

1.3 CARACTERÍSTICAS DA REDE

1.3.1 O SISTEMA

No Brasil, o sistema de alimentação pode ser monofásico ou trifásico. O sistema monofásico é utilizado em serviços domésticos, comerciais e rurais, enquanto o sistema trifásico, em aplicações industriais, ambos em 60 Hz.

1.3.1.1 TRIFÁSICO

As tensões trifásicas mais usadas nas redes industriais são:

- Baixa tensão: 220 V, 380 V e 440 V;
- Média tensão: 2300 V, 3300 V, 4160 V, 6600 V e 13800 V.

O sistema trifásico estrela de baixa tensão, consiste de três condutores de fase (L_1 , L_2 , L_3) e o condutor neutro (N), sendo este, conectado ao ponto estrela do gerador ou secundário dos transformadores.

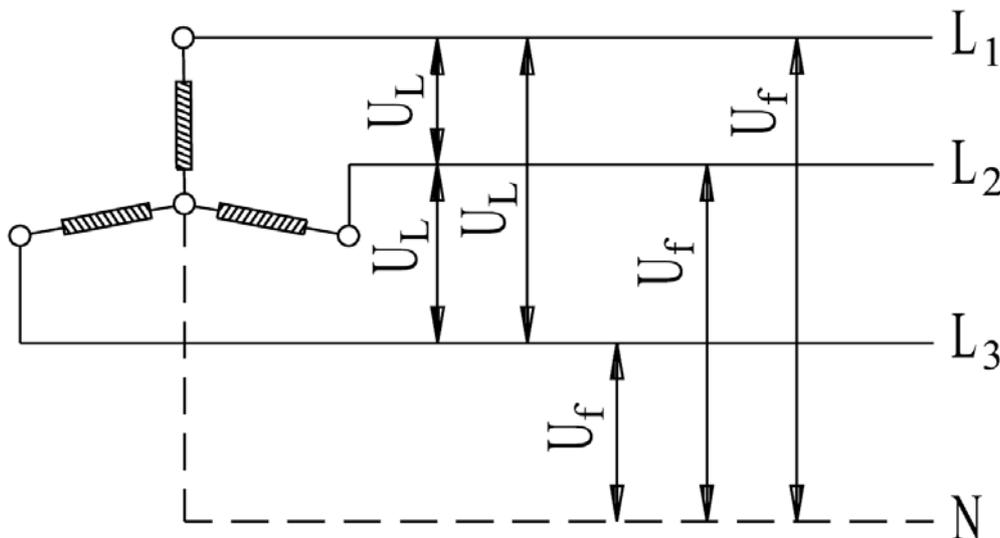


Figura 1.22 – Sistema trifásico

1.3.1.2 MONOFÁSICO

As tensões monofásicas padronizadas no Brasil são as de 115 V (conhecida como 110 V), 127 e 220 V.

Os motores monofásicos são ligados à duas fases (tensão de linha U) ou à uma fase e o neutro (tensão de fase U_f). Assim, a tensão nominal do motor monofásico deverá ser igual à tensão U ou U_f do sistema.

Quando vários motores monofásicos são conectados a um sistema trifásico (formado por três sistemas monofásicos), deve-se tomar o cuidado para distribuí-los de maneira uniforme, evitando-se assim, desequilíbrio entre as fases.

1.3.1.2.1 MONOFÁSICO COM RETORNO POR TERRA (MRT)

O sistema monofásico com retorno por terra – MRT – é um sistema elétrico em que a terra funciona como condutor de retorno da corrente de carga. Utiliza-se como solução para o emprego no monofásico a partir de alimentadores que não têm o condutor neutro. Dependendo da natureza do sistema elétrico existente e características do solo onde será implantado (geralmente na eletrificação rural) têm-se:

1) Sistema monofilar

É a versão mais prática e econômica do MRT, porém, sua utilização só é possível onde a saída da subestação de origem é estrela-triângulo.

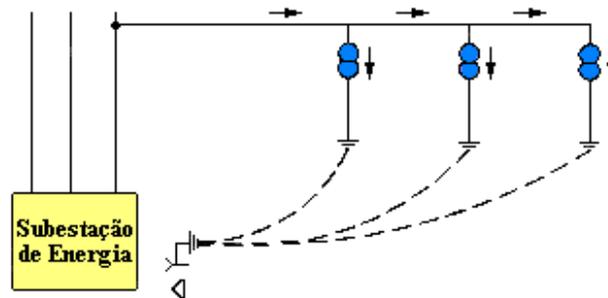


Figura 1.23 – Sistema monofilar

2) Sistema monofilar com transformador de isolamento

Este sistema possui algumas desvantagens, além do custo do transformador, como:

- Limitação da potência do ramal à potência nominal do transformador de isolamento;
- Necessidade de reforçar o aterramento do transformador de isolamento, pois na sua falta, cessa o fornecimento de energia para todo o ramal.

