

# **Sistemas Motrizes: Motores Elétricos, Sistemas de Ar Comprimido e de Bombeamento**



## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DE ENERGIA

### *Sistemas Motrizes: Motores Elétricos*

#### PARTE I

**Anderson Jucá**

---

#### **Resumo**

*O homem tem adquirido crescentes conhecimentos científicos e tecnológicos que, de forma sistematizada, tem permitido crescente melhoria de qualidade de vida e de produtividade no uso dos recursos produtivos naturais. É nesse contexto, de busca de melhoria contínua de produtividade, ou seja, de se conseguir a mesma produção com menores necessidades de recursos produtivos, especificamente no que concerne à energia elétrica necessária ao funcionamento dos sistemas elétricos motrizes, que este módulo se dedica a contribuir.*

## Sumário

---

1. Sistemas Motrizes – Segmento Industrial e de Serviços .....	4
2. Sistemas Industriais de Energia .....	5
3. Motores Elétricos.....	7
3.1. Características .....	10
3.2. Potências elétrica e útil de eixo e rendimento energético .....	14
3.3. Características de aceleração de motores elétricos.....	22
3.3.1 Categorias da relação conjugado e velocidade para MITRGE.....	24
3.4. Curvas de operação na avaliação do desempenho de motores..	27
3.4.1 Avaliação do percentual de carregamento de motores .....	29
3.4.2 Exemplo de aplicação.....	31
3.5. Fatores complementares que influenciam no desempenho de motores.....	37
3.6. Operação com inversores de frequência .....	39
Referências.....	42
Biografia .....	42

# 1.

## Sistemas Motrizes – Segmento Industrial e de Serviços

---

A busca de melhoria da produtividade pela redução dos índices de perdas de energia no processo de conversão, aqui denominada de melhoria da eficiência energética, deve ser motivada pela necessidade de eficiência econômica e ambiental. Por consequência dos ganhos econômicos e ambientais têm-se ganhos sociais e culturais. Tudo isso faz parte do conceito amplo de sustentabilidade.

Ações com o objetivo de melhoria de resultados econômicos de uma empresa, com base em ganhos de eficiência energética, contribuem para a redução de impactos ambientais na proporção das reduções de energia primária utilizada para a conversão em elétrica. O ganho ambiental, que é também precificável, deve ser levado em consideração para a tomada de decisão em investir em eficiência energética. Também, a melhoria da imagem da empresa que opera com eficiência energética é fator ponderável. Em suma, investimento em eficiência energética tem enorme poder para a geração de valor para uma empresa.

A energia elétrica permite ter força motriz controlável. A força motriz é uma das mais importantes finalidades da eletricidade. Sua aplicação está em todos os setores da economia, desde aparelhos e equipamentos eletrodomésticos às máquinas de grandes complexos industriais; aqui sendo o enfoque pela grande representatividade no consumo de energia elétrica e nos potenciais de ganhos em eficiência energética quando pensado com melhor racionalidade.

O mau dimensionamento de sistemas motrizes é fator conhecido de desperdício de energia, porém muito negligenciado. Motores sobre dimensionados, motores com característica de conjugado inadequado à carga, motores com sistema de partida inadequado ao ciclo de operação da carga, motores utilizados para o acionamento de sistemas de ar comprimido que apresentam vazamentos, sistemas de bombeamento de fluidos mal dimensionados ou mal utilizados, sobretudo pelo emprego inadequado de válvulas, são grandes fontes de desperdício de energia.

“É comum encontrar motores sobre dimensionados, operando com baixa porcentagem de carga, ou ainda, motores subdimensionados, operando com cargas acima do especificado, implicando em baixa eficiência e redução de vida útil. Estima-se que aproximadamente 40% dos motores operam abaixo de 50% da sua capacidade nominal.” [18]

## 2.

# Sistemas Industriais de Energia

O potencial de obtenção de ganhos com eficiência energética no segmento industrial e de serviços é enorme. Conforme o diagrama de fluxo de energia elétrica brasileiro [1], apresentado na figura 1, desconsiderando a parcela de perdas inerentes às redes elétricas, destacada no diagrama como “perdas”, constata-se que, em 2018 o setor industrial representou 37,5% de todo o consumo final de energia elétrica no Brasil.

Essa proporção é conservadora se for levado em consideração que, em 2018 não se estava usando toda a capacidade produtiva industrial instalada no país em função da crise econômica.

No estado de São Paulo, segundo o Balanço Energético estadual de 2019 - ano base 2018 [2], o setor industrial representou 42% do consumo de eletricidade. Nesse contexto, certamente, na região metropolitana da capital paulista a proporção do consumo final de energia elétrica pela indústria é muito maior que 42%, que é a média estadual.

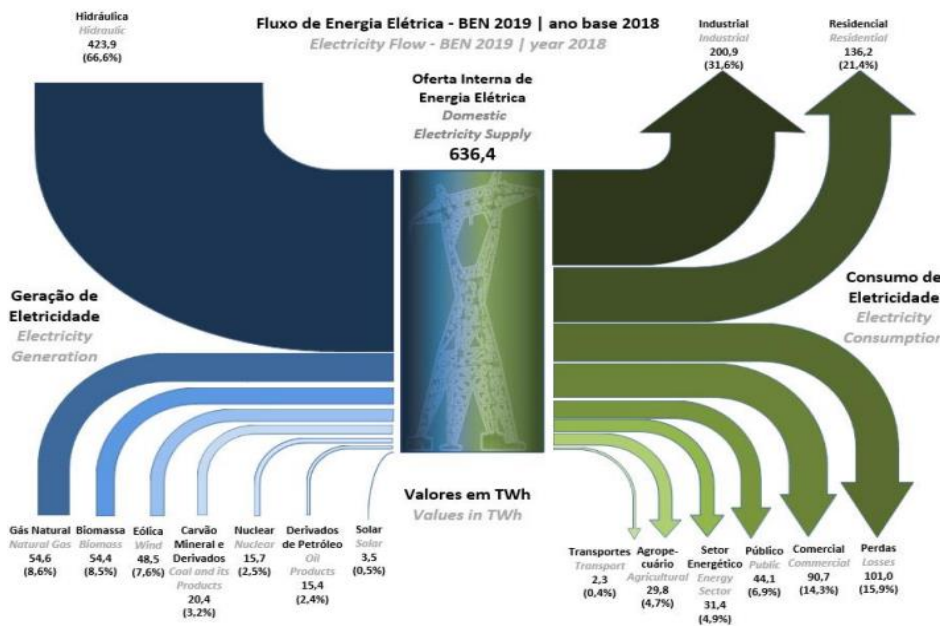


Figura 1: Fluxo de Energia Elétrica no Brasil em 2018. (Fonte: [1] Balanço Energético Nacional - BEN-2019. Disponível em [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br))



Vários estudos, baseados em levantamentos de dados, apontam que mais de 55% da demanda de energia elétrica na indústria é para suprir motores elétricos. Segundo o Procel (2009), o suprimento de energia elétrica na indústria brasileira destinava aos seguintes usos finais, com suas respectivas proporções: motores elétricos (68%), eletrotermia (22%), iluminação (6%) e eletrólise (3%). Sendo assim, de forma conservadora, considerando a média paulista, 55% de 42%, podemos considerar que os sistemas motrizes industriais representam algo em torno de 23 % de toda a energia elétrica consumida no estado de São Paulo.

Essas informações têm o mérito de enaltecer a importância dos sistemas motrizes no cômputo da demanda por energia elétrica. Contudo, mais importante ainda é conhecer o potencial de uma empresa específica e a representatividade dos seus próprios sistemas motrizes na demanda total de energia elétrica. Há uma considerável parcela de indústrias que os sistemas elétricos motrizes têm representatividade de mais de 90% do consumo de energia elétrica.

Para uma primeira estimativa do montante de energia elétrica demandado por cada tipo de carga, se recomenda a realização de um levantamento de carga instalada em operação, destacando a potência dos aparelhos elétricos com seus respectivos tempos de operação. Uma análise simples, baseada no Teorema de Pareto, poderá demonstrar a proporção ou o grau de importância dos sistemas motrizes em operação na empresa.

Quanto maior for a proporção que os sistemas elétricos motrizes representam no consumo de energia elétrica de uma empresa, maiores são os potenciais para a obtenção de bons resultados com investimentos em eficiência energética.

Diante disso, necessário se faz responder à pergunta:

### **- Quais são os percentuais de ganho de eficiência energética em sistemas motrizes industriais?**

Há possibilidades de ganhos consideráveis. Estudos realizados apontam reduções de consumo de até 60%. Contudo, a análise deve ser do processo para o equipamento. Os maiores potenciais de ganhos, costumeiramente, estão relacionados à revisão e readequação do processo industrial demandador de força motriz antes da revisão ou redimensionamento dos equipamentos e dos motores elétricos. Para tal faz-se mister o conhecimento do processo.

Os motores elétricos convencionais utilizados na indústria, intrinsecamente, são eficientes. A simples substituição destes por novos de melhor rendimento não trazem isoladamente os melhores resultados e, portanto, não pode ser o foco inicial de um estudo de eficiência energética em sistemas motrizes. Há que se conhecer e analisar o processo, as características do meio ambiente de operação das máquinas, o ciclo de operação, os sistemas de partida e controle, as características da rede elétrica e da tensão elétrica de alimentação, dentre outros. A análise sistêmica deve ser privilegiada.

Conhecido o processo e as readequações necessárias à otimização, passa a ser importante a análise do rendimento da máquina motor elétrico. Nesta etapa recomenda-se pensar em substituí-los.

Na indústria, os motores elétricos são os responsáveis pelo fornecimento de força motriz as mais diferentes cargas mecânicas, tais como, para o funcionamento de compressores, ventiladores, bombas centrífugas, elevadores, esteiras transportadoras, ventiladores, misturadores, agitadores, depenadeiras, discos de corte, estações de saneamento, mesas de rolo, prensas, talhas, transportadores, dobradeiras, polias automáticas, guinchos, pontes rolantes, exaustores, moinhos, bombas, laminadores, enfim, máquinas e processos de todo o tipo. Na figura 2 são apresentadas as proporções das diversas aplicações de motores elétricos na indústria no mundo.

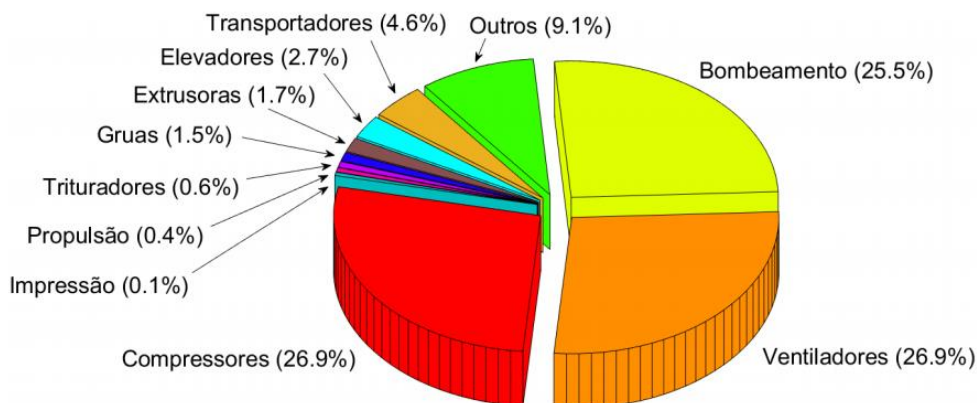


Figura 2: Estimativa de proporção das diversas aplicações de motores elétricos na indústria no mundo. [20]

Tecidas essas explicações iniciais, as características e os potenciais de ganho de eficiência energética nos Sistemas Elétricos Motrizes passam a ser apresentados de forma sintética e divididos em três seguimentos: Motores Elétricos, Sistemas de Bombeamento e Sistemas de Ar Comprimido.

### 3.

## Motores Elétricos

“Cientistas, físicos e outros profissionais nem sempre ligados à ciência contribuíram para a descoberta do motor elétrico, que acelerou a

industrialização mundial e transformou radicalmente o modo de vida das pessoas.” [3]

As limitações, alto custo e baixa confiabilidade dos primeiros motores de corrente contínua motivaram estudos para o desenvolvimento de um motor mais barato, robusto e resistente. “Quatro pesquisadores, trabalhando isoladamente, buscavam esse mesmo objetivo: o italiano Galileu Ferraris, o iugoslavo Nicola Tesla, o alemão Friedrich Haselwander e o russo radicado na Alemanha Michael von Dolivo-Dobrowolsky. Eles cogitavam não apenas o aperfeiçoamento da máquina de corrente contínua, mas também o emprego do sistema de corrente alternada, cujas vantagens nas transmissões de energia a longa distância tornaram-se conhecidas em 1881.” [3]

Assim, em 1885, Galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases com um cilindro de cobre no rotor. Em 1887, Nicola Tesla, suportado com recursos da Westinghouse, apresentou um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto-circuito. Este até teve patente registrada, mas não prosperou, pois não se verificou viabilidade econômica. Em 1889, Michael von Dolivo Dobrowolsky, da empresa Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (AEG), de Berlim, persistindo na pesquisa do motor de corrente alternada, entrou com pedido de patente de um motor trifásico com rotor do tipo gaiola de esquilo. Este motor, simples e silencioso, tinha menos manutenção e alta segurança em operação, que associado a um rendimento de 80% passou a ser ideal para o acionamento de sistemas motrizes de indústrias.

Em 1891, Dobrowolsky iniciou a fabricação em série de motores assíncronos trifásicos, nas potências de 0,4 a 7,5 kW. A partir daí, com a produção em série e padronização, muito se evoluiu tanto no peso do motor quanto na eficiência da conversão eletromecânica. Os motores trifásicos assíncronos atuais, denominados de indução, pesam cerca de 8% do peso de um motor de mesma potência de um século atrás e com rendimento que chega a valores 20% superiores. Todavia, o princípio físico do motor de indução atual é àquele desenvolvido por Dobrowolsky em 1889.

Em 1891, com o sucesso do desempenho da transmissão de energia elétrica em corrente alternada demonstrado na Exposição de Frankfurt, o Motor de Indução Trifásico passou a ser empregado e reina nos dias atuais. Na feira de Frankfurt foi apresentado um sistema em que um gerador de 200 kVA, acionado por uma turbina hidráulica, localizado em Lauffen, utilizando um transformador para aumentar a tensão para 25 kV forneceu energia para o acionamento de um motor construído por Dobrowolsky, por meio de uma linha de transmissão trifásica com fios de cobre até Frankfurt, cerca de 175 km de distância, com rendimento à época excelente de 75%. “Em Frankfurt a tensão era rebaixada para 65 Volts e alimentou o motor de Dobrowolsky de 100 kW que acionava uma bomba d’água que alimentava uma cachoeira artificial localizada no pátio da feira”. [3]



**A partir daí abriu-se o caminho para a busca de potências cada vez maiores, maior durabilidade e eficiência.** Tanto o projeto como os materiais evoluíram consideravelmente. Também, a padronização tornou-se necessária.

