia a quantidade da população antes do ano de 2006, ou seja, quando motores desta população atingem o máximo envelhecimento médio. Isto pode ter introduzido um pequeno erro no valor obtido para a economia, já que, os motores IR4 não foram analisados tempo suficiente para chegar ao final de sua vida útil, logo, o valor de consumo para o total de motores IR4 está bem mais próximo de uma situação real do que IR3, que deveria ter uma quantidade de motores subtraída ano a ano.

É imprescindível que seja percebida a necessidade da troca de índices mínimos, já que foi mostrado o grande impacto energético que há no atraso da adoção do IR4 para o mercado brasileiro, reduzindo a economia de energia esperada em até 50% para um atraso de 4 anos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho pode ser utilizado de base para outros estudos na área de índices mínimos de rendimento. A análise do custo benefício da troca dos motores IR3 pelos motores já existentes no mercado que sejam da categoria super premium, é uma das possibilidades, com base na tabela IR4 para motores 60 Hz encontrada no trabalho, e no custo médio dos motores para cada categoria.

Outra possibilidade de trabalho é o desenvolvimento da tabela IR4 para as faixas de potências não analisadas, complementando os resultados encontrados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. T. D.; FERREIRA, F. J. T. E. **Technical and Economical Considerations on SuperPremium motors**. IEEE Transactions on Industry Applications. Anais...2014

ANDRADE, Cássio Tersando de Casto; PONTES, Ricardo Silva Thé. Economic analyses of brazilian policies for energy efficient eletric motors. **Energy Policy**, Fortaleza, v. 106, n. 1, p.315-325, 06 abr. 2017.

ANDRADE, Cássio Tersandro de Castro. **UMA ABORDAGEM DETERMINÍSTICA COM ANÁLISE DE INCERTEZA PARA A VIABILIDADE DE PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: ESTUDO DE CASO DE MOTORES ELÉTRICOS**. 2017. 194 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017

BRASIL. Lei nº 10295, de 17 de outubro de 2001. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm>. Acesso em: 8 set. 2018.

BRUNNER, Conrad U.; ZURICH, Rita Werle. **How International Standards for electric motors support policy of countries using these in their regulations**. 2016. Disponível em: <https://www.iec.ch/perspectives/government/sectors/electric_motors.htm>. Acesso em: 06 maio 2019.

CARDOSO, Rafael Balbino. **Estudo dos impactos energéticos dos Programas Brasileiros de Etiquetagem Energética**: Estudo de caso em refrigeradores de uma porta, condicionadores de ar e motores elétricos. 2012. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

COMISSÃO ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL (Genebra). **Bem vindo a IEC**. 2008. Disponível em: <http://www.iec.ch/about/brochures/pdf/about_iec/welcome_to_the_iec-p.pdf>. Acesso em: 8 set. 2018

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013. 698 p. Tradução de Anatólio Laschuk.

COMISSÃO ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL (Genebra). **IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors**. 2008. Disponível em: <[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/20a5783a8b31d05748257c140019cc05/\\$FILE/TM025+EN+RevC+01-2012_IEC60034-30.lowres.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/c71c66c1f02e6575c125711f004660e6/20a5783a8b31d05748257c140019cc05/$FILE/TM025+EN+RevC+01-2012_IEC60034-30.lowres.pdf)>. Acesso em: 8 set. 2018

EPA. Climate Protection Partnerships- 2014 Report. Enviromental Protection Agency. Washington: 2014

GONÇALVES, P. S.. **Administração de Materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elseiver, 2004.

INMETRO, 2014. . **Histórico do Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<http://www2.inmetro.gov.br/pbe/historico.php>>. Acesso em: 8 set. 2018.

MEYERS, STEPHEN; WILLIAMS, ALISON; CHAN, P. **Energy and Economic Impacts of U.S. Federal Energy and Water Conservation Standards Adopted From 1987 Through 2012**. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. DECERTO Nº 4.508, DE 11 DE DEZEMBRO DE 2002. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/D4508.htm>. Acesso em: 10 ago. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 553, DE 8 DE DEZEMBRO DE 2005. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, seção I, p.98. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias_interministeriais/migracao/Portaria_Interministerial_MMEMCTMDIC_n_553_de_08122005.html>. Acesso em: 10 ago. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 1, DE 29 DE JUNHO DE 2017. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, seção I, p.50. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias_interministeriais/Portaria_Interministerial_MME_MCTIC_MCDIC_n_1_de_29082017.html>. Acesso em: 10 ago. 2018.

MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2ª ed São Paulo: Cengage Learning, 2011.

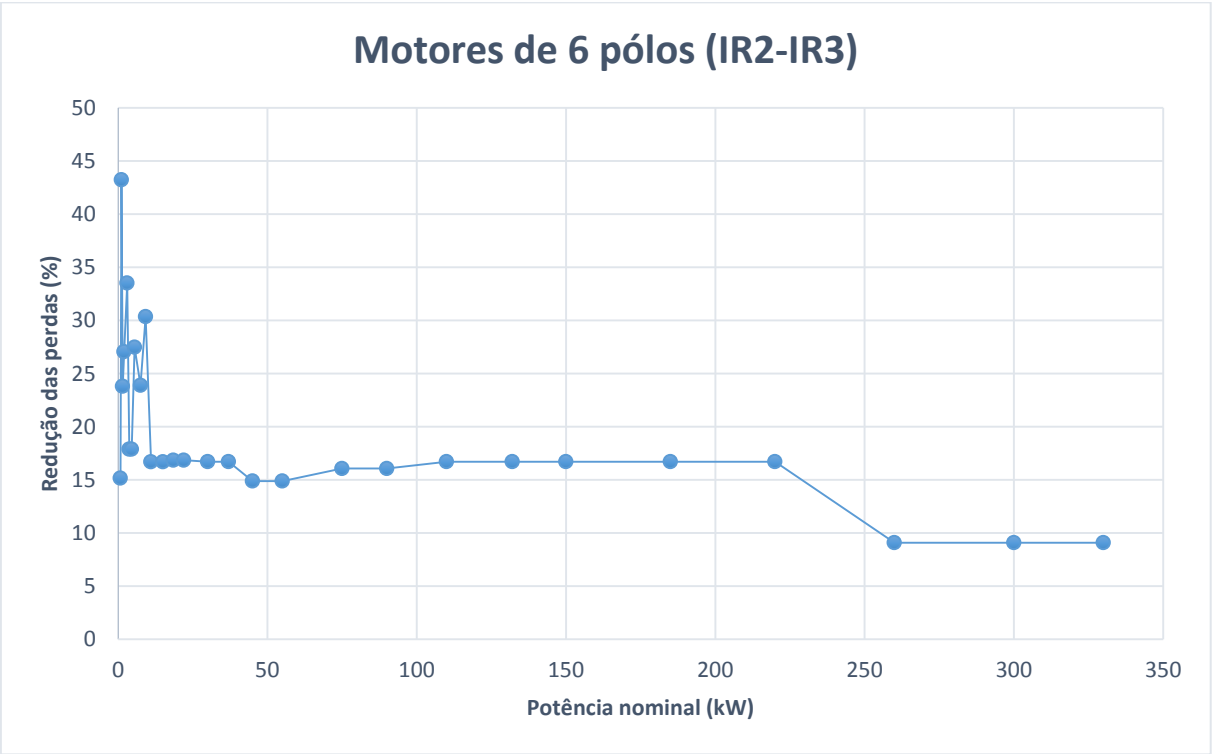
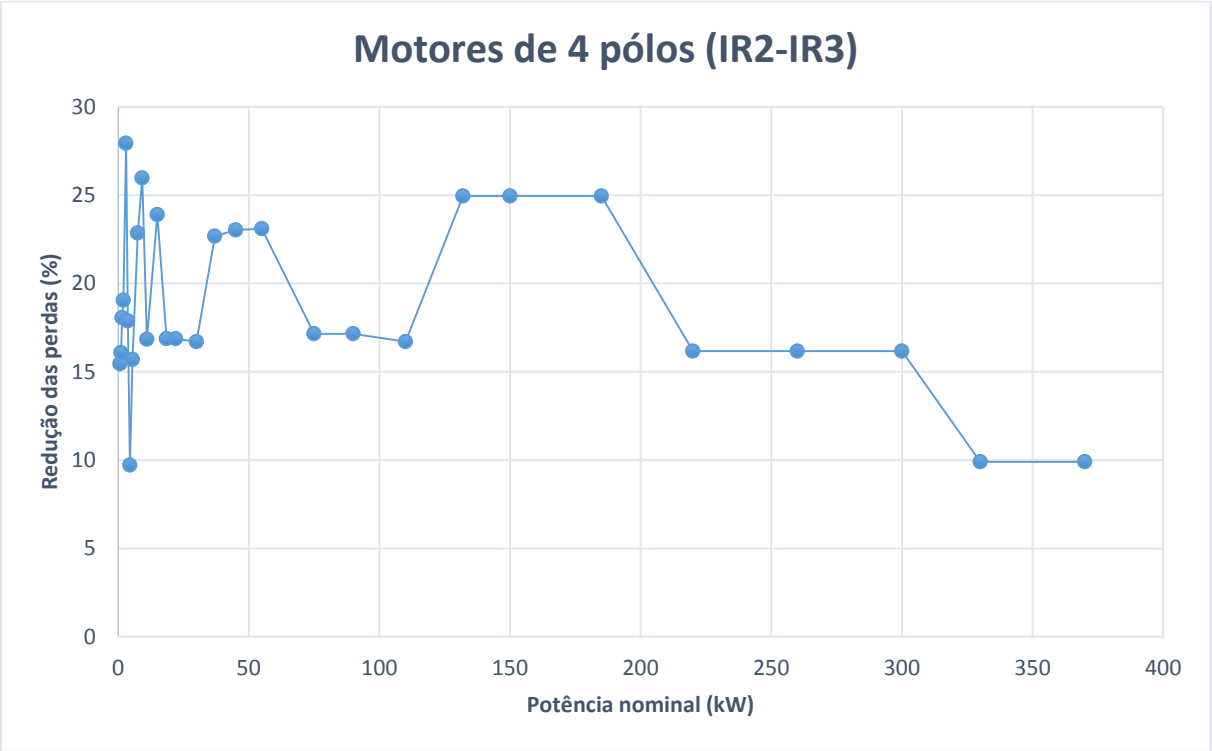
MOREIRA, D. A. **Introdução à Administração da Produção e Operações**. São Paulo: Pioneira, 1998.