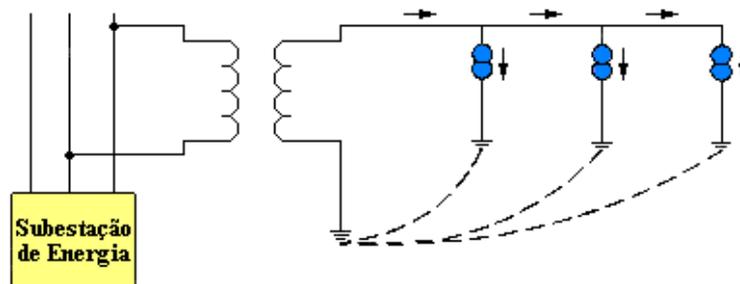


Figura 1.24 – Sistema monofilar com transformador de isolamento

3) Sistema MRT na versão neutro parcial

É empregado como solução para a utilização do MRT em regiões de solos de alta resistividade, quando se torna difícil obter valores de resistência de terra dos transformadores dentro dos limites máximos estabelecidos no projeto.

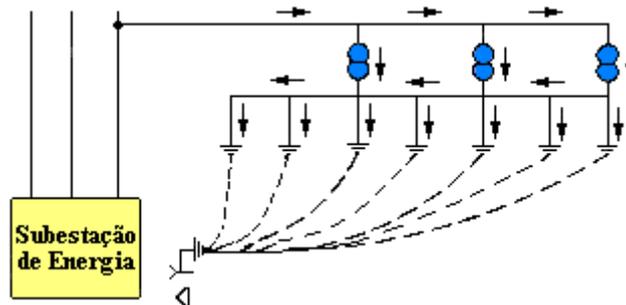


Figura 1.25 – Sistema MRT na versão neutro parcial

1.3.2 TENSÃO NOMINAL

É a tensão de rede para a qual o motor foi projetado.

1.3.2.1 TENSÃO DA REDE DE ALIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR

Atualmente não há um padrão mundial para a escolha da tensão de alimentação em função da potência do motor. Entre os principais fatores que são considerados, pode-se citar:

- Nível de tensão disponível no local;
- Limitações da rede de alimentação com referência à corrente de partida;
- Distância entre a fonte de tensão (subestação) e a carga;
- Custo do investimento, entre baixa e alta tensão para potências entre 150 e 450 kW.

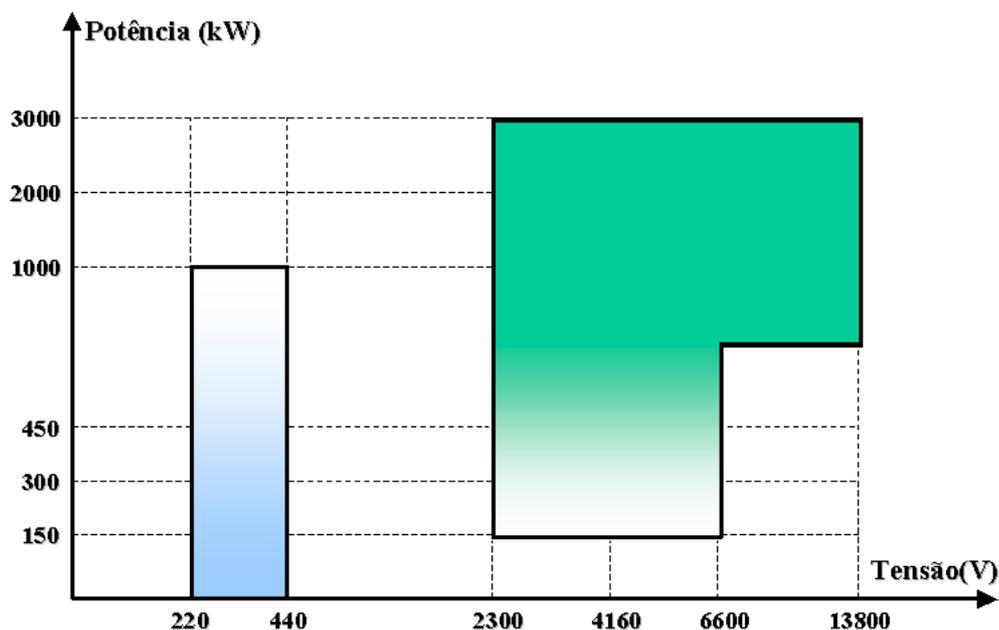


Figura 1.26 – Tensões normalmente utilizadas em função da potência do motor

1.3.2.2 TENSÃO NOMINAL MÚLTIPLA

A grande maioria dos motores é fornecida com terminais do enrolamento religáveis, de modo a poderem funcionar em redes de pelo menos duas tensões diferentes. Os principais tipos de religação de terminais de motores para funcionamento em mais de uma tensão são:

1.3.2.2.1 LIGAÇÃO SÉRIE-PARALELA

O enrolamento de cada fase é dividido em duas partes (lembrar que o número de pólos é sempre par, de modo que este tipo de ligação é sempre possível). Ligando as duas metades em série, cada metade ficará com a metade da tensão de fase nominal do motor. Ligando as duas metades em paralelo, o motor poderá ser alimentado com uma tensão igual à metade da tensão anterior, sem que se altere a tensão aplicada a cada bobina.