O Motor de Indução Trifásico (MIT), inventado por Tesla e aperfeiçoado por Dobrowolsky, com as inúmeras e contínuas evoluções, hoje é o principal provedor de força motriz para a indústria. Discreto, durável e silencioso o MIT adequadamente dimensionado e cuidado permite alta eficiência e desempenho dos sistemas motrizes.

Melhorias na isolação, a utilização de materiais cobre e ferromagnético nobres, associado à evolução do projeto por meio da informática e da utilização de softwares de análise em 3D, tem possibilitado alcançar índices de eficiência nominais elevadíssimos mesmo em motores convencionais.

A evolução contínua tem desenvolvido motores com nível de ruído cada vez menor, redução de custos, melhor robustez e confiabilidade, eliminação de manutenção, melhoria do rendimento e velocidade variável com a utilização de inversores de frequência. A propósito, com inversores de frequência acoplados aos motores a economia de energia pode ser ainda mais considerável a depender do regime de trabalho do motor.

Motores fabricados e comercializados sob a nova legislação brasileira - Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 1, de 29/06/2017 – tem rendimento consideravelmente superiores aos de datas anteriores, sobretudo se comparados com os fabricados anteriormente a 2010, quando não se aplicava ainda a exigência de índices de rendimento dispostos na Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 553 de 08/12/2005.

**Nesse ponto do estudo é importantíssimo que o leitor tenha em mente a distribuição de custo anualizado do ciclo de vida de um Motor Indução Trifásico.** Segundo estudos realizados, os percentuais são: 1% são custos de reparo e manutenção; 4,6 % é o custo inicial de capital anualizado no período da vida útil para a aquisição; e 94,4 % representa o custo da energia elétrica. [21]

Conclui-se que, mais importante do que o custo da aquisição de um motor é o custo da energia elétrica necessária para a operação deste. Desta forma, é evidente que em um estudo de eficiência energética deve-se pensar também na substituição de motores antigos por novos mais eficientes.

Além da substancial melhoria dos índices de rendimento, por Lei hoje exigida para os motores convencionais fabricados e comercializados no Brasil, há que se considerar na avaliação e um estudo de eficiência energética os motores, denominados *super premium* e *ultra premium*, cujos índices de rendimento são ainda superiores aos dos convencionais que atendem às disposições exigentes da Portaria nº1 de 2017. Estes, associados com o uso de inversores de frequência, têm sido em muitos casos a melhor opção considerando o excelente resultado redução do consumo de energia elétrica.

### 3.1. Características

---

De uma maneira geral, as máquinas elétricas rotativas apresentam três partes: elétrica, mecânica e eletromecânica. A parte elétrica é regida pelas equações elétricas que relacionam grandezas tais como, tensão elétrica, corrente elétrica e potência elétrica. A parte mecânica é regida pelas equações mecânicas que relacionam torque ou conjugado, força e deslocamento. A terceira parte é o meio de acoplamento em que é regido pelas equações eletromecânicas.

Estas são regidas por leis físicas: i) Lei de Ampère, que dispõe que “Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica surge em torno dele um campo magnético”; ii) Lei de Faraday que dispõe que “Quando um circuito elétrico é atravessado por um fluxo magnético variável, surge uma força eletromotriz (tensão) induzida atuando sobre o mesmo.”; iii) Lei de Lenz, que afirma que “A tensão induzida em um circuito fechado por um fluxo magnético variável produzirá uma corrente de forma a se opor à variação do fluxo que a criou”; e iv) Força de Lorentz, que descreve que “Quando um condutor, atravessado por corrente elétrica, é imerso em um campo magnético, surge sobre o condutor uma força mecânica”.

O Motor de Indução Trifásico (MIT), conforme mostrado na figura 3, é composto de duas partes principais: a estática, denominada estator e a que é acoplada ao eixo de rotação suportada por mancais e rolamentos, denominada rotor.

O MIT possui um entreferro (ou *air gap*) uniforme. O rotor pode possuir uma construção tipo gaiola de esquilo ou tipo bobinado. As bobinas do estator estão distribuídas ao longo do entreferro de modo a melhor aproveitar o material ferromagnético e assim melhorar a distribuição de força magneto motriz, suavizando o torque desenvolvido pela máquina.

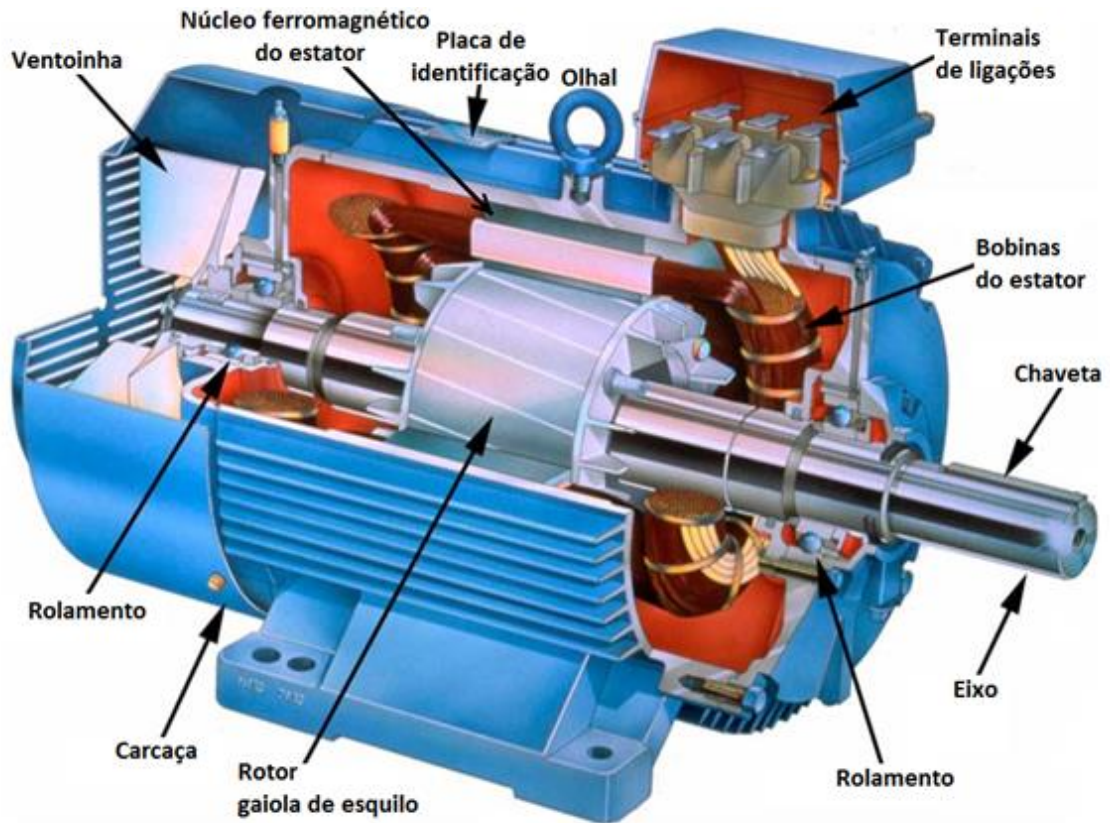


Figura 3: Vista em corte dos principais componentes de um MIT com rotor gaiola de esquilo.

As bobinas trifásicas do estator, denominadas de bobinas de campo, são instaladas em ranhuras de uma base estática cilíndrica oca de material ferromagnético de ótima permeabilidade magnética  $\mu$ , dispostas com defasagem angular de  $120^\circ$ . Esta disposição pode ser observada na figura 4, destacando que os seis terminais de ligação das bobinas no primeiro núcleo do processo de montagem.



Figura 4: Processo de montagem do Motor de Indução Trifásico

Quando as bobinas trifásicas do estator são alimentadas por uma fonte de tensão trifásica equilibrada, conduzem correntes alternadas. Essas correntes criam um campo magnético girante no interior das bobinas devido à defasagem de  $120^\circ$  das três correntes nas três bobinas do estator.

O campo magnético resultante,  $H_R$  (Aesp/m), é girante e tem intensidade constante e igual a 1,5 vezes a intensidade do campo máximo  $H_{1m\acute{a}x}$  gerado por cada uma das correntes das três fases – que ocorre, no momento em que a corrente alternada senoidal de cada fase atinge o valor de pico.

Esse campo magnético girante  $H_R$ , de valor constante igual a  $1,5 H_{1m\acute{a}x}$ , ao se concatenar com as espiras da bobina (ou barras de cobre da gaiola de esquilo) dispostas no rotor do motor, induz a criação de tensão elétrica nesta bobina, mas como o rotor é uma gaiola ou, no caso de rotor tipo bobinado as espiras são curto-circuitadas por meio de anéis, isso resultará na circulação de corrente elétrica na bobina do rotor (ou gaiola), induzida devido a um campo magnético variável (girante) em relação ao enrolamento do rotor. A corrente induzida no rotor cria, por sua vez, outro campo magnético que interage com o campo magnético indutor resultando em um torque no sentido do campo girante.

A inversão de uma das 3 fases que alimentam as bobinas do estator causará a inversão do sentido de rotação do campo girante, portanto, também do rotor do motor. Por isso é importante saber a sequência de fases (A-B-C ou A-C-B) da rede elétrica para a correta conexão do motor.

Salienta-se que, o rotor gira com uma velocidade angular “n (rpm)” menor do que a do campo girante, denominada velocidade síncrona “ $n_s$  (rpm)””. A diferença percentual da velocidade do rotor em relação à síncrona (do campo magnético girante) é denominada de escorregamento “s”, do inglês *slip*.

O escorregamento nunca será nulo, pois se a velocidade do rotor atingisse a síncrona, não haveria concatenamento de fluxo magnético (campo magnético girante) com as bobinas do rotor (ou barras de cobre da gaiola de esquilo), por consequência, não haveria indução de corrente no rotor e, conseqüentemente, a criação de campo magnético no rotor e, portanto, não haveria torque (T). Obviamente essa é uma situação hipotética, pois imediatamente a perda de torque haveria a redução da velocidade do rotor, pois mesmo sem carga no eixo tem-se o atrito.

Pelo fato do rotor ter velocidade rotacional de operação menor do que a velocidade do campo girante, denominada velocidade síncrona  $n_s$ , o MIT é denominado de máquina assíncrona.

A frequência da corrente induzida no circuito do rotor  $f_2$  é dada pela relação  $f_2 = s \cdot f_1$ , onde  $f_1$  é a frequência da rede de alimentação do motor ( $f_1 = 60$  Hz).

A velocidade do motor de indução cai, com cargas pesadas. Realmente, apenas pequenas variações de velocidade são necessárias para produzir as variações na corrente induzida para atender às alterações normais de carga. A razão disto é

a resistência muito baixa do enrolamento do rotor (barras de cobre). Por este motivo, os motores de indução são considerados motores de velocidade constante.

A velocidade do rotor do MIT cai com cargas pesadas, mas o escorregamento  $s$ , que é normalmente menor do que 5% à plena carga varia muito pouco. Pequenas variações de velocidade são necessárias para produzir as variações na corrente induzida para atender às alterações normais de carga solicitada ao motor. A razão disto é a resistência muito baixa do enrolamento do rotor (barras de cobre, no caso de rotor gaiola de esquilo).

Como a variação da velocidade rotacional de operação é muito pequena, os MIT costumam ser considerados motores de velocidade constante, o que para uma carga constante em situação normal de operação é verdade. Contudo, a velocidade será menor do que a síncrona  $n_s$ , que em rotações por minuto (RPM) é dada pela relação:

$$n_s \text{ (rpm)} = (120 \cdot f) \div p ;$$

onde:  $f$  é a frequência da rede elétrica em Hertz (Hz); e  $p$  é o número total de polos que é sempre um número par.

A velocidade de operação “ $n$ ” é dada pela relação:

$$n \text{ (rpm)} = (1 - s) \cdot n_s$$

Para operação no Brasil cuja frequência da rede é 60 Hz, as velocidades síncronas em função do número de pólos são as seguintes:

- a) MIT de 2 pólos,  $n_s$  é igual a 3600 rpm;
- b) MIT de 4 pólos,  $n_s$  é igual a 1800 rpm;
- c) MIT de 6 pólos,  $n_s$  é igual a 1200 rpm;
- d) MIT de 8 pólos,  $n_s$  é igual a 900 rpm;

Considerando, por exemplo, que para a operação em carga nominal o escorregamento  $s = 3\%$ , para todos os motores, as velocidades nominais de operação ( $n_N$ ) dos motores seriam:

- a) MIT de 2 pólos,  $n_N$  é igual a 3492 rpm;
- b) MIT de 4 pólos,  $n_N$  é igual a 1746 rpm;
- c) MIT de 6 pólos,  $n_N$  é igual a 1164 rpm;
- d) MIT de 8 pólos,  $n_N$  é igual a 873 rpm;

Em muitas operações há a necessidade de adequação da velocidade  $n$  (rpm) do rotor do motor em relação à necessária para a carga ou processo industrial. Nesse caso, acoplamentos com multiplicadores e redutores de velocidade são

comumente empregados. Esses acoplamentos podem induzir perdas consideráveis de até 30% devido ao atrito entre engrenagens, ventilação e pela viscosidade do fluido lubrificante [14].

Inversores de frequência também são empregados para variação e controle de velocidade e torque. O inversor de frequência controla totalmente os pulsos de tensão que alimentam o motor. Dessa maneira, controla a frequência e o nível de tensão que motor irá receber. Contudo, devem-se considerar as no inversor e, também, que o motor tem que possuir características especiais para operação com inversor de frequência.

Acoplamentos com correia são também empregados. “O rendimento de correias em V pode variar de 90 a 96%. Um dos fatores mais importantes em um sistema acionado por correia é a flexão e a força tensora que agem sobre a mesma, podendo acarretar ruídos e redução da eficiência na transmissão de potência. Uma tensão muito pequena pode causar escorregamento, perdas e falha prematura da correia. Por outro lado, correias muito esticadas resultam em esforços excessivos nas correias, mancais e eixo.” [14]

“As correias corrugadas são 1 a 3% mais eficientes que as correias em V, principalmente por serem mais flexíveis. Em geral podem ser usadas em substituição às correias em V, sem que haja a necessidade de se alterar qualquer componente do sistema, constituindo-se, assim, em um grande potencial de conservação de energia.” [14]

“A correia mais eficiente é a correia dentada. Uma vez que a mesma garante o sincronismo entre as polias acionadas, são flexíveis e evitam o escorregamento, o seu rendimento pode chegar a 98 e 99%.” [14]

### 3.2. Potências elétrica e útil de eixo e rendimento energético

A potência nominal ( $P_N$ ) de um MIT representa a potência útil que para condições nominais padronizadas, tais como tensão elétrica aplicada, o motor oferece no eixo à carga. Essa potência é comumente apresentada com a unidade de Cavalo Vapor (cv).