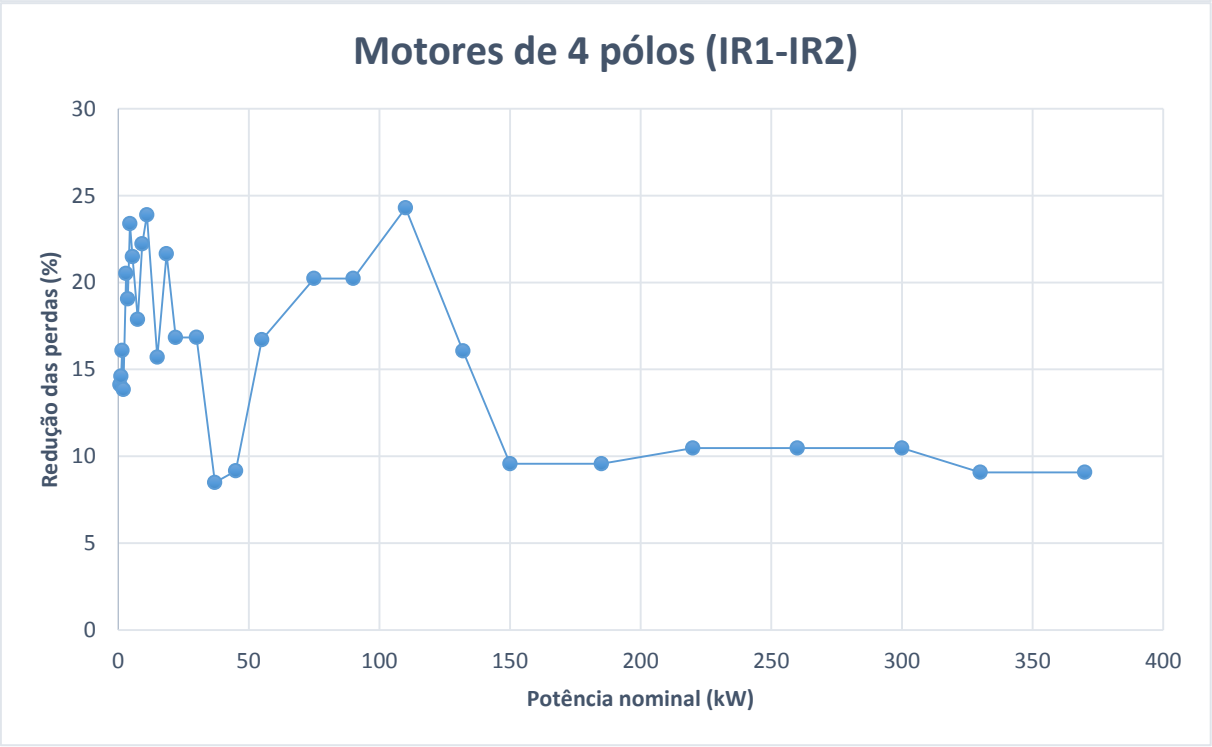
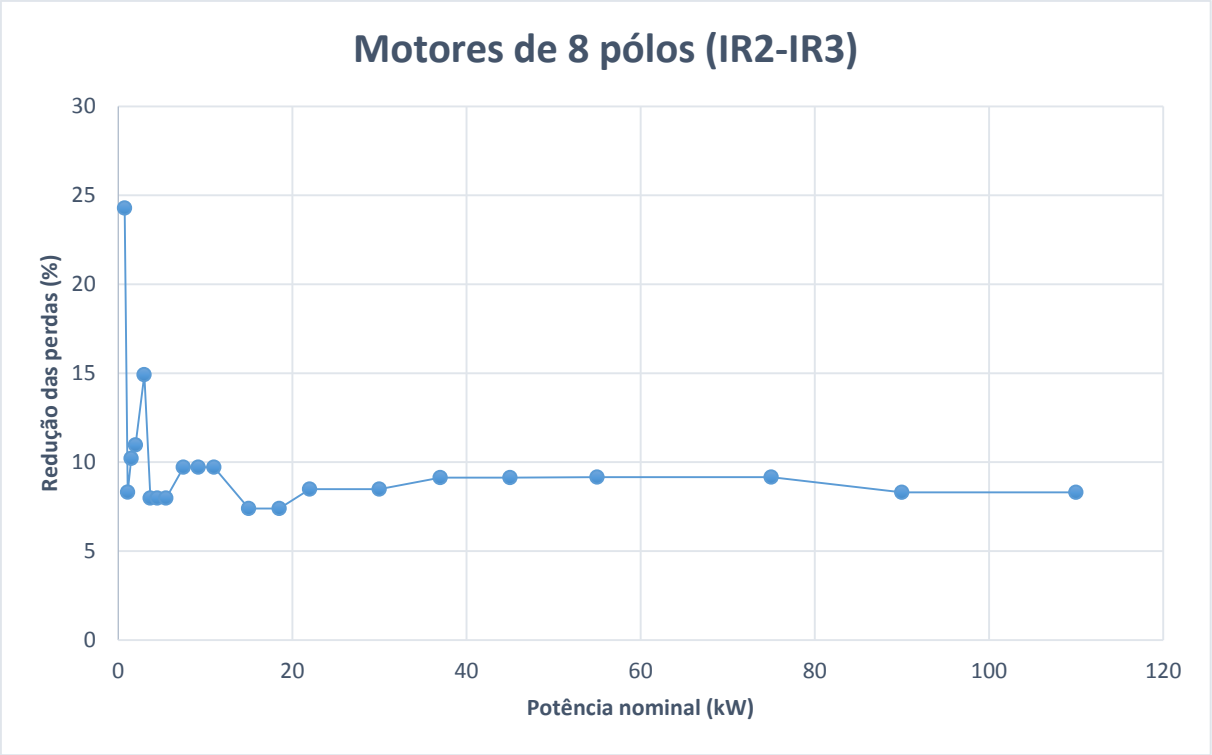
PACHECO, R. F. & SILVA, A. V. F.. **Aplicação de modelos quantitativos de previsão em uma empresa de transporte ferroviário**. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto, MG, Brasil, 21 a 24 de out de 2003, p.1-8.