Este tipo de ligação exige nove terminais no motor e a tensão nominal (dupla) mais comum, é 220/440 V, ou seja, o motor é religado na ligação paralela quando alimentado com 220V e na ligação série quando alimentado em 440 V. A figura 1.27 mostra a numeração normal dos terminais e o esquema de ligação para estes tipos de motores, tanto para motores ligados em estrela como em triângulo. O mesmo esquema serve para outras duas tensões quaisquer, desde que uma seja o dobro da outra, por exemplo, 230/460 V.

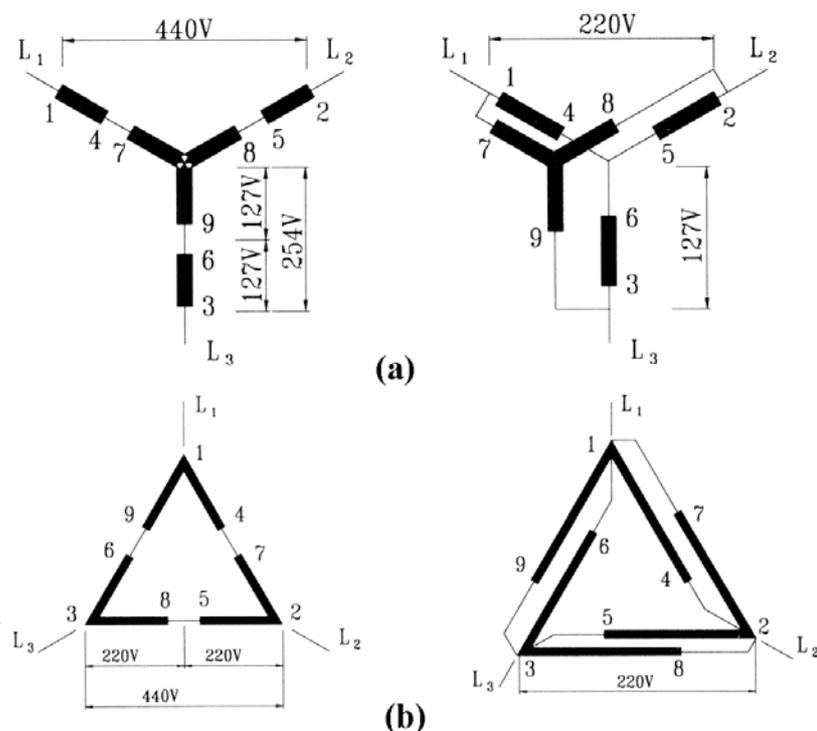


Figura 1.27 – Ligação série-paralelo

1.3.2.2.2 LIGAÇÃO ESTRELA-TRIÂNGULO

O enrolamento de cada fase tem as duas pontas trazidas para fora do motor. Se ligar as três fases em triângulo, cada fase receberá a tensão da linha, por exemplo, 220 volts (figura 1.28). Se ligar as três fases em estrela, o motor pode ser ligado a uma linha com tensão igual a $220\sqrt{3} = 380$ volts sem alterar a tensão no enrolamento que continua igual a 220 volts por fase, pois:

$$U_f = U\sqrt{3}$$

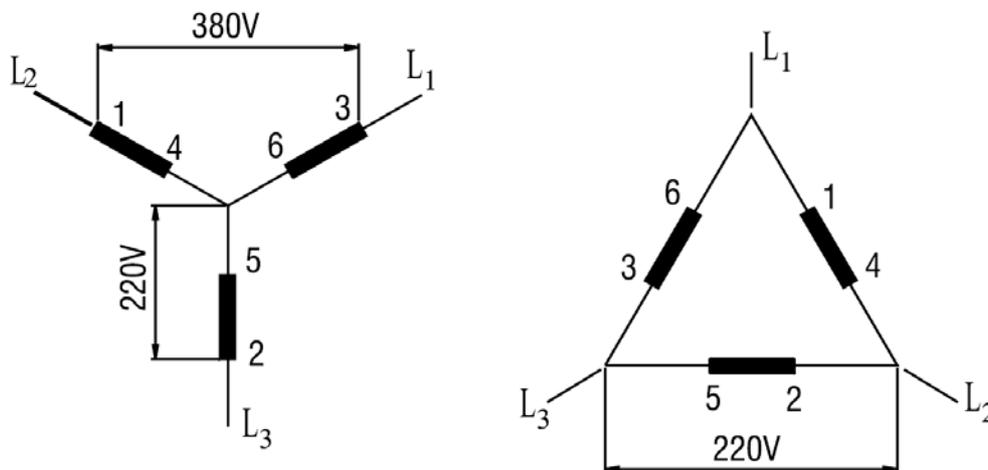


Figura 1.28 – Ligação estrela-triângulo

Este tipo de ligação exige seis terminais no motor e serve para quaisquer tensões nominais duplas, desde que a segunda seja igual à primeira multiplicada por $\sqrt{3}$.