Nas condições nominais, a potência elétrica absorvida da rede elétrica de alimentação  $P_{EleN}$ , em Watts, que é convertida em energia mecânica no eixo do motor, dependerá do rendimento nominal ( $\eta_N$ ), pela seguinte relação:

$$P_{EleN} \text{ (W)} = [P_N \text{ (cv)} * 736] \div \eta_N$$

Contudo, o MIT por ser uma carga indutiva e resistiva, não absorverá somente a potência  $P_{Ele}$  (W), denominada potência ativa, que é convertida em trabalho no eixo ( $P_{\text{útil}}$ ) e mais a parcela de potência que representa a energia perdida



internamente no processo de conversão eletromecânica ( $\sum P_{\text{perdas}}$ ). O motor absorve uma potência maior denominada de potência “aparente” que é representada pela letra “S” cuja unidade, para facilidade de identificação, é apresentada em Volt-Ampère (VA).

A potência aparente é composta por duas parcelas. Uma parcela que não depende do tempo,  $P_{\text{Ele}}$  (W), constante para uma determinada potência mecânica exigida no eixo da máquina, e que tem a mesma frequência da rede elétrica; e outra parcela flutuante que é absorvida pelo motor e devolvida à rede elétrica com o dobro da frequência da tensão da rede de alimentação. Essa parcela de potência flutuante, inerente à operação do motor, que ora é absorvida e ora é devolvida para a rede elétrica supridora do motor causa perdas nas redes elétricas supridoras.

A potência aparente é igual ao produto dos valores eficazes da tensão (V) e da corrente elétrica (I). Matematicamente:

$$S \text{ (VA)} = V \text{ (Volts)} \cdot I \text{ (Ampères)}$$

A potência ativa  $P_{\text{Ele}}$  (W) =  $V \cdot I \cdot \cos\phi$ ; onde:

-  $\phi$  é o ângulo  $\phi$  mede a defasagem entre a onda senoidal da tensão e da corrente elétrica causada pela indutância própria do motor, que altera em função das condições de operação do motor; e

$\cos\phi$  é denominado de Fator de Potência (FP)

Portanto,  $P_{\text{Ele}} = S \cdot \cos\phi$  ou seja,  $S = P_{\text{Ele}} \div \cos\phi$ . Assim sendo, para a mesma potência ativa  $P_{\text{Ele}}$ (W) quanto menor for o Fator de Potência maior será a potência S (VA) absorvida da rede. Considerando a tensão constante da rede elétrica supridora, haverá um aumento da corrente elétrica I e, como consequência, tanto maiores serão as perdas na rede elétrica de alimentação do motor, que são proporcionais ao quadrado do valor da corrente elétrica ( $P_{\text{perdas}} = Ri^2$ ), onde “R” é a resistência dos fios elétricos, em Ohm ( $\Omega$ ).

Considerando que o baixo fator de potência não somente causa perdas desnecessárias internamente às instalações elétricas da unidade consumidora (indústria), mas também nas redes elétricas da concessionária de serviços públicos de distribuição, o que seriam incorporadas à tarifa da concessionária, há legislação que penaliza o consumidor caso o FP seja inferior a 0,92. A correção do FP por meio do uso de capacitores é a solução, mas a depender do local em que estes são instalados ter-se-á perdas desnecessárias nas redes internas à unidade consumidora.

A correção do FP de potência, por meio do uso de capacitores, equaciona o problema externamente ao motor. Contudo, internamente ao motor o fluxo da parcela de potência flutuante, causa perdas nas bobinas de cobre dos enrolamentos. A depender do ponto de trabalho estas perdas podem ser consideráveis desperdícios de energia. Sobretudo em situações de sobre dimensionamento do motor com relação à carga.

É comum para facilitar as operações matemáticas representar a parcela de potência fluante de “Q”, em Volt-Ampère-reativo ( $VA_R$ ) e construir um diagrama no plano cartesiano conhecido como “triângulo de potência”, onde no eixo das abscissas, dos números reais, se representa a potência ativa  $P_{Ele}$  (W) e no eixo das ordenadas, dos números imaginários, a potência fluante por ser uma parcela de potência trocada entre o motor e a rede que não realiza trabalho. Esta é dita “potência reativa”  $Q(VA_R)$ , explicada pela Lei de Lenz.

Em suma, a potência absorvida da rede elétrica depende das condições operativas de carga e das curvas de operação do motor que fornecem para cada carregamento um valor de rendimento ( $\eta$ ), de fator de potência ( $\cos\phi$ ), corrente elétrica ( $I_{in}$ ), escorregamento (s) e Conjugado (ou Torque). Para o Motor Indução Trifásico considera-se as relações matemáticas da rede elétrica trifásica, que pelos valores de linha de tensão e corrente, conduzem à relação:

$$P_{Ele(in)}[W] = \sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \varphi$$

$$P_{útil(out)}[cv] = [ \eta * (\sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \varphi) ] \div 736$$

Para a obtenção da energia “E” corresponde, Watt-hora, basta multiplicar o tempo de operação pelo valor da potência de operação,  $P_{Ele(in)}[W]$ , correspondente a esse tempo.

Para análise das condições operacionais de desempenho, o MIT pode ser modelado conforme diagramas apresentados nas figuras 5a, 5b e 5c.

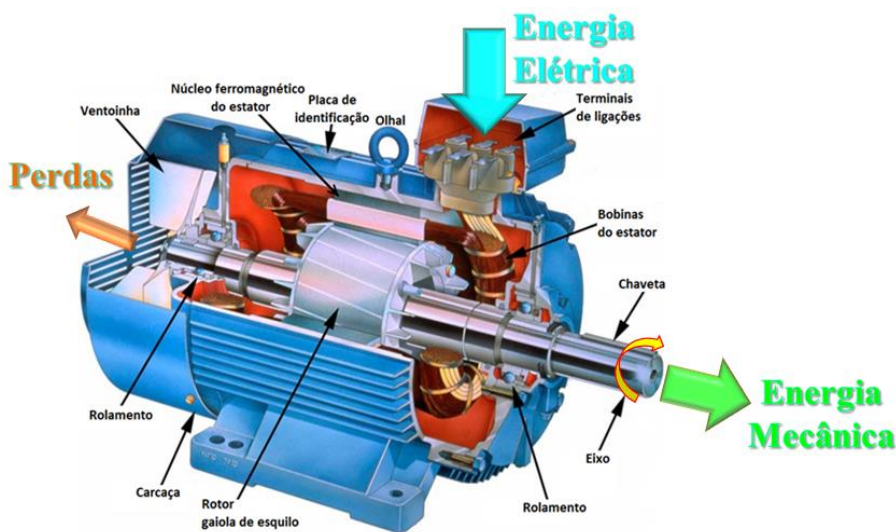


Figura 5a: Fluxo de energia em um Motor de Indução Trifásico (MIT).

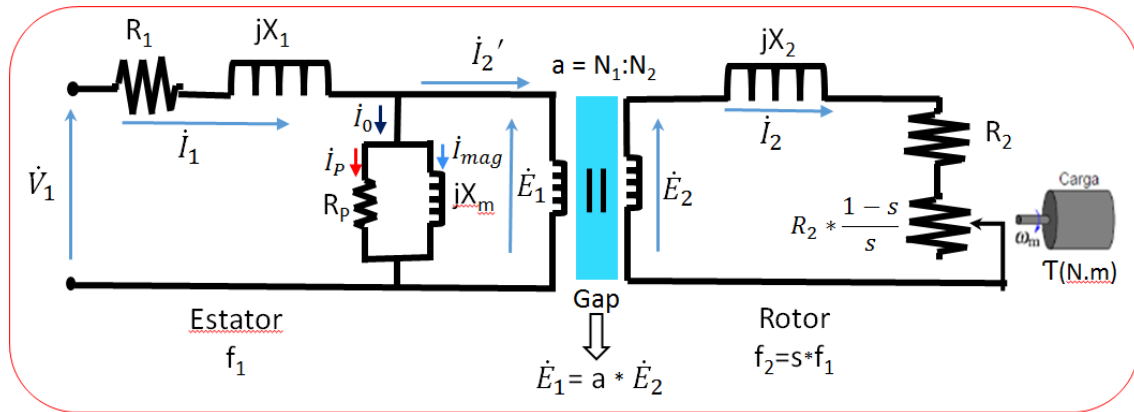


Figura 5b: Circuito equivalente de análise operacional de um MIT, modelado por fase.

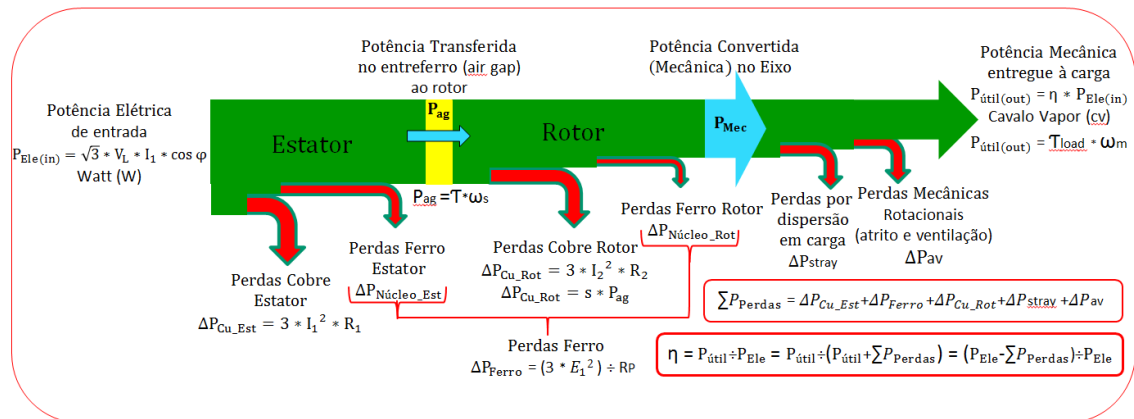


Figura 5c: Fluxo de potência em um MIT, destacando as componentes de perdas e o rendimento  $\eta$ .

Conforme apresentado na Figura 5c, o rendimento de um motor em operação pode ser determinado pela equação:

$$\eta = P_{útil} \div P_{Ele} = P_{útil} \div (P_{útil} + \sum P_{Perdas}) = (P_{Ele} - \sum P_{Perdas}) \div P_{Ele}$$

É comum representar a parcela de perdas que ocorre no ferro (ou núcleo) do rotor referido ao lado do estator. O modelamento apresentado na Figura 4b considera isso. A resistência  $R_p$  representa as perdas totais no ferro (ou núcleo) do motor ( $3 \cdot E_1^2 \div R_p$ ). Essa parcela de perdas é devida a histerese, que é própria da magnetização do núcleo ferromagnético, e de correntes parasitas (ou de Foucault) no núcleo de ferro que é também um bom condutor de eletricidade. Estas, já no processo de fabricação do núcleo, são minimizadas com o uso de chapas laminadas de aço-silício e isoladas eletricamente. Essa parcela de perdas varia muito pouco em função do carregamento do motor e pode ser obtida pela realização de um ensaio denominado de “ensaio a vazio”, ou seja, sem carga no eixo.

As parcelas de perdas no cobre do estator ( $3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$ ) e do rotor ( $3 \cdot I_2^2 \cdot R_2$ ), denominadas “perdas Joule” dependem do carregamento do motor e não são lineares, pois dependem do quadrado do valor da corrente elétrica. Para determinação dessas perdas pode-se realizar um ensaio denominado de “ensaio com rotor bloqueado”. Por esse ensaio, são obtidos os valores de  $R_1$  e  $R_2$  de forma associada ( $R_1 + R_2'$ ), onde  $R_2'$  é o valor de  $R_2$  referido ao lado do estator do motor. Dessa forma, pode-se determinar o valor da parcela de perdas por efeito Joule para cada valor de carregamento do motor.

As parcelas de perdas operacionais por dispersão em carga (também denominadas de suplementares) e rotacionais (atrito e ventilação) estão associadas ao projeto e dispositivos, tais como os rolamentos. Daí pode-se concluir ser importante que estes sejam adequadamente lubrificados ou serem do tipo encapsulado para evitar depósito de poeira, por exemplo. A propósito, a poeira depositada sobre o motor prejudica a transferência de calor (energia referente às perdas) fazendo com que este opere com temperatura mais elevada e, portanto, aumenta a resistividade do cobre das bobinas resultando em aumento do índice de perdas.

As parcelas de perdas em um Motor de Indução Trifásico com Rotor Gaiola de Esquilo (MITRGE) de 100 cv e 4 polos, operando com carga variável são apresentadas na figura 6.

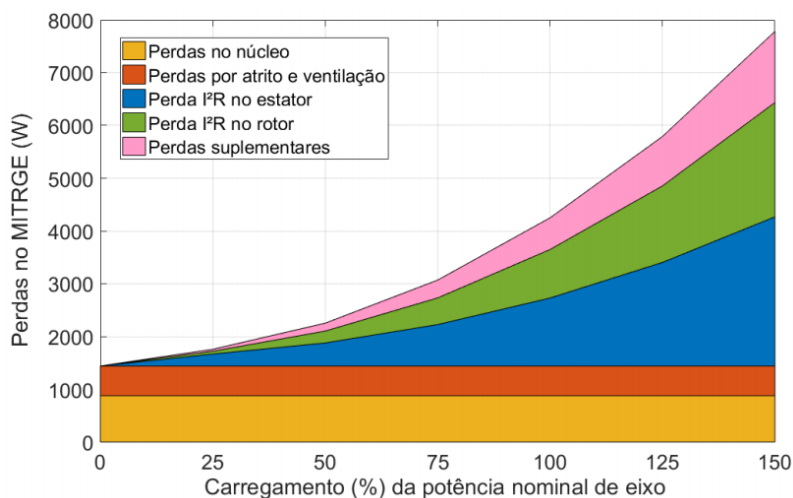


Figura 6: Comportamento das perdas em um MITRGE de 100 cv e 4 polos.  
(Fonte [19])

Observa-se que, as parcelas de perdas no núcleo e rotacionais (atrito e ventilação) são constantes para qualquer situação de carregamento, sendo as outras parcelas dependentes do carregamento. Quanto mais for o carregamento maiores são estas perdas. Dessa forma, poder-se-ia pensar, equivocadamente, em instalar um motor para trabalhar com carregamentos abaixo de 70%, portanto sobre dimensionar, que se estaria reduzindo perdas, ou seja, poupando energia.

Atenção, não se pode confundir valor absoluto de perdas com rendimento ( $\eta$ ). Deve-se levar em conta a potência (energia) entregue à carga, por requisição desta, em relação a a potência elétrica fornecida ao motor.

A faixa de operação adequada recomendada para a operação de um MIT está entre 75% e 100% de carregamento. Observe que, como as perdas no núcleo e rotacionais (atrito e ventilação) são constantes, uma boa aproximação para se determinar o carregamento de melhor rendimento ( $\eta$ ) é quando a soma das perdas das parcelas cujos valores dependem do carregamento são equivalentes ao valor da soma das 2 parcelas de perdas que não dependem do carregamento. Como essa análise não é prática lança-se mão da análise com base nas curvas de operação de desempenho de motores fornecidas pelos fabricantes.