Soares, G. A., Ferreira, C. A., Costa, E. A., Santos, M. A., 2013. **IS IE3 Efficiency Class: A Feasible Next Step for Industrial Motor's MEPS in Brazil?**. Em: Proceedings da 8ª conferência internacional EEMODS 2013. pp. 561-569.

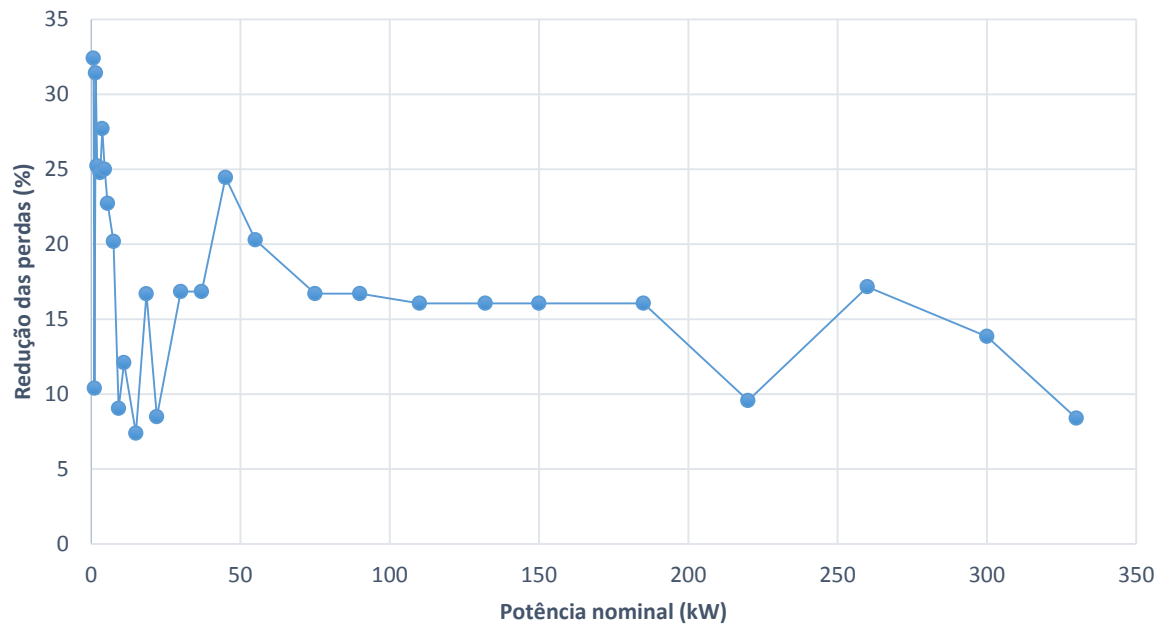
UMANS, Stephen D.. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2014. 724 p. Tradução de Anatólio Laschuk.

APÊNDICE A – Figuras Para Análise do Comportamento das Reduções percentuais na Faixa de 1 a 10 cv e na Faixa completa