Exemplo: 220/380 V – 380/660 V – 440/760 V.

Nos exemplos 380/660 V e 440/760 V, a tensão maior declarada só serve para indicar que o motor pode ser acionado através de uma chave de partida estrela-triângulo.

Motores que possuem tensão nominal de operação acima de 600 V deverão possuir um sistema de isolamento especial, apto a esta condição.

1.3.2.2.3 TRIPLA TENSÃO NOMINAL

Podem-se combinar os dois casos anteriores: o enrolamento de cada fase é dividido em duas metades para ligação série-paralelo. Além disso, todos os terminais são acessíveis para poder-se ligar as três fases em estrela ou triângulo. Deste modo, têm-se quatro combinações possíveis de tensão nominal:

- 1) Ligação triângulo paralelo;
- 2) Ligação estrela paralela, sendo igual a $\sqrt{3}$ vezes a primeira;
- 3) Ligação triângulo série, valendo o dobro da primeira;
- 4) Ligação estrela série, valendo $\sqrt{3}$ vezes a terceira. Mas, como esta tensão seria maior que 600 V, é indicada apenas como referência de ligação estrela-triângulo.

Exemplo: 220/380/440/(760) V

Este tipo de ligação exige 12 terminais e a figura 1.29 mostra a numeração normal dos terminais e o esquema de ligação para as três tensões nominais.

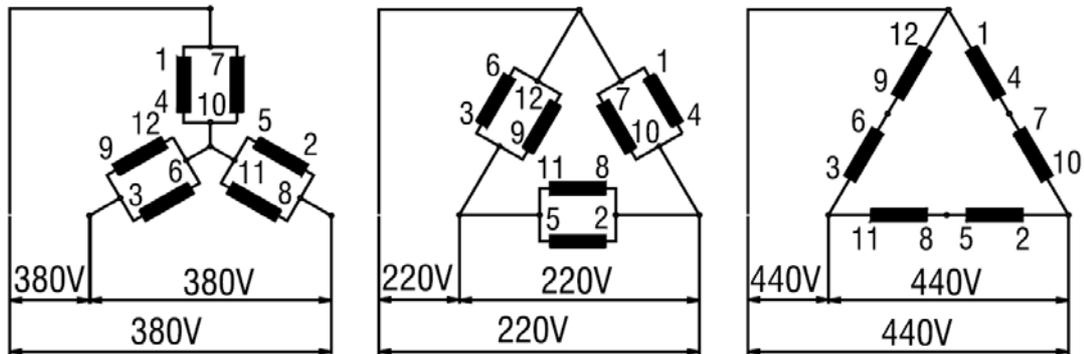


Figura 1.29

1.3.2.3 TENSÕES DE LIGAÇÕES NORMAIS

A tabela 1.3.2.3.1 mostra as tensões nominais múltiplas mais comuns em motores trifásicos e sua aplicação às tensões de rede usuais:

Observações:

- A partida direta ou com chave compensadora é possível em todos os casos abaixo;
- A ligação para 660 V ou 760 V é usada somente para ligação com chave estrela-triângulo. Todas as ligações para as diversas tensões são feitas pelos terminais, localizados na caixa de ligação;
- Todo motor traz o esquema para estas ligações, impresso na placa de identificação.

Execução dos enrolamentos	Tensão de Serviço	Partida com chave estrela-triângulo	Partida com chave compensadora	Partida com chave série-paralela	Partida com Soft-Starter
220/380	220 V	Sim	Sim	Não	Sim
	380 V	Não	Sim	Não	Sim
220/440/230/460	220 V/230 V	Não	Sim	Sim	Sim
	440 V/460 V	Não	Sim	Não	Sim
380/660	380 V	Sim	Sim	Não	Sim
220/380/440/760	220 V	Sim	Sim	Sim	Sim
	380 V	Não	Sim	Sim	Sim
	440 V	Sim	Sim	Não	Sim

Tabela 1.3.2.3.1 – Ligações normais dos enrolamentos dos motores trifásicos

1.3.3 FREQUÊNCIA NOMINAL (HZ)

É a frequência da rede para a qual o motor foi projetado.

1.3.3.1 TOLERÂNCIA DE VARIAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA

Conforme a norma IEC 60034-1/NBR 7094, o motor elétrico de indução deve ser capaz de funcionar de maneira satisfatória dentro das possíveis combinações das variações de tensão e frequência classificados em zona A ou zona B, conforme figura 1.30.