Os fabricantes de motores obedecem a normas técnicas para a fabricação, como as da ABNT. Acompanhando a evolução técnica, a legislação brasileira primando pela busca de melhorar a eficiência também tem evoluído no nível de exigência.

Considerando a evolução das exigências legais quanto ao rendimento ( $\eta$ ) dos motores fabricados ou comercializados no Brasil, pode-se dizer que, até 2009 eram fabricados motores classificados como standard ou IR1 (motores da linha padrão ou convencional) e motores classificados como de alto rendimento ou IR2.

Posteriormente a 2009, quando entrou em vigor a Portaria Interministerial nº 553, de 2005, somente motores elétricos com eficiências iguais ou superiores aos de alto rendimento (IR2), sob as especificações regulamentadas, podiam ser fabricados, comercializados e importados no Brasil. Surgiu então a categoria IR3, ou “motor *premium*”, que é mais eficiente que os IR2 e, portanto, com rendimento muito superior do que os motores padrões anteriores à vigência da Portaria 553/2005.

Em 2013 foi revisada a Norma NBR 17094-1, que especifica valores mínimos de rendimento para duas classes de motores: IR2 e IR3.

Em agosto de 2019 entraram em vigor as disposições da Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 1, de 29/06/2017. Esta determina que o nível mínimo de rendimento para todos os motores comercializados no Brasil a partir de 2019, quer sejam novos ou usados, seja os da classe IR3. Além disso, ampliou a faixa de potência em que a exigência é válida, para motores de 0,16 a 500 cv, de 2 a 8 polos. O prazo final para a comercialização de motores IR2 foi em 28 de fevereiro de 2020. Os valores de rendimentos nominais mínimos à plena carga para Motores de Indução com Rotor Gaiola de Esquilo, conforme exigências da Portaria de 2017 estão apresentados na Tabela 1.

Motores de até 10 cv, que costumam ser desconsiderados em estudos de eficiência energética, contrariamente ao que se possa pensar, por representarem cerca de 85% dos motores instalados na indústria, é uma aposta de grande potencial para viabilidade de substituição. Sobretudo se observado a

evolução dos índices de rendimentos dos atuais, destacados na tabela 1, em comparação com os índices exigidos anteriormente a 2010.

**Considerando a nova exigência de legal do padrão de rendimento mínimo comercializável IR3**, que já era denominado de *premium*, a evolução do projeto por meio da informática e da utilização de softwares de análise em 3D, a evolução dos materiais de isolamento, a utilização de cobre e ferromagnético mais nobres e, principalmente da utilização de rotor de ímãs permanentes que, praticamente elimina as perdas Joule no rotor, tem possibilitado alcançar níveis de rendimento nominal ainda mais elevados. Com a eliminação dessas perdas, o motor trabalha com temperatura reduzida proporcionando assim a redução do tamanho da carcaça e aumento de sua vida útil.

A partir disso, a indústria especializada na fabricação de motores, passou a lançar motores classes: IR4 *super premium* (motor que supera em um nível os rendimentos mínimos exigidos pela Portaria Interministerial nº 1, de 2017, ou seja, da classe IR3); e IR5 *ultra premium* (motor que supera em dois níveis os rendimentos mínimos da classe IR3). Estes, a depender do regime de operação e do fator de utilização, possibilitam resultados ainda mais expressivos e viabilidade de *payback*. A figura 7 ilustra a evolução das exigências legais de eficiência de MIT, que tem acompanhado a evolução tecnológica.

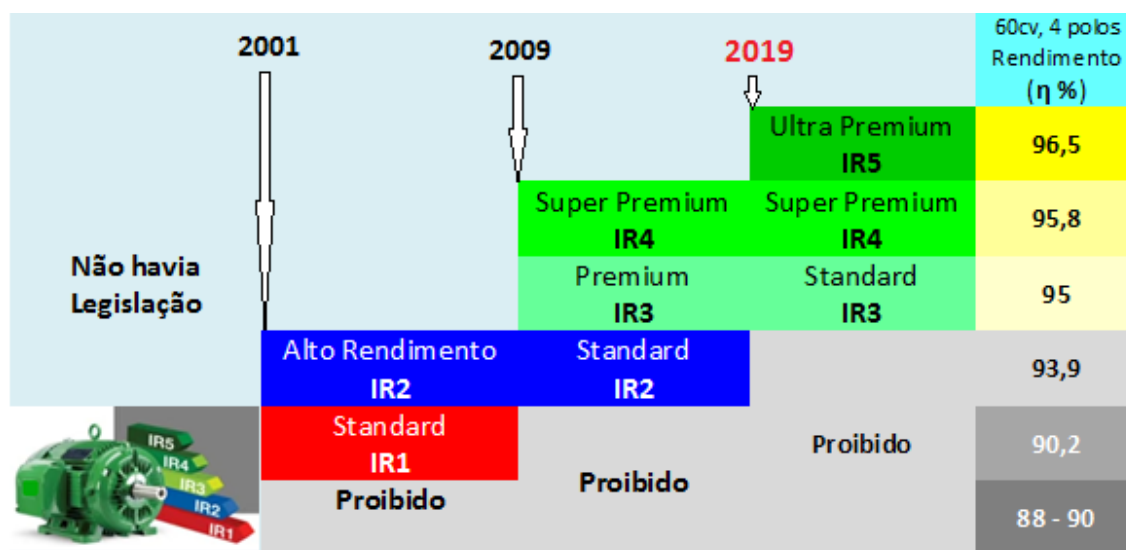


Figura 7: Marcos da evolução das exigências legais de eficiência de MIT.

Para cargas com elevada inércia, os motores IR4 e IR5 podem não ser a melhor opção. Motores que atendem cargas que necessitam de ciclo com frequente aceleração, dependendo do momento de inércia do conjugado e da variação da velocidade, a perda de energia nesse processo (aceleração) pode ser muito maior do que aquela em operação normal.



<b>Motores de Indução</b>					
<b>Rendimentos Nominais Mínimos</b>					
<b>Potência Nominal - P<sub>N</sub></b>		<b>Velocidade Síncrona - n<sub>s</sub> (rpm)</b>			
<b>cv</b>	<b>kW</b>	<b>3600</b>	<b>1800</b>	<b>1200</b>	<b>900</b>
		<b>(2 polos)</b>	<b>(4 polos)</b>	<b>(6 polos)</b>	<b>(8 polos)</b>
<b>Rendimento Nominal – η (%)</b>					
0,16	0,12	62,0	66,0	64,0	59,5
0,25	0,18	65,6	69,5	67,5	64,0
0,33	0,25	69,5	73,4	69,0	68,0
0,50	0,37	73,4	78,2	75,3	72,0
0,75	0,55	76,8	79,0	79,5	74,0
<u>1</u>	0,75	80,5	83,5	82,5	75,5
1,5	1,1	84,0	86,5	87,5	78,5
<u>2</u>	1,5	85,5	86,5	88,5	84,0
<u>3</u>	2,2	86,5	89,5	89,5	85,5
<u>4</u>	<u>3</u>	88,5	89,5	89,5	86,5
<u>5</u>	3,7	88,5	89,5	89,5	86,5
<u>6</u>	4,4	88,5	89,5	89,5	86,5
7,5	5,5	89,5	91,7	91,0	86,5
10	7,5	90,2	91,7	91,0	89,5
12,5	9,2	91,0	92,4	91,7	89,5
15	11	91,0	92,4	91,7	89,5
20	15	91,0	93,0	91,7	90,2
25	18,5	91,7	93,6	93,0	90,2
30	22	91,7	93,6	93,0	91,7
40	30	92,4	94,1	94,1	91,7
50	37	93,0	94,5	94,1	92,4
60	45	93,6	95,0	94,5	92,4
75	55	93,6	95,4	94,5	93,6
100	75	94,1	95,4	95,0	93,6
125	90	95,0	95,4	95,0	94,1
150	110	95,0	95,8	95,8	94,1
175	132	95,4	96,2	95,8	94,5
200	150	95,4	96,2	95,8	94,5
250	185	95,8	96,2	95,8	95,0
300	220	95,8	96,2	95,8	95,0
350	260	95,8	96,2	95,8	95,0
400	300	95,8	96,2	95,8	95,0
450	330	95,8	96,2	95,8	95,0
500	370	95,8	96,2	95,8	95,0

Tabela 1: Rendimentos nominais mínimos à plena carga para motores de indução com rotor gaiola de esquilo, classe IR3 – Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC n° 1, de 29/06/2017.

### 3.3. Características de aceleração de motores elétricos

---

O conjugado (  $C$  ), também chamado de torque (  $T$  ), momento ou binário, é o produto da Força (  $F$  ) aplicada pelo deslocamento (  $d$  ), ou seja, é a medida do esforço necessário para girar um eixo.

#### **$C = F \cdot d$ [Newton-metro]**

Quando se deseja escolher um motor elétrico para acionar uma determinada carga, é necessário conhecer o conjugado requerido pela carga e a rotação que esta carga solicita em condições normais. A potência nominal do motor é dada pela equação:

$$P_{N \text{ motor}} = 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{motor}} \cdot C_{\text{motor}}$$

Se o acoplamento for com redução de velocidade, deve-se levar em consideração a relação entre as velocidades e o rendimento do acoplamento ( $\eta_{AC}$ ). O rendimento do acoplamento ( $\eta_{AC}$ ) é a relação entre a potência transmitida à carga ( $P_{\text{carga}}$ ) e a potência útil no eixo do motor ( $P_{\text{útil-motor}}$ ).

$$\text{Matematicamente: } \eta_{AC} = (P_{\text{carga}} \div P_{\text{útil-motor}})$$

Para especificar um motor para acionar uma bomba centrífuga, por exemplo, utiliza-se a equação que relaciona a massa específica ( $\rho$ ), a aceleração gravitacional ( $g$ ), a altura manométrica ( $h$ ) e a vazão da bomba ( $Q$ ), levando em consideração também o rendimento da bomba ( $\eta_{\text{bomba}}$ ).

$$\text{Matematicamente: } P_{\text{útil-motor}} = (\rho \cdot g \cdot h \cdot Q) \div \eta_{\text{bomba}}$$

Em aplicações com conjugado ( $C$ ) constante e nas quais se conhece a velocidade angular é possível determinar a potência utilizando a seguinte equação:

$$P_{\text{útil-motor}} = C \cdot \omega_m \text{ [W] ;}$$

onde  $\omega_m$  é a velocidade real do motor, expressa em radianos por segundo, ou

$$\omega_m = (\pi \div 30) \cdot n \text{ [rad/s]; sendo } n \text{ a velocidade do motor em rpm.}$$

Usando a nomenclatura de Torque ( $T$ ), como apresentada nas Figuras 5b e 5c, tem-se:

$$P_{\text{útil-motor}} = T \cdot \omega_m \text{ [W]}$$

Quando o MIT está operando em vazio o torque eletromagnético (interno) simplesmente assume o valor necessário para superar as perdas rotacionais ( $\Delta P_{AV}$ ), devidas ao atrito e a ventilação. Se a carga mecânica é em seguida aplicada ao eixo do motor, a reação inicial é que a carga no eixo reduz a velocidade ( $n$ ) do motor ligeiramente e, desta forma, aumenta o escorregamento ( $s$ ). O escorregamento aumentado faz com que, conduz ao aumento grau de concatenação do fluxo magnético (campo girante) na bobina ( ou gaiola) do rotor, causando o conseqüente aumento da corrente elétrica  $I_2$  até o valor que dê torque suficiente para fornecer um equilíbrio de potência à

carga. Dessa forma, o equilíbrio é estabelecido e a operação continua em um valor particular de escorregamento ( $s$ ).

O modelo de circuito elétrico equivalente de operação do MIT apresentado na Figura 5 b permite essa análise. É possível assim compreender que, para cada valor da carga mecânica necessária, há um valor único de escorregamento ( $s$ ). Portanto, em suma, uma vez que o escorregamento ( $s$ ) é especificado, conseqüentemente, ficam determinados a potência de entrada ( $P_{Ele (in)}$ ), a corrente elétrica no rotor ( $I_2$ ), o torque desenvolvido ( $T$ ), a potência de saída ( $P_{útil (out)}$ ) e o rendimento ( $\eta$ ) do motor nessa condição específica de trabalho ou carregamento.

Obviamente, na velocidade síncrona ( $n_s$ ) o MIT tem conjugado igual a zero. Não se pode esquecer nessa condição não há fluxo magnético concatenando as espiras das bobinas (ou gaiola) do rotor e, portanto,  $I_2$  é nula. Essa situação é hipotética, pois o atrito rotacional é um conjugado resistente suficiente para ter um pequeno escorregamento.

À medida que a carga aumenta, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor e queimar as bobinas.

A variação do conjugado ( $C$ ) em relação à velocidade para um motor normal é apresentada na figura 8.

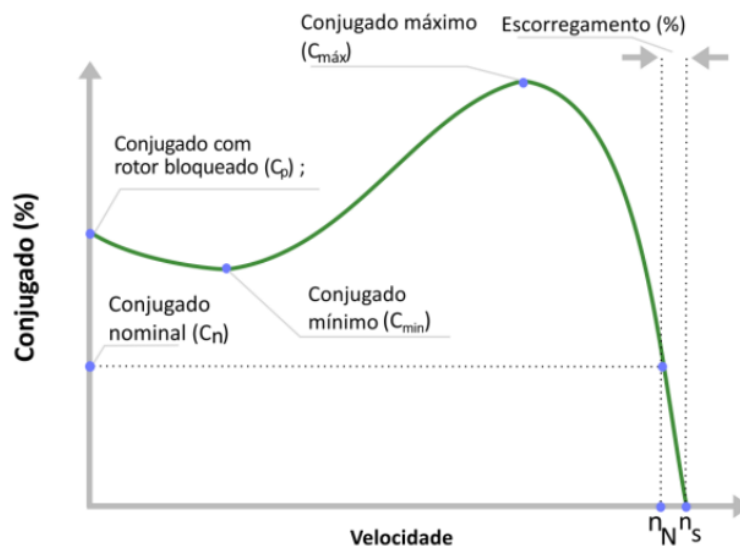


Figura 8: Curva característica Conjugado x Rotação de motores de indução

**Os pontos notáveis da curva são caracterizados como:**

$C_N$  : Conjugado nominal ou de plena carga - é o conjugado desenvolvido pelo motor à potência nominal, sob tensão e frequência nominais.

$C_p$ : Conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de partida ou de arranque - é o conjugado mínimo desenvolvido pelo motor bloqueado, sob tensão e frequência nominais. Na partida o torque (ou conjugado) desenvolvido pelo motor deve ser maior que o torque resistente da carga.