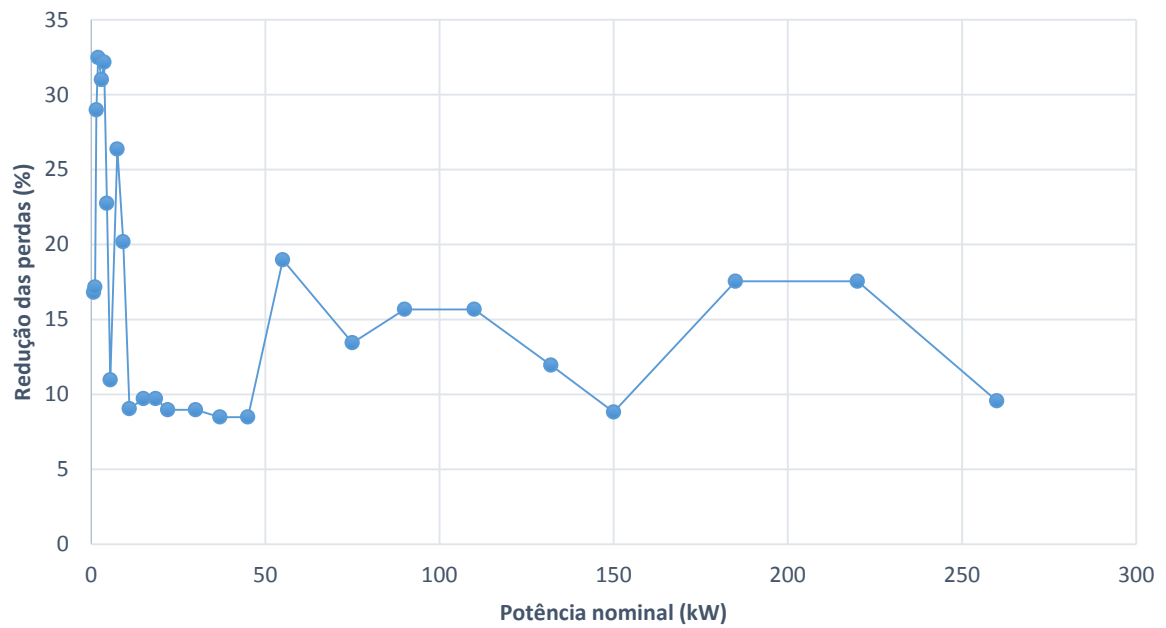




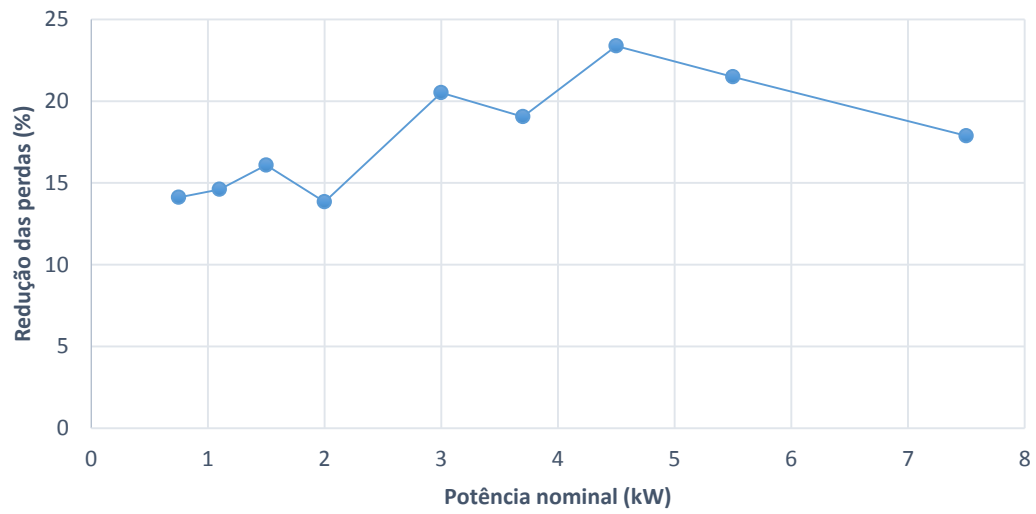
Motores de 6 pólos (IR1-IR2)