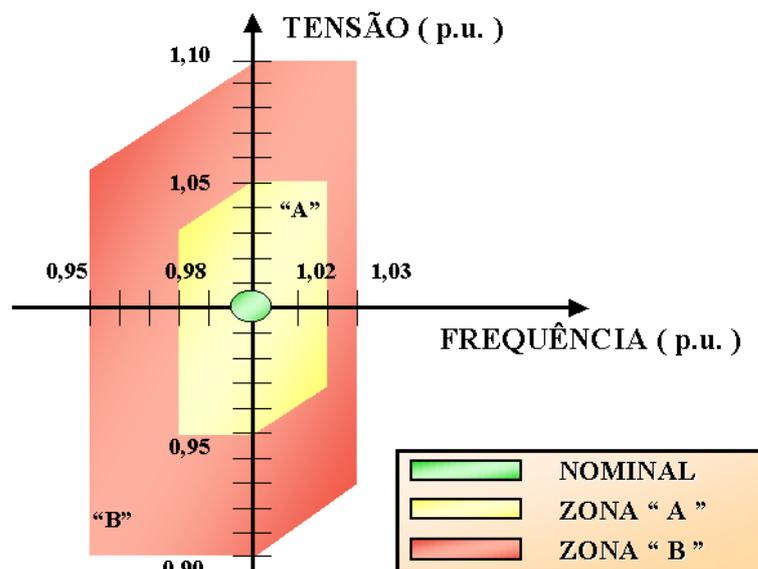


Figura 1.30 – Limites das variações de tensão e de frequência em funcionamento

ZONA A

- O motor deverá desempenhar sua função principal continuamente (assegurar o seu conjugado nominal);
- O motor terá desvios em suas características de desempenho à tensão e frequências nominais (rendimento, fator de potência, etc.);
- Haverá elevações de temperatura superiores àquelas a tensão e frequência nominais (podem exceder em aproximadamente 10K os limites especificados pela norma);

ZONA B

- O motor deverá desempenhar sua função principal (assegurar o seu conjugado nominal);
- O motor terá desvios em suas características de desempenho, à tensão e frequência nominais, superiores àquelas da zona A
- Existirão elevações de temperatura superiores àquelas a tensão e frequência nominais e superiores às da zona "A";

Ainda quanto aos limites de tensão e frequência, a norma define um acréscimo na elevação de temperatura ou na temperatura total do motor quando há uma variação simultânea da tensão e da frequência. Para as condições de operação nos limites da zona A (ver figura 1.30), as elevações de temperatura e a temperatura total podem exceder em aproximadamente 10 K os limites especificados, em contra partida o motor deve assegurar o seu conjugado nominal. Quanto às características de desempenho, elas podem sofrer variações (tanto na zona A quanto na zona B – mais acentuada nesta última, por este motivo a IEC 60034-1/NBR 7094 recomenda o não funcionamento prolongado na periferia da zona B). Entretanto a norma não estabelece os limites. Assim sendo, o motor deve ser capaz de funcionar dentro das zonas A e B, fornecendo conjugado nominal.

O efeito aproximado da variação da tensão sobre as características do motor está mostrado na tabela abaixo:

Desempenho do motor	Tensão 20% acima da nominal	Tensão 10% acima da nominal	Tensão 10% abaixo da nominal
Conjugado de partida / conjugado máximo	Aumenta 54%	Aumenta 26%	Diminui 24%
Corrente de partida	Aumenta 27%	Aumenta 13%	Diminui 12%
Corrente de plena carga (In)	Aumenta 5%	Diminui 2%	Aumenta 8%
Rotação	Aumenta 1%	Aumenta 0,3 %	Diminui 1%
Rendimento	Diminui 2%	Diminui 0,3 %	Diminui 1%
Fator de potência	Diminui 19%	Diminui 7%	Aumenta 4%
Temperatura	Aumenta 18°C	Aumenta 2°C	Aumenta 9°C
Ruído magnético sem carga	Aumento perceptível	Ligeiro aumento	Ligeira diminuição

Tabela 1.3.3.1.1 – Efeito aproximado da variação da tensão para o motor IV pólos, 220/380/440 V, 60 Hz

O efeito aproximado da variação da frequência sobre as características do motor está mostrado na tabela 1.3.3.1.2.

Motor enrolado para 50Hz	Ligação em 60 Hz	Rotação Nominal	Potência Nominal	Conjugado Nominal	Corrente Nominal	Conjugado de partida	Conjugado máximo	Corrente de partida
						Todos os valores em tantas vezes o nominal		
U	U	Fator de transformação para funcionamento em 60 Hz						
220 V	220 V	1,20	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,83
380 V	380 V	1,20	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,83
380 V	440 V	1,20	1,15	0,96	1,00	0,96	0,96	0,96
440 V	440 V	1,20	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,83
500 V	500 V	1,20	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,83
500 V	550 V	1,20	1,10	0,91	1,00	0,91	0,91	0,91
660 V	660 V	1,20	1,00	0,83	1,00	1,00	0,83	0,83

Tabela 1.3.3.1.2 – variação no funcionamento de motores de 50 Hz ligados em 60 Hz.