$C_{min}$ : Conjugado mínimo - é o menor conjugado desenvolvido pelo motor ao acelerar desde a velocidade zero até a velocidade correspondente ao conjugado máximo. Na prática, este valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração, para que a partida não seja muito demorada, sobreaquecendo o motor, o que significa perdas de energia.

$C_{máx}$ : Conjugado máximo - é o maior conjugado desenvolvido pelo motor, sob tensão e frequência nominal, sem queda brusca de velocidade.

$C_o$ : Conjugado básico - é o conjugado calculado em função da potência e velocidade síncrona.

O ponto de equilíbrio do acionamento de um motor, ou ponto de operação, acontecerá quando o torque acelerador for nulo, ou seja, quando o conjugado resistente for igual ao do motor ( $C_{motor} = C_{resistente}$ ), porém sentidos opostos. Nesse momento, a princípio a velocidade torna-se constante.

A figura 9 apresenta a característica do conjugado em relação à velocidade em um MIT na condição de partida com carga até atingir a situação de regime ou operação ( $C_{motor} = C_{resistente}$ ).

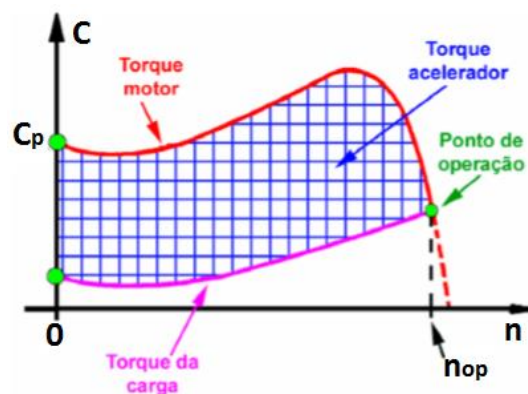


Figura 9: Característica Conjugado x Rotação para partida com carga

Para cada motor em específico existirá sempre um ponto de operação nominal que deverá ser fornecido pelo fabricante, correspondendo a um conjugado nominal ( $C_N$ ) e a um escorregamento nominal ( $s_{nom}$ );

### 3.3.1 Categorias da relação conjugado e velocidade para MITRGE

Conforme as características de conjugado em relação à velocidade e corrente de partida, os motores de indução trifásicos com rotor de gaiola são classificados

em 3 principais categorias, cada uma adequada a um tipo de carga. A utilização de um motor de categoria inadequada à carga ou regime de trabalho costuma também ser fator de redução do rendimento operacional do motor, portanto, de desperdício de energia.

Motores da categoria N são caracterizados por possuírem um conjugado de partida normal, corrente de partida normal e pequeno valor de escorregamento em regime permanente. Constituem a maioria dos motores encontrados no mercado e prestam-se ao acionamento de cargas normais, com baixo conjugado de partida como: bombas, máquinas operatrizes e ventilados.

Motores da categoria H são caracterizados por possuírem um conjugado de partida elevado, corrente de partida normal e baixo valor para o escorregamento em regime permanente. Esta categoria de motores é utilizada para acionamento de cargas que exigem maior conjugado de partida, como peneiras, transportadores carregados, cargas com alta inércia, britadores etc.

Motores da categoria D são caracterizados por conjugado de partida elevado, corrente de partida normal e alto escorregamento. Utilizados para acionamento de cargas como: prensas excêntricas e máquinas semelhantes, em que a carga apresenta picos periódicos. Também, são utilizados para cargas que necessitam de conjugado de partida elevado e corrente de partida limitada.

As curvas conjugadas em função da velocidade das 3 categorias principais de MIT são apresentadas na figura 10.

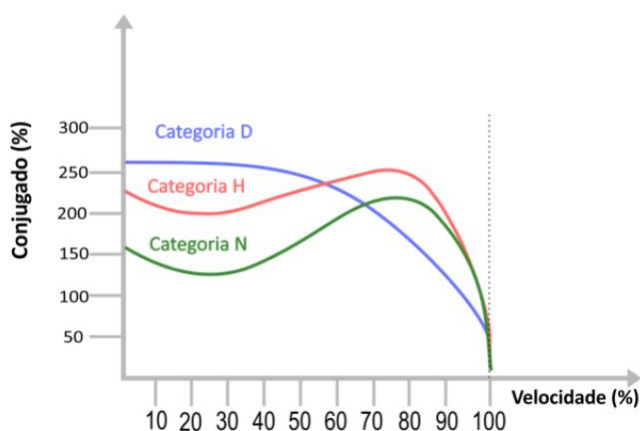


Figura 10: Curvas Conjugado x Velocidade, das diferentes categorias de MIT com rotor gaiola

Conforme apresentado anteriormente, quando se deseja escolher um motor para acionar uma carga é necessário conhecer o conjugado requerido por ela bem como a rotação. O acoplamento da carga ao motor pode ser direto ou por meio de redutores (O redutor, que pode ser formado por engrenagens ou polias, pode ser arranjado tanto de forma a reduzir a rotação do eixo de acoplamento entre carga e motor quando aumentá-la).

No acoplamento direto, o eixo do motor é ligado ao eixo da carga diretamente. Neste caso o conjugado nominal da carga ( $C_C$ ) é o próprio valor do conjugado nominal oferecido pelo motor ( $C_N$ ).

$$C_N = C_C \text{ [N.m]}$$

Quando se usa redutores, a relação entre conjugado de carga e do motor passa a depender do rendimento do acoplamento e também da relação de velocidades entre o eixo do motor e o da carga a ser acionada.

$C_N = [(1/\eta_{AC}) \cdot (n_C/n_M)] \cdot C_C \text{ [N.m]}$ ; onde:  $C_N$  é conjugado nominal do motor;  $C_C$  é o conjugado nominal da carga;  $n_C$  é a rotação da carga;  $n_M$  é a rotação do motor; e  $\eta_{AC}$  é o rendimento do acoplamento.

O descuido do conhecimento da característica é causa comum para sobre dimensionar motores, pois nesse caso é comum usar fatores de segurança inadequados. Basicamente, os tipos de cargas industriais têm o comportamento do conjugado ( $C$ ) e da potência ( $P$ ) requeridos pela carga em função da velocidade rotacional ( $n$ ) conforme curvas apresentadas na figura 11.

Considerando a equação geral do conjugado de carga:  $C_C = C_0 + k_C \cdot n^\chi$ ;

onde:  $C_C$  é o conjugado de carga nominal;  $k_C$  é a constante específica da carga;  $C_0$  é o conjugado de partida;  $n$  é a velocidade de rotação da carga;  $\chi$  é o fator característica da carga.

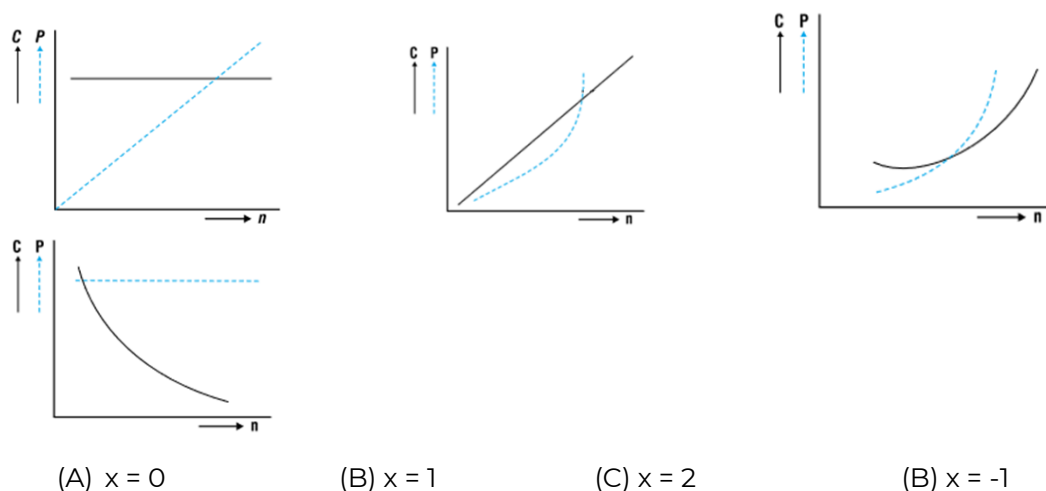


Figura 11: Conjugados ( $C$ ) e Potência ( $P$ ) em função da velocidade rotacional ( $n$ ) requerido por cargas típicas industriais.

As cargas cujas características correspondem às curvas apresentadas na figura 10, respectivamente, são:

- (A)  $\chi = 0$ ;  $C$  (constante) e  $P$  (proporcional a  $n$ ): Pontes rolantes, esteiras, guinchos, elevadores e semelhantes;



- (B)  $x = 1$ ; C (proporcional a  $n$ ) e P (proporcional a  $n^2$ ): Moinhos de rolo, bombas de pistão, plainas e serras;
- (C)  $x = 2$ ; C (proporcional a  $n^2$ ) e P (proporcional a  $n^3$ ): Ventiladores, misturadores, bombas centrífugas, exaustores e compressores; e
- (D)  $x = -1$ ; C (inversamente proporcional a  $n^2$ ) e P (constante): Máquinas operatrizes, frezadoras, mandriladoras e bobinadeiras.

### 3.4. Curvas de operação na avaliação do desempenho de motores

---

“Em plantas industriais de diversos segmentos é muito comum encontrar motores operando fora da sua faixa ideal de carga, tanto abaixo quanto acima. As causas principais podem ser a necessidade de uma maior potência para partida de cargas com alta inércia, uma urgência de manutenção que na pressa para restabelecer a produção se utilizou de um motor maior disponível no estoque, ou ainda compensação de incertezas durante a fase de projeto.” [18]

Um motor sobre dimensionado, por exemplo, resulta em considerável prejuízo do rendimento ( $\eta$ ) e do fator de potência ( $\cos\phi$ ), pois opera fora da faixa operacional ótima. Pode-se constatar isso por meio da análise das curvas características de operação do MIT.

Salienta-se que, menor rendimento ( $\eta$ ) implica ter custos desnecessários com energia elétrica; menor fator de potência ( $\cos\phi$ ) implica em necessidade de correção (instalação de banco de capacitores) e riscos de sobre tarifação por exceder limite de potência reativa ( $Q [VA_R]$ ), além do aumento de perdas internas à planta industrial a depender do ponto em que são instalados os capacitores e da, conseqüentemente, necessidade de aumento da demanda contratada com a concessionária de serviços públicos de distribuição de energia elétrica.

Os fabricantes de motores elétricos apresentam diagramas das curvas características de desempenho dos motores elétricos. Nestes diagramas, em função da proporção da potência de trabalho ( $P_T$ ) em relação à potência nominal ( $P_N$ ), são apresentadas: i) a curva do rendimento ( $\eta$ ); ii) a curva do fator de potência de operação do motor ( $\cos\phi$ ); iii) a curva do escorregamento ( $s$ ); e iv) a curva da corrente elétrica ( $I$ ), em Ampère. Essas curvas são construídas com base em ensaios realizados segundo normas, para cada série de motores novos e, em condição de suprimento de energia elétrica na tensão nominal. Salienta-se que, mesmo um motor novo, caso o nível de tensão do ponto de suprimento do motor não estiver de acordo com a tensão nominal do motor, este não terá o desempenho esperado conforme representado na curva. A figura 12 apresenta um exemplo de diagrama de curvas características de um Motor de Indução

Trifásico com Rotor Gaiola de Esquilo (MITRGE) de 40cv, 4 polos, 440Volts, classe IR3.

O conhecimento das curvas características de desempenho de placa dos motores elétricos é fator extremamente importante e permite a realização de análise de carregamento destes.

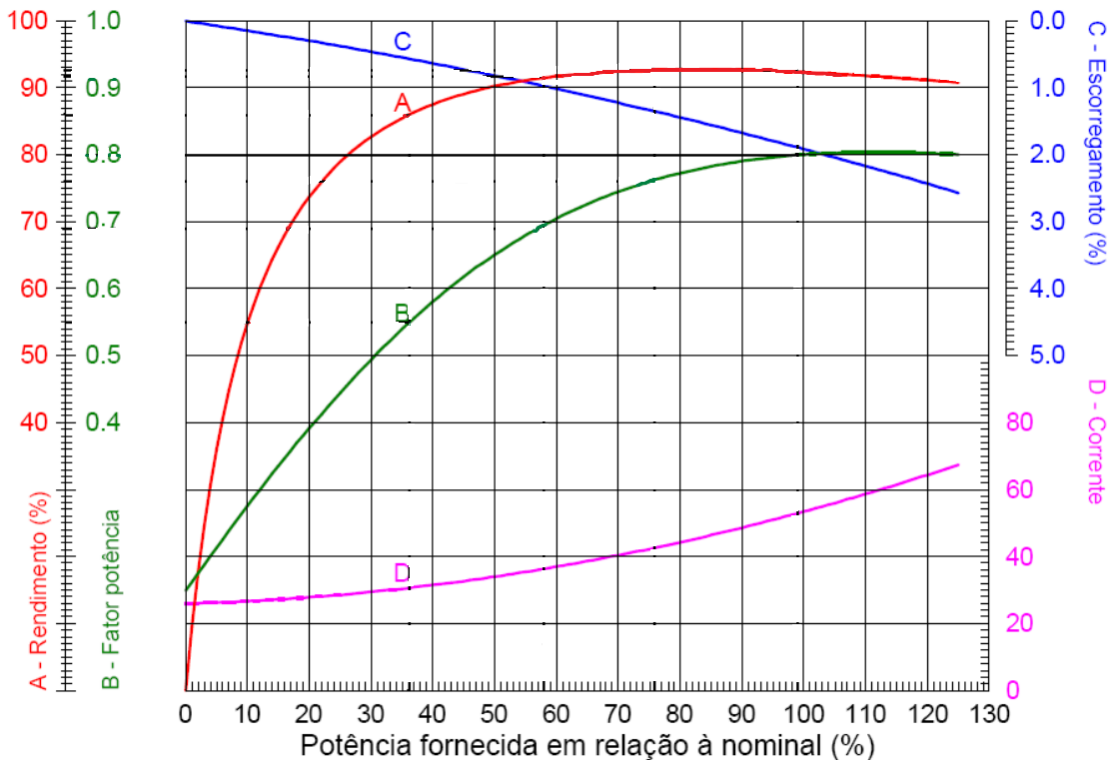


Figura 12: Curvas características de um MITRGE de 40 cv, 4 polos, 440Volts, classe IR3.

Tomando para análise as curvas características apresentadas na Figura 12, pode-se observar que quanto menor for a carga, ou seja, a potência requerida ao motor pela carga em relação à nominal, menores serão os valores de rendimento ( $\eta$ ) e de fator de potência ( $\cos\phi$ ) do motor. O rendimento também decresce quando o motor opera acima da sua carga nominal. Nesse caso, além da piora do rendimento, tem-se uma redução considerável de vida útil do motor.