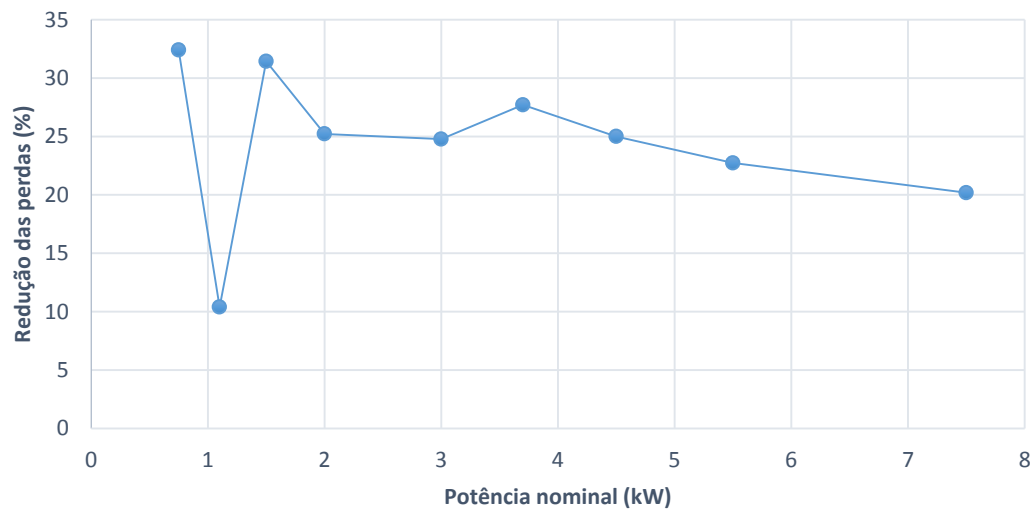
Motores de 8 pólos (IR1-IR2)



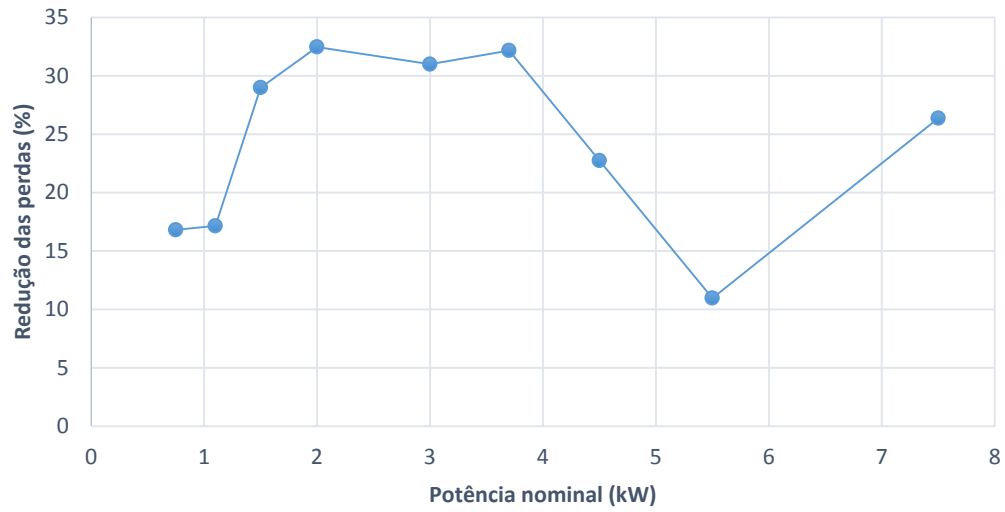
Motores de 4 pólos (IR1-IR2)



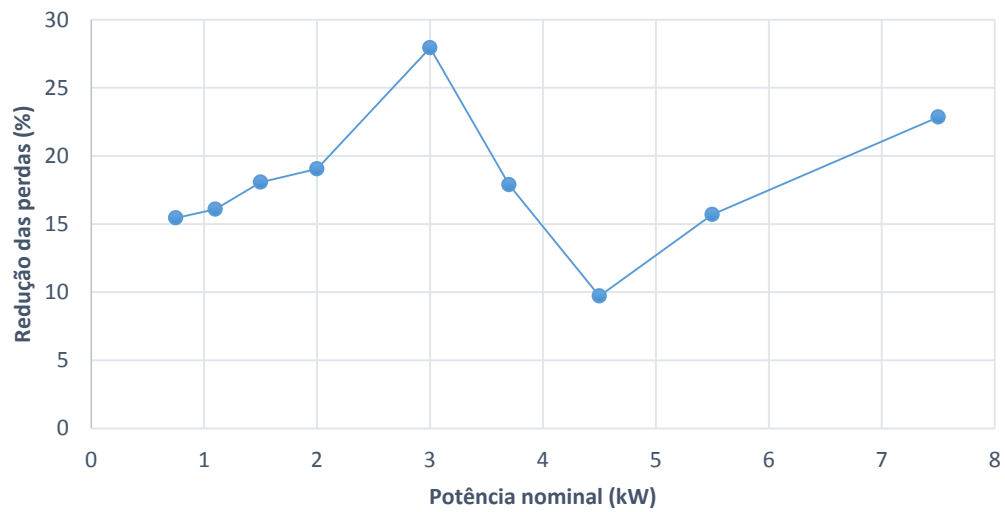
Motores de 6 pólos (IR1-IR2)