Obs.: para ligação em outras frequências deverá ser consultada a fábrica.

1.3.3.2 LIGAÇÃO EM FREQUÊNCIAS DIFERENTES

Motores trifásicos bobinados para 50 Hz poderão ser ligados também em rede de 60 Hz.

a) Ligando o motor de 50 Hz, com a mesma tensão, em 60 Hz:

- A potência do motor será a mesma;
- A corrente nominal é a mesma;
- A corrente de partida é a mesma;
- O conjugado de partida diminui 17%;
- O conjugado máximo diminui 17%;
- A velocidade nominal aumenta 20%;

Nota: Deverão ser observados os valores de potências requeridas, para motores que acionam equipamentos que possuem conjugados variáveis com a rotação.

b) Se alterar a tensão em proporção à frequência:

- Aumenta a potência do motor em 20%
- A corrente nominal é a mesma;
- A corrente de partida será aproximadamente a mesma;
- O conjugado de partida será aproximadamente o mesmo;
- A rotação nominal aumenta 20%;

Quando o motor for ligado em 60 Hz com a bobinagem 50 Hz, pode-se aumentar a potência em 15% para II pólos e 20% para IV, VI e VIII pólos.

1.3.4 LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE PARTIDA DE MOTORES TRIFÁSICOS

Sempre que possível, a partida de um motor trifásico de gaiola, deverá ser direta, por meio de contadores. Deve ter-se em conta que para um determinado motor, as curvas de conjugado e corrente são fixas, independente da dificuldade de partida, para uma tensão constante.

Nos casos em que a corrente de partida do motor é elevada podem ocorrer as seguintes consequências prejudiciais:

- Elevada queda de tensão no sistema de alimentação da rede. Em função disto, provoca a interferência em equipamentos instalados no sistema;
- O sistema de proteção (cabos, contadores) deverá ser superdimensionado, ocasionando um custo elevado;
- A imposição das concessionárias de energia elétrica que limitam a queda de tensão da rede.

Caso a partida direta não seja possível, devido aos problemas citados acima, pode-se usar sistema de partida indireta para reduzir a corrente de partida. Estes sistemas de partida indireta (tensão reduzida) são:

- Chave estrela-triângulo;
- Chave compensadora;
- Chave série-paralelo;
- Reostato;
- Partidas eletrônicas (soft-starter e inversor de frequência).

1.3.4.1 PARTIDA COM CHAVE ESTRELA-TRIÂNGULO (Y-Δ)

É fundamental para a partida com a chave estrela-triângulo que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, ou seja, em 220/380 V, em 380/660 V, 440/760 V, em 1350/2300 V, em 2400/4160 V ou 3800/6600 V. Os motores deverão ter no mínimo seis bornes de ligação. A partida estrela-triângulo poderá ser usada quando a curva de conjugados do motor é suficientemente elevada para poder garantir a aceleração da máquina com corrente reduzida. Na ligação estrela, o conjugado fica reduzido para 33% do conjugado de partida na ligação triângulo. Por este motivo, sempre que for necessária uma partida estrela-triângulo, deverá ser usado um motor com curva de conjugado elevado.

Os motores WEG têm alto conjugado máximo e de partida, sendo, portanto, ideais para a maioria dos casos, para uma partida estrela-triângulo. Entretanto, o alto custo dos contadores e/ou disjuntores a vácuo, inviabiliza este tipo de partida para motores de alta tensão.

Antes de decidir por uma partida estrela-triângulo, será necessário verificar se o conjugado de partida será suficiente para operar a máquina. O conjugado resistente da carga não poderá ultrapassar o conjugado de partida do motor (figura 1.31), nem a corrente no instante da mudança para triângulo poderá ser de valor inaceitável.

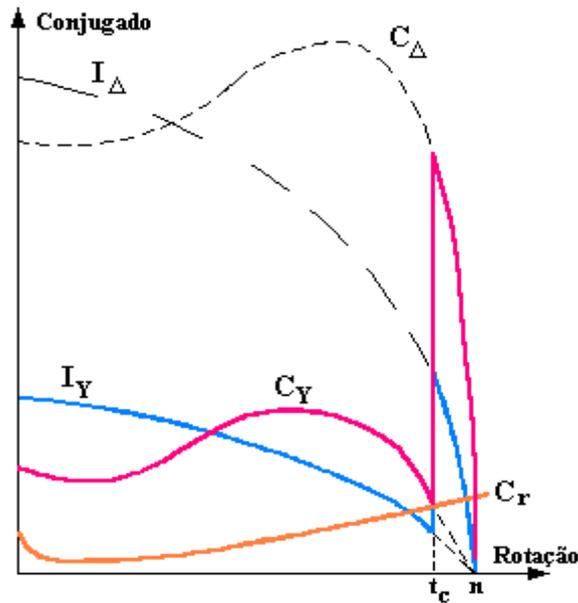


Figura 1.31 – Corrente e conjugado para partida estrela-triângulo de um motor de gaiola acionando uma carga com conjugado resistente C_r .