Na absoluta maioria dos casos, a faixa ótima para operação está entre 75 e 100% de carregamento, pois indica na curva de rendimento a região mais estável, que coincide ser a região em que está o ponto de máximo rendimento. Como descrito anteriormente, ao se tratar da análise das componentes de perdas do motor em função do carregamento, representada pela figura 6, o ponto de máximo rendimento ocorrerá quando as perdas que variam de forma diretamente proporcional ao carregamento no eixo do motor corresponder ao

valor das perdas que não variam em função da carga, ditas constantes, quais sejam: perdas no ferro ou núcleo e perdas rotacionais (atrito e ventilação).

Nos casos em que a carga exija do motor a operação com alta frequência de paradas e partidas, que fará com que em grande parte do tempo o motor não esteja em regime estável de carga, a aderência das curvas características pode não representar fielmente a realidade operacional. As constantes paradas e acelerações resultarão em operação em regime transitório pelo tempo correspondente destas. Em termos médios significa que, em grande parte do tempo o motor opera fora da faixa ideal de trabalho em regime (75% a 100%). Além disso, a elevada corrente de partida, frequentemente exigida pelo motor por operar em liga e desliga, causará sobreaquecimento deste e piora considerável do rendimento ( $\eta$ ).

A substituição de um motor que opera com “folga” por outro, cuja potência foi adequada à que é exigida pela carga, fará com que o motor novo opere dentro da sua faixa ótima da curva de rendimento, o que permite melhoria significativa deste e do fator de potência, quando comparado com a simples substituição por outro motor mais eficiente e de mesma potência.

A consequente expressiva economia de energia resulta em menor *payback period* e *energy payback time*. Este pode ser usado como parâmetro para avaliar em quanto tempo de operação o motor, mais eficiente, “devolve” ao ambiente a energia que se gastou para produzi-lo. Em outras palavras, *energy payback time* se daria quando a quantidade de energia poupada pela substituição corresponder à quantidade de energia consumida em todo o processo desde sua fabricação dos componentes, montagem do motor, transporte e instalação.

É a partir desse momento que se começa obter os benefícios em termos de redução de impactos ao meio ambiente. É a partir desse momento que a energia que deixou de ser desperdiçada pode, ou justifica, que seja precificada e considerada na análise imprescindível à decisão em aportar recursos financeiros, ou melhor, investir em um projeto de eficiência energética.

### 3.4.1 Avaliação do percentual de carregamento de motores

O conhecimento do percentual de carregamento em que um motor está submetido é de suma importância em um estudo de eficiência energética. A depender do ponto de trabalho de um motor em relação aos valores nominais (ou de placa) têm-se variações enormes no índice de rendimento operacional do motor.

Quanto menor for a carga operacional em relação à nominal do motor menor será o rendimento. Diante desse fato é necessário conhecer a potência de trabalho.

Para conhecer a real potência de carregamento de um motor em operação pode ser empregado vários métodos. Alguns complexos ou mais simples e rápidos. Como a potência de trabalho cujo rendimento é máximo, normalmente, está na faixa de 75% a 100% e que, nesta faixa o rendimento quase constante, não há a necessidade do emprego de métodos complexos.

Um método relativamente simples e diligente, por exemplo, consiste em aplicar uma técnica consiste em medir, pelo menos, a corrente elétrica absorvida pelo motor em situação real de trabalho e a correspondente velocidade ( $n$ ), em rpm. Passo seguinte bastaria conhecer as curvas características do motor para saber o percentual de carregamento deste. Dispondo-se de Amperímetro tipo alicate e tacômetro digital é possível fazer uma avaliação preliminar.

Como exemplo, suponhamos que o motor que se esta por determinar o carregamento seja o motor de 40 cv – 4 polos, cujas curvas característica são apresentadas na figura 12. Para valores medidos de corrente  $I_{IN} \approx 52$  A e  $n \approx 1764$  rpm, facilmente se obteria pelas curvas que o motor esta a operar a plena carga, ou seja, com o valor de potência correspondente à nominal. Observe que, para ambos parâmetros,  $I_{IN} \approx 52$  A e  $n \approx 1764$  rpm ( $s \approx 2\%$ ), chega-se ao mesmo valor de carregamento (100%). Conhecendo o carregamento, concluiu-se que o rendimento  $\eta \approx 94\%$  e o fator de potência  $\cos\phi \approx 0,8$ .

Analogamente, podemos afirmar que, se valores medidos de corrente  $I_{IN} \approx 37$  A e  $n \approx 1782$  rpm, o motor estaria operando à meia carga (60%), que permite concluir que o rendimento ( $\eta \approx 91,5\%$ ) é 2,5% menor do que o de placa. Também o fator de potência caiu para  $\cos\phi \approx 0,8$ . Essa situação de carregamento, dependendo do regime de operação da carga, já pode ser fator de indícios que se podem obter bons resultados com investimento em eficiência energética.

Caso os valores medidos tivessem sido, por exemplo,  $I_{IN} \approx 40$  A e  $n \approx 1782$  rpm, constata-se incongruência nas medidas em relação ao carregamento. Pela corrente tem-se 70% de carregamento e pela rotação 60% de carregamento. Nesse caso é preciso checar se houve erro de leitura ou se as curvas não são próprias do motor em análise. Descartadas essas hipóteses, pode-se pensar que o motor não mais atende as especificações de placa, quer seja, por estar impregnado de poeira, por ter sido rebobinado ou tenha passado por situações de sobrecarga que alterou, nestes casos para pior, as condições de resistividade do cobre aumentando as perdas, por isso uma potência de entrada maior, pois esta é diretamente proporcional ao valor de  $I_{IN}$ .

Para dirimir dúvidas quanto à fidelidade das medições relatadas no parágrafo anterior, é conveniente também medir a potência absorvida e a tensão da rede elétrica com o motor em operação – as curvas características são construídas pelos fabricantes com base em valor de tensão nominal de suprimento. Dispondo-se de Amperímetro e Wattímetro tipo alicate, tacômetro digital e Voltímetro já se pode aplicar a técnica. Consultorias especializadas já dispõem de equipamentos com sistemas de aquisição de dados que sistematizam e otimizam a operação de obtenção desses dados de operação.

Outras técnicas são aplicáveis, tais como, o método da linearização que é baseado no fato de que a curva conjugado versus velocidade de rotação na região de operação ( $n_N \approx R_{op} \approx n_S$ ). A maioria das técnicas necessita de pessoal especializado e de instrumentação apropriada, assim nos furtaremos em descrevê-las. Por ora é suficiente que o gestor de uma planta industrial saiba que há métodos de identificação de perdas, há consultorias especializadas para prestação do serviço técnico e de estudo de eficiência energética, portanto, não é necessário tirar um colaborador não especializado da produção para realizar o estudo.

O conhecimento do carregamento dos motores é importante. Contudo, esse conhecimento não identifica situações de ineficiência da planta industrial ou do sistema motriz com um todo. Avaliando o processo, costumeiramente, são identificadas ineficiências no sistema, sendo que estas devem ser primeiramente corrigidas e depois partir para a análise de qual seria o motor ideal à nova carga.

Uma prática comum, porém, equivocada, para avaliar o nível percentual de carregamento de um motor em operação, é comparar o valor de medição de corrente elétrica absorvida pelo motor em condições de trabalho com o valor nominal declarado na placa de identificação do motor. Essa simples comparação, de que uma corrente elétrica absorvida igual a 50% do valor da corrente nominal de placa corresponde a um percentual de carregamento de 50%, como apresentada anteriormente é equivocada. Não considerar o formato não linear da curva característica do motor, resulta em erro considerável e que não deve ser admitido, pois não traduz a condição real de carga a qual o motor está submetido.

Tomemos como exemplo a curva característica de um MIT de 40 cv (30 kW), 440 Volts e de 4 polos, classe IR3 (figura12). Constata-se pela curva característica que se o referido motor estiver, em regime de operação, absorvendo a metade do valor da corrente nominal, o percentual de carga é de aproximadamente 23% e não 50% como poderia se esperar. Nessa condição de operação contrariamente ao que se pensou – operação com 50% de carregamento e rendimento 90% - o motor está superdimensionado e operação com um rendimento de 77%, ou seja, 17% menor do que o rendimento nominal de 94%. O fator de potência ( $\cos\phi$ ) de 0,8 “despenca” para algo em torno de 0,43. Na figura 13 estão ilustrados esses pontos notáveis de operação.

### 3.4.2 Exemplo de aplicação

---

#### Exemplo 1:

Em uma situação hipotética, suponhamos que se pretendesse substituir um motor de 40 cv, 4 polos, em operação a um certo tempo (classe IR1) por outro

mais eficiente (classe IR3). O processo industrial requisita que o motor opere em carga por 4.000 horas por ano e que o custo com a energia elétrica, incluindo tarifa, encargos e tributos, fosse de R\$ 0,65 por kWh. Qual seria o resultado (ganho) de economia linear na conta de luz?

Dados:

- i) Um motor IR1 de 40 cv, 4 polos tem rendimento nominal de  $\eta_N = 0,89$ ;
- ii) As curvas características do motor de classe IR3 de 40 cv, 4 polos são as apresentadas na figura 12

### Solução:

A simples substituição do motor de IR1 por um novo classe IR3 traria a seguinte economia:

$$P_{Ele} = P_{\text{útil}} \div \eta = 30\text{kW} \div 0,89 = 33,71 \text{ kW}$$

$$\text{(IR1)} \sum P_{\text{Perdas}} = 3,71 \text{ kW}$$

$$P_{Ele} = P_{\text{útil}} \div \eta = 30\text{kW} \div 0,941 = 31,88 \text{ kW}$$

$$\text{(IR3)} \sum P_{\text{Perdas}} = 1,88 \text{ kW}$$

$$\Delta E = \Delta P_{\text{Perdas}} \cdot t_{op} = 1,83 \text{ kW} \cdot 4.000\text{h/ano} = 7.320 \text{ kWh/ano}$$

$$\text{Desperdício (R\$)} = 7.320 \text{ kWh/ano} \cdot \text{R\$ } 0,65/\text{kWh} = \text{R\$ } 4.758,00/\text{ano}$$

Considerações acerca do exemplo:

- i) Somente pela simples substituição já se tem um ganho considerável. A depender do custo do motor novo, ter-se-á um *payback time* adequado.
- ii) Pelo tempo médio de vida dos motores em operação na indústria brasileira, que é 17 anos, que há uma parcela de motores instalados antes de 2001 – quando não havia exigência legal de índice de eficiência energética, e que também, a maioria dos motores industriais entrou em operação antes de 2009, período em que só se exigia IR1, infere-se haver grande potencial de ganho na troca de motores em operação por novos de melhor rendimento.
- iii) É comum que a melhora do índice de rendimento por si só viabilize que atroca do motor seja por outro de menor potência (mais barato). Isso se constata quando o motor “velho” esteja operando com carregamento inferior ao percentual de variação das potência nominais de fabricação. No caso, 40 cv, teria que estar com um carregamento “x”, no máximo,  $x=75\%$ , para poder ser substituído por um novo de 30 cv ( $40 \cdot 0,75$ ).



## Exemplo 2,

### Tomou-se a liberdade de tratar a descrição desse exemplo de forma lúdica!

Em uma situação hipotética, um gestor de uma planta industrial tomou conhecimento da evolução da tecnologia de motores elétricos quanto aos índices de rendimento. Em sua fábrica havia motores de 40 cv, 4 polos e classe IR1 tal como o descrito no exemplo 1. Muito astuto, o “Zé gestor” consultou a Portaria Interministerial nº 1, de 2017, e leu os valores de rendimento do motor de 40 cv com 4 polos. Constatou que a troca do velho 40cv(IR1) por um novo 40cv(IR3) traria um ganho de rendimento de 5%. Logo fez “uma continha de padaria” e chegou a um valor de resultado anual igual a R\$ 4.758,00 (vide exemplo 1)

Empolgadíssimo, o “Zé gestor” correu a contar para o diretor que imediatamente pediu para incluir na pauta da reunião do conselho a fabulosa ideia de trocar todos os 500 motores de 40 cv da fábrica. Todos os 500 motores faziam exatamente a mesma operação motriz fabril.

Na reunião de Conselho: *“Prezados membros do Conselho, realizamos estudos e pretendemos trocar todos os 500 motores de 40 cv IR1”,* disse aos conselheiros. Essa fala, IR1 já deixou os conselheiros fragilizados – a ignorância ou simplesmente o receio de que as pessoas achem que somos ignorantes nos torno torna tímidos. O diretor percebendo a fragilidade dos conselheiros concluiu: *“Os IR1 serão trocados por IR3. Estes são “o bicho” são tão eficientes que quase destroem a Lei da Conservação de Energia. Os do tipo IR3 conseguem realizar o trabalho duro na fábrica de forma mais silenciosa e possibilitará economia anual com energia elétrica de R\$ 2,38 milhões”.*

O diretor saiu tão aplaudido da reunião que até ficou encorajado de pedir aumento de salário para seus colaboradores de chão de fábrica e, em especial para o “Zé Gestor”. Antes que a última palma entoasse o característico som, o diretor emendou: *“- Ah! Tem mais, vamos ter selo verde de processo eficiente e ganharemos créditos ambientais e nossa área de marketing vai colocar isso no slogan da companhia. Até a holding vai poder se usufruir”.*

O “Zé gestor” quase desmaiou. Já imaginou o percentual de seu aumento de salário: “Aumento de salário de 25% nos dias de hoje”.

Então iniciaram as ações em pro da substituição. Solicitaram para a área de compras: 500 motores de 40 cv IR3.

Para o “Zé gestor” as coisas estavam como um conto de fadas. Foi pra casa feliz da vida. Dormiu como um anjo. Contudo, na vida real o Zé tinha se esquecido de uma coisa importantíssima.

Já na cama pra dormir o Zé adormeceu pensando em toda sua carreira exitosa.

Daí por diante, em sonho, se recordou de quando ele havia iniciado na empresa por meio de uma seleção criteriosa. Veio a mente que quando ele iniciou na fábrica os motores já estavam lá. O agora “Zé negligente” não havia checado o

carregamento de trabalho dos motores. Uma voz foi soprada em seu ouvido: Zé, Zé. Zé bastaria você ter checado o carregamento de 1 motor. Todos os 500 são irmãos gêmeos. Lembrou nesse momento que tinha lido em um relatório antigo de um consultor técnico que tinha sido contratado para readequar a fiação elétrica da fábrica e, neste, tinha descrito que a corrente elétrica em cada motor era de 26 Ampères.

O Zé, bom de conta de cabeça, lembrou-se da “conta de padaria” fez a conta considerando a corrente elétrica para 40 cv e concluiu que 26 Ampère corresponde à metade (vide a seguir), ou seja, 50% de carregamento.

$$P_{\text{útil(out)}}[\text{cv}] = [\eta * (\sqrt{3} * V_L * I_L * \cos \varphi)] \div 736$$

$$I_N = (30.000 \text{ W}) \div (0,941 * \sqrt{3} * 440 * 0,8) \simeq 52 \text{ A}$$

Antes que o “Zé negligente” se tornasse “Zé imperício”, novamente uma voz lhe falou: “Zé lembre-se das curvas características do motor”.