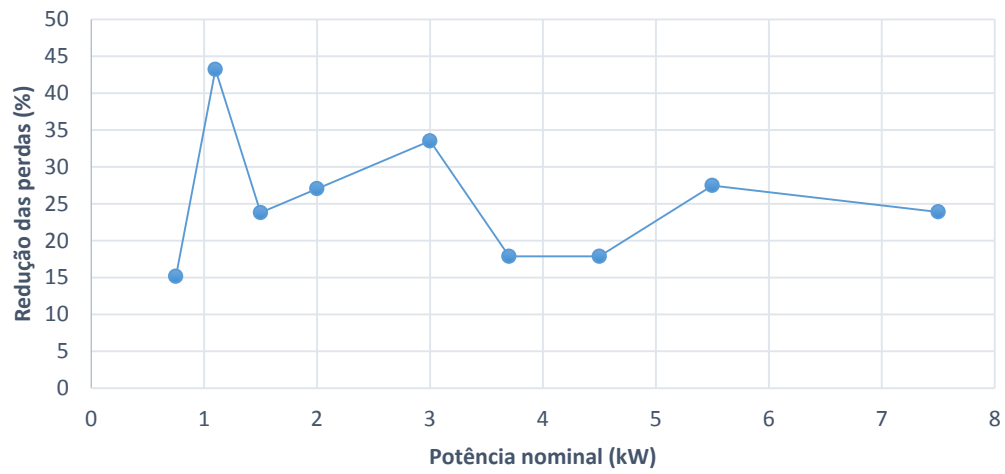
Motores de 8 pólos (IR1-IR2)



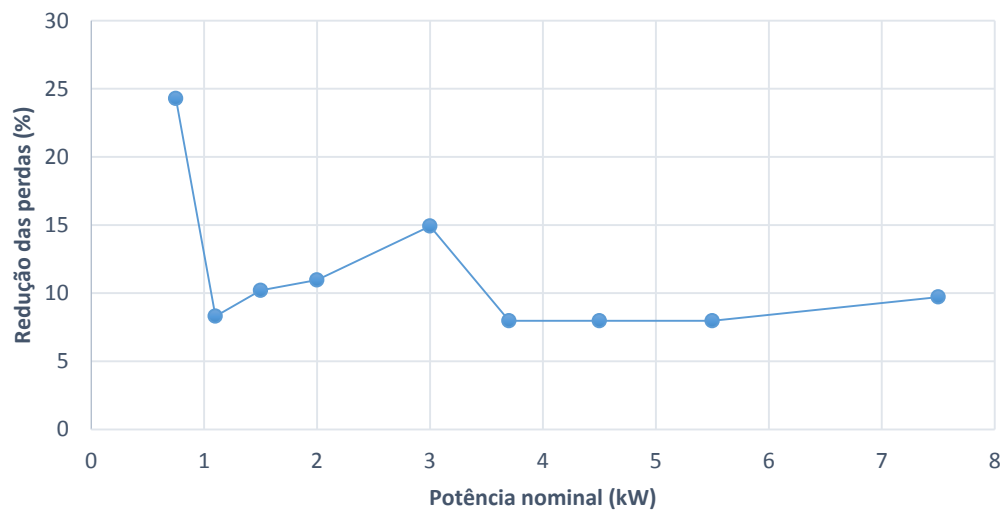
Motores de 4 pólos (IR2-IR3)



Motores de 6 pólos (IR2-IR3)



Motores de 8 pólos (IR2-IR3)



APÊNDICE B – Alguns dos Comportamentos das Reduções de perdas em kW para motores de 1 a 10 cv