- Onde:
- I_{Δ} = corrente em triângulo;
 - I_Y = corrente em estrela;
 - C_Y = conjugado em estrela;
 - C_{Δ} = conjugado em triângulo;
 - C_r = conjugado resistente;
 - t_c = tempo de comutação.

Esquemáticamente, a ligação estrela-triângulo num motor para uma rede de 220V é feita da maneira indicada na figura 1.32, notando-se que a tensão por fase durante a partida é reduzida para 127V.

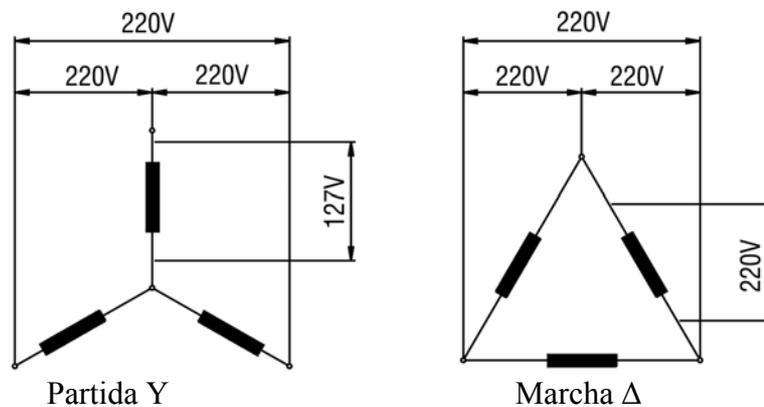


Figura 1.32

1.3.4.2 PARTIDA COM CHAVE COMPENSADORA (AUTO-TRANSFORMADOR)

A chave compensadora pode ser usada para a partida de motores sob carga. Ela reduz a corrente de partida, evitando uma sobrecarga no circuito, deixando, porém, o motor com um conjugado suficiente para a partida e aceleração. A tensão na chave compensadora é reduzida através de auto-transformador que possui normalmente taps de 50, 65 e 80% da tensão nominal.

Para os motores que partem com uma tensão menor que a tensão nominal, a corrente e o conjugado de partida devem ser multiplicados pelos fatores K_1 (fator de multiplicação da corrente) e K_2 (fator de multiplicação do conjugado) obtidos na figura 1.33.

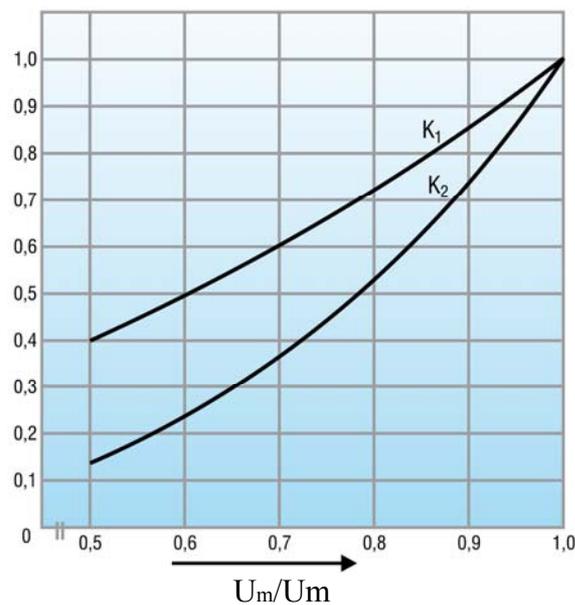


Figura 1.33 – Fatores de redução K_1 e K_2 em função das relações de tensão do motor e da rede U_m/U_n

Exemplo: Para 85% da tensão nominal;

$$\left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{85\%} = K_1 \times \left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{100\%} = 0,8 \times \left(\frac{I_p}{I_n}\right)_{100\%}$$

$$\left(\frac{C_p}{C_n}\right)_{85\%} = K_2 \times \left(\frac{C_p}{C_n}\right)_{100\%} = 0,66 \times \left(\frac{C_p}{C_n}\right)_{100\%}$$