Com a “cabeça a milhão”, o Zé imprudente” construiu as curvas dadas na figura 13, refez as contas e constatou:

Avaliemos a substituição dos 500 motores de 40 cv IR1 operando com a metade da corrente nominal, portanto com 23% de carregamento, para os IR3.

Considerando que o motor de 40 cv IR1 não é o que está representado na figura 13 (IR3), mas sabe-se que um motor IR1 de 40 cv, 4 polos tem  $\eta_N = 0,89$ , que é 5% inferior ao do IR3 (0,94). Também, levando-se em conta que a representação da corrente de 26 A na curva do motor IR3 resulta em um rendimento  $\eta_{IR3}$  (23%pc) = 77%, para a análise considerou-se a redução também de 5% sobre o  $\eta_{IR3}$  (23%pc), resultando em  $\eta_{IR1}$  (23%pc) = 72%, portanto, tem-se:

$$P_{\text{Ele}} = P_{\text{útil}} \div \eta = 6,9 \text{ kW} \div 0,72 = 9,58 \text{ kW}$$

$$\sum P_{\text{Perdas}} = 2,68 \text{ kW (IR1)}$$

Substituindo o motor por outro de 40 cv IR3

$$P_{\text{Ele}} = P_{\text{útil}} \div \eta = 6,9 \text{ kW} \div 0,77 = 8,96 \text{ kW}$$

$$\sum P_{\text{Perdas}} = 2,06 \text{ kW (IR3)}$$

$$\Delta E = \Delta P_{\text{Perdas}} * \text{top} = 0,62 \text{ kW} * 4.000 \text{ h/ano} = 2.480 \text{ kWh/ano}$$

$$\Delta \text{ Desperdício (R\$)} = 2.480 \text{ kWh/ano} * \text{R\$ } 0,65/\text{kWh} = \text{R\$ } 1.612/\text{ano}$$

Para os 500 motores, uma misero resultado de R\$ 806 mil/ano. Capaz! Não paga nem o custo!

Não precisa nem dizer o que aconteceu com o Zé Gestor!!!

“- Acorda Zé! Acooorrrda!! Vai chegar atrasado ao trabalho. Agora que recebeu aumento não é de bom-tom chegar atrasado.”

O pesadelo deixou o Zé com a “pulga atrás da orelha”. Logo quando chegou, o pessoal do faturamento que já sabia pela “rádio peão” que o Zé andou falando

de troca de motores para reduzir consumo de energia elétrica, tão logo viram um envelope diferente do padrão da conta de luz, pensaram: “- A Enel já foi informada pela “rádio peão” por meio do leiturista, que a ideia do Zé teve aprovação e que os motores não vão mais consumir energia, portanto o leiturista da Enel não tendo mais leitura a fazer “tá no olho da rua. Isso é carta da Enel para o diretor pedindo a cabeça do Zé.”

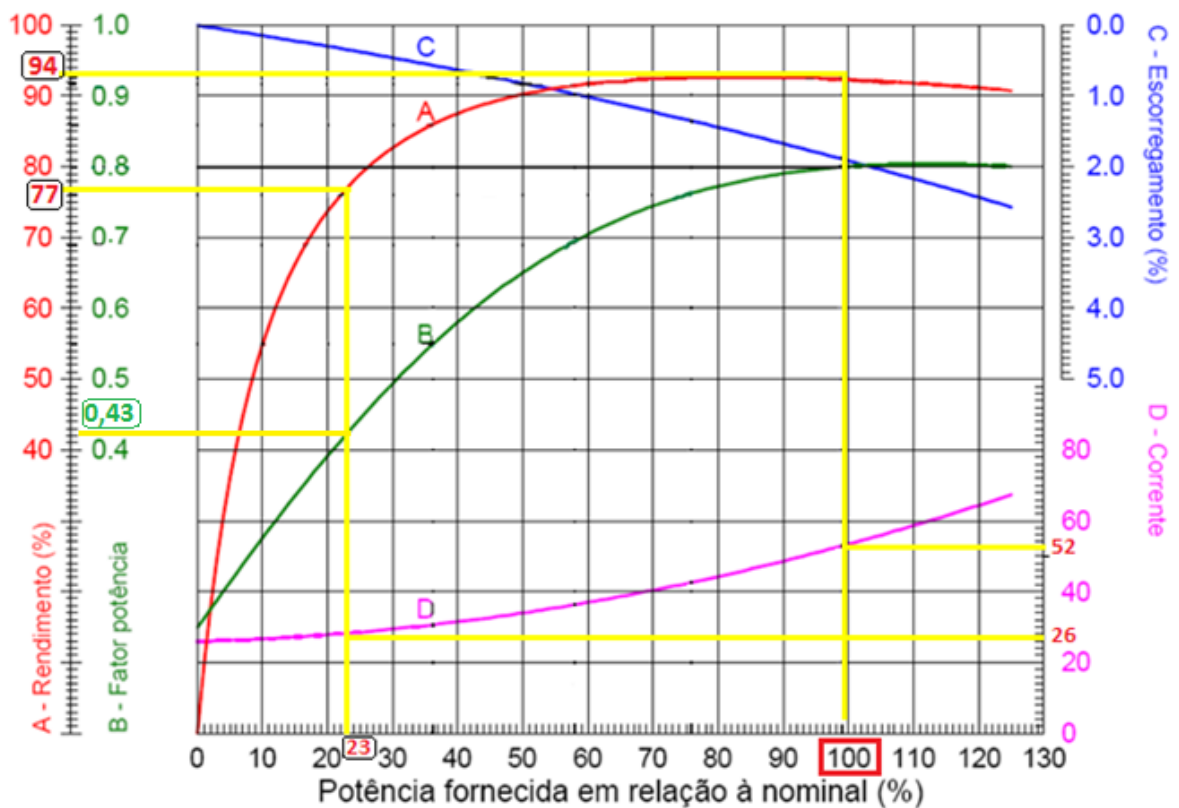


Figura 13: Caracterização de condição de sobre dimensionamento de motor (MITRGE de 40 cv, 4 polos, 440Volts, classe IR3).

Como o Zé era um cara carismático e altruísta o pessoal do faturamento resolveu intervir entregando a carta da Enel na mão do Zé antes que o diretor tomasse conhecimento, pois pela amizade que tinha com os caras “bam bam bans” da Enel podia “por o Zé pra correr”.

Sorte do bom José, tal como o José do Egito, Deus falou com o Zé Gestor em sonho (pesadelo!).

No envelope da Enel tinha um convite para participar de um curso EAD versando sobre eficiência energética. Além de eficiência em motores tinha na ementa que o curso abordaria eficiência em sistemas de bombeamento,

sistemas compressores de ar, iluminação, sistema de refrigeração, sistemas de vapor e processos térmicos. Até conceitos em geração solar seria abordado.

O Zé, “motivado”, pediu autorização ao diretor para fazer o curso. Comentou que ia aprender também o que é geração solar. Prontamente o diretor autorizou.

O Zé saiu preocupado pensando: “Coitado do leiturista da Enel. Com geração solar aí sim ele não terá mais trabalho. Poxa, assim até a Rosa do faturamento não terá contas de luz para pagar. *So, she will be fired!*”

Zé acreditou e confiou que Deus tinha falado no sonho que a “ideia” de trocar os motores poderia ser um fiasco. Com “pulga atrás da orelha ficou com um pé atrás”. Pediu para o comprador abortar o pedido dos motores novos até ele concluir o curso da Enel.

Por sorte, ou melhor, por Deus o Zé fez o curso e aprendeu sobre a importância de avaliar o carregamento dos motores antes da decisão de trocá-los por novos mais eficientes. Agora sabedor que não se pode fazer “conta de padaria” nessa questão de eficiência energética, contratou um especialista que o auxiliou a checar o carregamento dos motores. Resultado: 23% da potência nominal. Conclusão, motores sobre dimensionados.

#### Refez as contas:

23% de carregamento em um motor de 40 cv IR1 é igual a 9,2 cv. Portanto um motor de 10cv atenderá perfeitamente, pois operará na região ótima da curva de rendimento.

Substituindo o motor por outro de 40cv IR1 por um de 10 cv IR3:

$$P_{Ele} = P_{\text{útil}} \div \eta = 6,9\text{kW} \div 0,917 = 7,52 \text{ kW}$$

$$\sum P_{\text{Perdas}} = 0,63 \text{ kW (IR3 – 10cv)}$$

Como  $\sum P_{\text{Perdas}} = 2,68 \text{ kW (IR1 – 40cv operando com 23\% de carregamento)}$

$$\Delta P_{\text{Perdas}} = 2,05\text{kW}$$

$$\Delta E = \Delta P_{\text{Perdas}} * \text{top} = 2,05 \text{ kW} * 4.000\text{h/ano} = 8.200 \text{ kWh/ano}$$

$$\Delta \text{ Desperdício atual (R\$)} = 8.200 \text{ kWh/ano} * \text{R\$ } 0,60/\text{kWh} = \underline{\text{R\$ } 5.330,00/\text{ano}}$$

“Caramba! Vou ganhar outro aumento. Deus é comigo!” Exclamou o Zé. “Agora a substituição dos 500 motores trará resultado ainda melhor do que eu pensava. O resultado anual será de R\$ 2.665.000,00. Bom R\$ 2,665 milhões menos R\$ 2,379 milhões resulta em um perfaz um resultado adicional de R\$ 286 mil/ano.”

O Zé se pôs a pensar na estratégia para conseguir o novo aumento de salário. Chegou a pensar em dividir R\$ 286 por 14 (número de salários por ano) e morder 10% deste valor: R\$ 20,42 mil por mês. Como tinha um salário de R\$ 8 mil, queria mais R\$ 2 mil para completar. Contudo, como o fator k de encargos trabalhistas da empresa é igual era 2. E sabedor que o diretor costumava fazer essas contas

pra ver se cabe na verba de promoção um aumento de salário, o Zé temia que o diretor dissesse que daria aumento de R\$ 1 mil e o outro seria para cobrir os custos do fator k.

Mais uma vez “veio uma luz”. Pensou: “Ora se o motor de 10 cv é menor do que o de 40 cv deveria custar menos. Precificou e concluiu que os motores custam cerca de, respectivamente, R\$ 4 mil e R\$ 12 mil. Portanto cada motor sairia R\$ 8 mil mais barato. Para os 500 teria economia de R\$ 4 milhões. Dividiu esse valor por 15 anos de vida útil do motor. Dividiu novamente por 14 (salários anuais) e tirou 10%. Agora sim,  $[(R\$1.904,76 + R\$2000,00)/2] = R\$ 1.952,38$ . Agora sim terá justificativa para pedir o aumento de R\$ 2 mil. Mas ainda faltará R\$ 95,24. Foi até o diretor e este disse que só concederia um aumento de salário de R\$ 1.952,38, daria R\$ 2 mil somente se o Zé apresentasse um motivo forte. Não contando com a astúcia do Zé, o diretor foi surpreendido: “Os motores novos ocupam menos espaço, assim teremos o espaço para melhor proceder a sequência da linha de produção.” “Também, estes “bichos” novos são mais silenciosos o que vai contribuir para o melhor conforto dos operários fazendo com tenhamos melhora da produção.”

Contudo, o diretor foi categórico e disse que só número palpável o convenceria. O Zé abençoado sacou mais a arma e disse que tinha vendido os 500 motores velhos para reciclagem, que de tanto como e ação, a empresa faturou R\$ 200,00 por motor. Portanto, R\$100mil. Selou o aumento, dizendo que a ONG que havia comprado os motores, é composta de cooperativa de recicladores e estes vão obter lucro de 5 vezes mais do que pagaram pelos motores velhos. Socialmente também se teve contribuição. O Zé salientou também o aspecto de redução de impacto ambiental, os empregos gerados na fábrica de motores elétricos que, a propósito é consumidora dos produtos fabricados sob a gestão do Zé.

O Zé lembrou, por fim, informou ao diretor que o pessoal do faturamento parou de reclamar da Enel que a tarifa da energia é cara. Até nem reclamaram do aumento recente na tarifa, tão importante para remunerar adequadamente os investimentos prudentes realizados pela Enel em prol da melhoria da qualidade do serviço e, também, os custos eficientes de operação e manutenção das redes elétricas. Nem a Rosa e nem o leiturista perderam o emprego, pelo contrário, passaram a ser multiplicadores de conhecimentos em prol da eficiência energética e racionalização dos usos de energia.

### 3.5. Fatores complementares que influenciam no desempenho de motores

A tensão aplicada ao motor pode influenciar significativamente o desempenho de um motor de indução trifásico:

- Se a tensão for inferior à nominal, haverá o aumento da corrente para manter o torque necessário. Portanto, causará a elevação das perdas por efeito Joule no

estator e no rotor, provocando elevação de temperatura e redução da vida útil do motor.

- Se a tensão é superior à nominal, a corrente de magnetização irá aumentar. Assim, as perdas por histerese e correntes parasitas de Foucault, no núcleo ferromagnético serão maiores, o que mudará o ponto de carregamento ótimo na curva de rendimento que também terá sido deslocada para baixo. Também poderá para valores elevados de sobretensão causar a saturação do fluxo magnético no núcleo. Em suma, o rendimento ( $\eta$ ) e o fator de potência ( $\cos\phi$ ) diminuirão.

Na tabela 2, estão apresentados os impactos na operação do motor de indução para valores de variação da tensão de  $\pm 10\%$ .

Característica	Variação da tensão nominal	
	110%	90%
Torque - De partida, máximo e de operação.	Aumenta 21%	Diminui 19%
Rotação - Síncrona - Plena carga - Escorregamento	Não se altera Aumenta 1% Diminui 17%	Não se altera Diminui 1,5% Aumenta 23%
Rendimento - Plena carga - $\frac{3}{4}$ de carga - $\frac{1}{2}$ carga	Aumenta 0,5 a 1 ponto Pequena mudança Diminui 1 a 2 pontos	Decresce 2 pontos Pequena mudança Aumenta 1 a 2 pontos
Fator de potência - Plena carga - $\frac{3}{4}$ de carga - $\frac{1}{2}$ carga	Diminui 3 pontos Diminui 4 pontos Diminui 5 a 6 pontos	Aumenta 1 ponto Aumenta 2 a 3 pontos Aumenta 4 a 5 pontos
Corrente - Partida - Plena carga	Aumenta 10 a 12% Diminui 7%	Diminui 10 a 12% Aumenta 11%
Temperatura	Diminui 3 a 4 °C	Aumenta 6 a 7 °C
Capacidade de sobrecarga	Aumenta 21%	Diminui 19%
Ruído de origem magnética	Pequeno aumento	Pequena redução

Tabela 2: Desempenho de motores de indução em função da tensão aplicada

O desequilíbrio de tensão também provoca piora do rendimento dos motores. Tensões desbalanceadas do sistema da rede de alimentação trifásica causam a circulação de correntes desbalanceadas, que provocam o aumento das perdas nos enrolamentos do motor e aquecimento do núcleo, reduzindo sua vida útil.



### Destacam-se também como aplicações:

- Uso de chaves soft starters na partida dos motores;
- Partida sequencial e não simultânea de vários motores;
- Verificação periódica do alinhamento dos acoplamentos;
- Limpeza e lubrificação dos mancais são de extrema importância

Para motores que operam em vazio, por um longo período, deve ser analisada a viabilidade de desligá-los para evitar que operem sem realizar trabalho útil e desperdiçar energia.

Deve-se optar por desligar o motor nos casos de o consumo na partida for menor que o consumo de energia enquanto o motor estiver ocioso. Uma regra prática para realizar a avaliação é relacionar o tempo ocioso ( $T_V$ ) com o tempo de partida ( $T_P$ ). Se  $T_V$  for 10 vezes maior do que  $T_P$ , a opção em desligá-lo é eficientemente viável.

Para maior acurácia, recomenda-se para a decidir, que se aplique a seguinte relação:

$$T_V \geq 4 \cdot k \cdot T_P ; \text{ onde:}$$

$T_V$  é o tempo em vazio;

$T_P$  é o tempo de partida; e

$K$  é um fator que depende da categoria do motor.  $K = 2,5$  para a categoria N,  $k = 2,0$  para a categoria H e  $k = 1,35$  para a categoria D.

### 3.6. Operação com inversores de frequência

Os conversores ou inversores de frequência se baseiam na variação da tensão e da frequência nos terminais do motor, de modo a manter o fluxo magnético constante. Dessa forma permite variar e controlar a velocidade ( $n$ ) e/ou o torque ( $T$ ).

$$(V_{in} \div f) = \text{constante} \rightarrow \varphi_{mag} = V_{in} \div (4,44 \cdot f \cdot N)$$

Como:  $P_{\text{útil-motor}} = T \cdot \omega_m$  [W]; onde  $\omega_m = [(\pi \div 30) \cdot n]$  [rad/s]; e  $n$ (rpm) a rotação, reduzindo-se  $n$  quando necessário, reduz-se a potência.

O esquema básico de um conversor de frequência é apresentado nas figuras 14a e 14b. O inversor de frequência controla totalmente os pulsos de tensão que alimentam o motor, ou seja, faz a modulação por largura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*). Dessa maneira, controla a frequência e o nível de tensão de alimentação do motor.

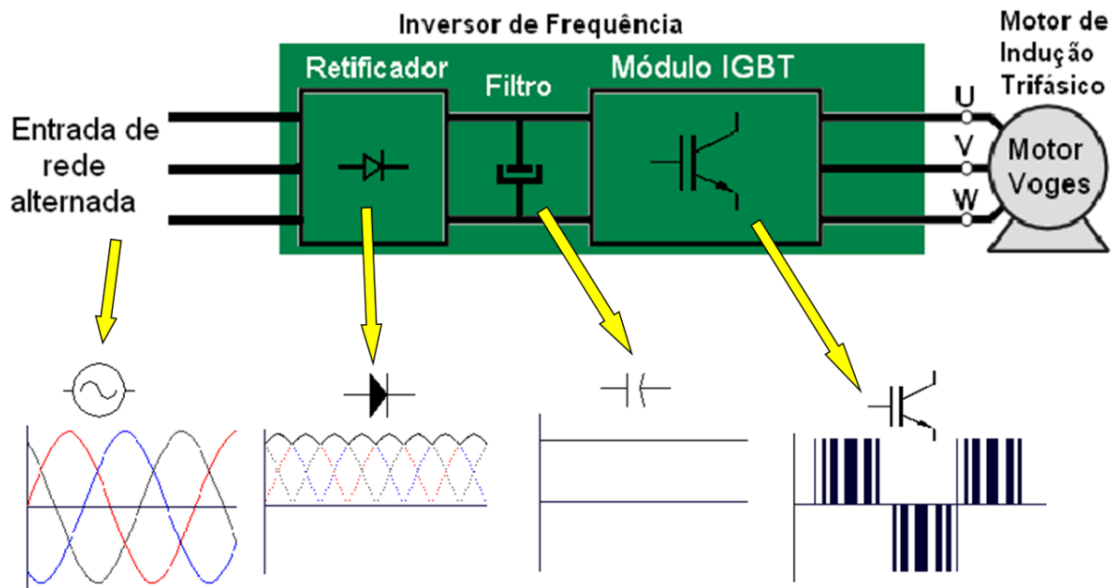


Figura 14 a: Diagrama em blocos do inversor destacando o estágio de retificação, filtragem e modulação.

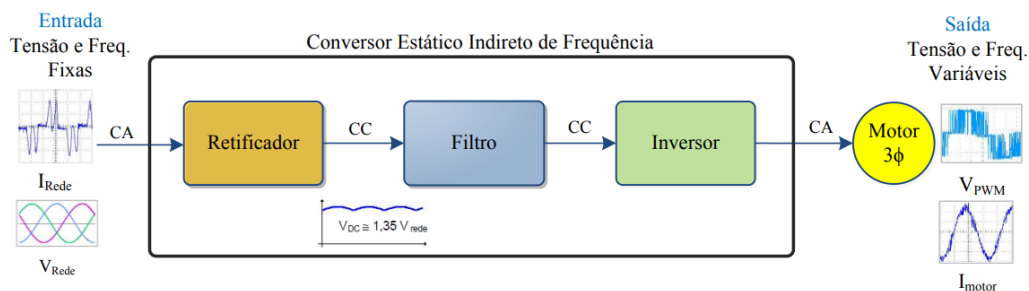


Figura 14b: Diagrama em blocos do conjunto inversor-motor.

O motor de indução, quando alimentado por um inversor de frequência, tem seu rendimento diminuído, se comparado a um motor alimentado por tensão puramente senoidal. Isso ocorre devido ao aumento nas perdas ocasionado pelas correntes harmônicas.

Isso implica no aumento das perdas no motor em torno de 15%. Logo, é necessário verificar se o motor possui capacidade de reserva para acomodar esse aumento de 15% de perdas.

Apesar do adicional de perdas de cerca de 15% adicionada pelo inversor de frequência, em grande parte das aplicações, o controle à operação da carga proporciona ganhos de eficiência energética no processo como um todo.

Nos projetos que se pretende usar inversor de frequência, deve-se considerar o adicional de perdas neste, portanto, a potência do motor deve ser calculada de acordo com a equação:

$P = 1,15 \cdot P_{ei} \cdot (n_N \div n_{min})$ ; onde:

$P_{ei}$  é a potência mínima solicitada ao eixo do rotor, em cv; e

$n_{min}$  é a velocidade mínima do motor correspondente à potência mínima solicitada, em rpm

Em estudos de desempenho de motores de indução alimentados por conversores de frequência deve-se avaliar o rendimento do sistema (inversor + motor), e não apenas o do motor [3].

A utilização do inversor de frequência possibilita controle contínuo da velocidade do motor e fornece torque constante em toda a sua faixa de rotação.

A figura 15 ilustra o a economia de energia em um sistema de regime de operação com controle por válvula e a aplicação de automação com uso de inversor de frequência. A redução de potência (acompanhamento carga) exigida do motor com o uso de inversor e reflexo na economia de energia elétrica.

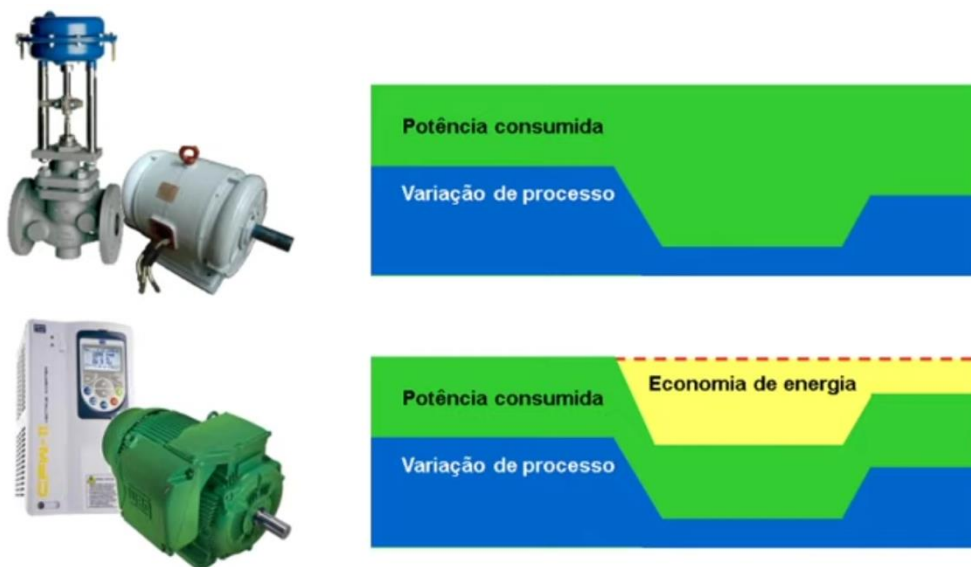


Figura 15: Diagrama representativo da economia de energia com o uso de inversores de frequência.

## Referências

---

- [1] Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018 / Empresa de Pesquisa Energética. - Rio de Janeiro: EPE, 2019.
- [2] Fonte: Balanço Energético do Estado de São Paulo 2019 - ano base 2018
- [3] O Motor Elétrico: uma história de energia, inteligência e trabalho. Projeto Editorial UNERJ: texto Joca Wolff. Jaraguá do Sul: Editora UNERJ, 2004.
- [4] Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. Fundamentos da Física 3: Eletromagnetismo. Livros Técnicos e Científicos, 1996.
- [5] HAYT, William H.; BUCK, John A. Eletromagnetismo. 7. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2008.
- [6] SIMONE, Gilio Aluisio; CREPPE, Renato Crivellari. Conversão eletromecânica de energia. São Paulo: Editora Érica, 1999.
- [7] FALCONE, Aurio Gilberto. Eletromecânica. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 2004. v.1.
- [8] Fitzgerald, A. E.; Kingsley C.; Umans, S. D. Electric Machinery. Bookman, 6ª Edição, 2006.
- [9] Kosow, I. Máquinas Elétricas e Transformadores. Editora Globo, 2000.
- [10] CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Edição. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- [11] Toro, V. D. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- [12] Mamede Filho, João. Instalações Elétricas Industriais. 9ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- [13] Eficiência energética: teoria e prática. 1ª edição. Eletrobras, Procel educação, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), FUPAI. Itajubá, MG, 2007.
- [14] Eficiência energética: fundamentos e aplicações. 1ª edição. Elektro, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Excen, FUPAI. Campinas, SP, 2012.
- [15] Guia Operacional de Motores Elétricos, Cepel-Eletobrás.
- [16] Guia Operacional de Acionamentos Eletrônicos, Cepel-Eletobrás.
- [17] Catálogo Geral de Motores Elétricos, WEG. Módulo 1: Comando e Proteção. WEG
- [18] Considerações sobre redimensionamento de motores elétricos de indução. Artigo publicado na revista Lumière Electric edição nº 166, 2010.
- [19] Souza, Danilo Ferreira. Uma avaliação do desempenho de motores elétricos de indução trifásicos comercializados no Brasil entre 1945-2016 e o impacto da legislação brasileira. Dissertação de mestrado apresentada no Programa

- de Pós-graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.
- [20] Jung, H. K. Golbal movement in developing hegh efficiency motor. Honk Kong, 2015.
- [21] Almeida, A. T. et al. EUP lot 11 motors. Coimbra: ISR - University of, 2008. P. 137.
- [22] Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações. 3ª edição. 1ª edição. Eletrobras, Procel, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), FUPAI. Itajubá, MG, 2006.
- [23] DT-6 - Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão - especificação, características e manutenção.
- [24] DT-6 - Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão - especificação, características e manutenção. WEG, 2020.
- [25] Fatores de influência na Eficiência Energética / Marcos Cortez Brito Leite Póvoa. - Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica. Projeto de Graduação - UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Elétrica, 2014.
- [26] Guia Técnico WEG - Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. WEG, 2020. Disponível em [WWW.weg.net](http://WWW.weg.net)
- [27] LOCATELLI, E. Programa de efficientização industrial. Módulo Motor Elétrico. Eletrobrás/Procel: Rio de Janeiro, 2006.
- [28] REZENDE, P. H. O e BISPO, D. Estudo da eficiência energética e dimensionamento de motores de indução trifásicos a partir da plotagem de suas curvas características. VI International Conference on Engineering and Computer Education. Buenos Aires, Argentina, março/2009. p. 956-960.
- [29] Yamachita, R.A. Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, (MG), 2013.
- [30] Ramos, M.C.E.S. Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- [31] Castro, R. A. Análise de viabilidade de troca de motores elétricos superdimensionados e a influência da energia reativa. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, 2008.
- [32] Caracterização técnica de um sistema de geração de ar comprimido. Fonte: Manual prático de eficiência energética Procel. Disponível em [http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_18/2014/04/22/6281/ManualArComprimido.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/ManualArComprimido.pdf)>. Acessado em 13/05/2020.

- [33] Caracterização de compressores em uma central de ar comprimido. Disponível em <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/customerbenefit/new-zr-series>. Acessado em 13/05/2020.
- [34] Caracterização da operação de um compressor do tipo carga e alívio. Disponível em: <http://www.zenitcompressores.com.br/downloads/catalogos-tecnicos/compressores-estacionarios-com-inversor-de-frequencia.pdf>. Acessado em 13/05/2020.
- [35] Comparativo entre tecnologias considerando o percentual da capacidade de operação por consumo de energia elétrica. Disponível em: <https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/inversor-de-frequencia-compressor/>. Acessado em 13/05/2020.
- [36] Capacidade do compressor pela potência exigida considerando diferentes tipos de equipamentos com ênfase ao delta de consumo para a demanda de 40% da capacidade do compressor. Fonte: modificado do conteúdo acessado via <https://eficienciaenergetica.atlascopco.com.br/inversor-de-frequencia-compressor/>., Acessado em 13/05/2020.

## Biografia

---

**Anderson Juca** é Engenheiro Eletricista pela FEG – UNESP, em 1991; Mestre (1998) e Doutor (2003) em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP; Master in Energy Business Administration pelo PECE-USP, em 2007; Especialização em Regulação do Setor de Energia Elétrica pela ABDIB, em 2011; Especialização em política energética e mercados pelo Instituto Baker da Rice University, Houston, Texas, USA, no período de 2014 - 2015.

Professor e pesquisador na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, na área de sistemas de potência. Tem experiência de 28 anos de atuação profissional nas áreas de Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica; em Assuntos Regulatórios do Setor Elétrico; Comercialização de Energia Elétrica; em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D); e Eficiência Energética. Atuou em empresas como a Companhia Energética de São Paulo (CESP); na Secretaria de Estado de Energia de São Paulo e na Agência Reguladora de Saneamento e Energia do estado de São Paulo.