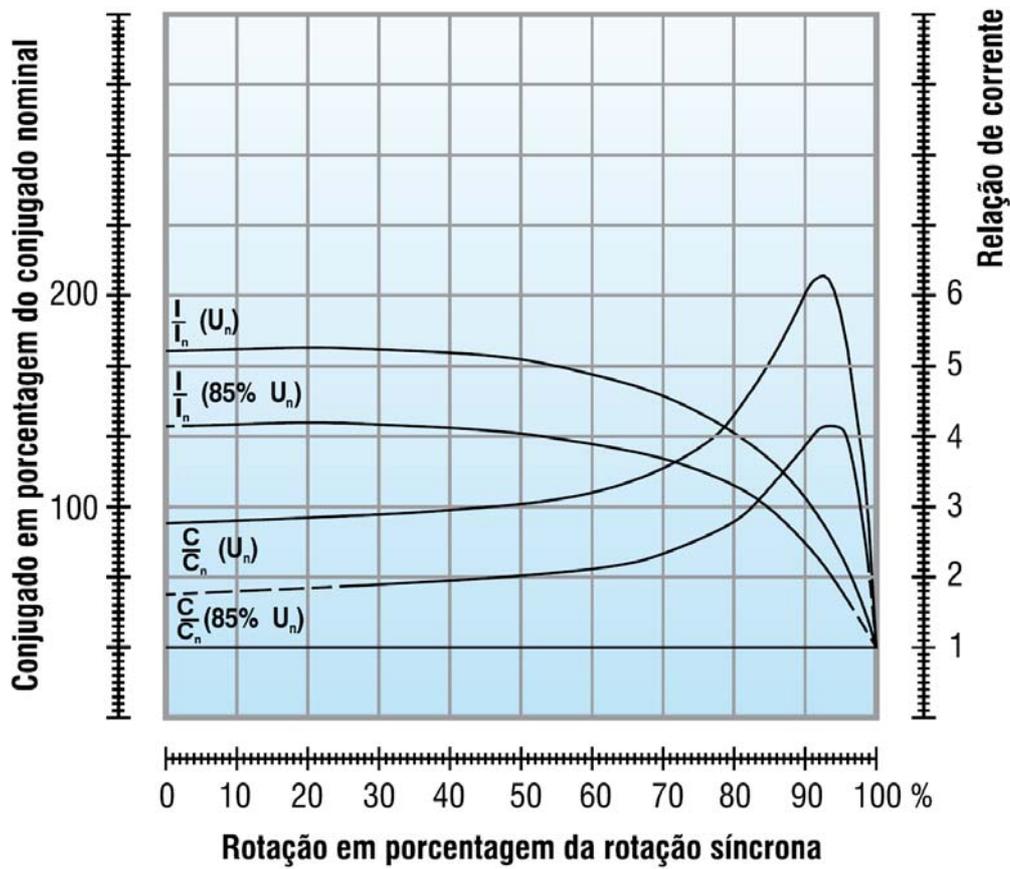


Figura 1.34 – Exemplo das características de desempenho de um motor de 425 cv, VI pólos, quando parte com 85% da tensão

1.3.4.3 COMPARAÇÃO ENTRE CHAVES “Y-Δ” E COMPENSADORA “AUTOMÁTICA”

- **Estrela-Triângulo (automática):**

Vantagens:

- a) A chave estrela-triângulo é muito utilizada por seu custo reduzido para baixas tensões;
- b) Não tem limite quanto ao número de manobras;
- c) Os componentes ocupam pouco espaço;
- d) A corrente de partida fica reduzida para aproximadamente 1/3.

Desvantagens:

- a) A chave só pode ser aplicada a motores cujos seis bornes ou terminais sejam acessíveis;
- b) A tensão da rede deve coincidir com a tensão em triângulo do motor;
- c) Com a corrente de partida reduzida para aproximadamente 1/3 da corrente nominal, reduz-se também o momento de partida para 1/3;
- d) Caso o motor não atinja pelo menos 90% de sua velocidade nominal, o pico de corrente na comutação de estrela para triângulo será quase como se fosse uma partida direta, o que se torna prejudicial aos contatos dos contatores e não traz nenhuma vantagem para a rede elétrica.

- **Chave Compensadora (automática):**

Vantagens:

- a) No tap de 65% a corrente de linha é aproximadamente igual a da chave estrela-triângulo, entretanto, na passagem da tensão reduzida para a tensão da rede, o motor não é desligado e o segundo pico é bem reduzido, visto que o auto-trafo por curto tempo se torna uma reatância;
- b) É possível a variação do tap de 65 para 80% ou até para 90% da tensão da rede, a fim de que o motor possa partir satisfatoriamente.

Desvantagens:

- a) A grande desvantagem é a limitação de sua frequência de manobras. Na chave compensadora automática é sempre necessário saber a sua frequência de manobra para determinar o auto-trafo de acordo.
- b) A chave compensadora é bem mais cara do que a chave estrela-triângulo, devido ao auto-trafo;
- c) Devido ao tamanho do auto-trafo, a construção se torna volumosa, necessitando quadros maiores, o que torna o seu preço elevado.

1.3.4.4 PARTIDA COM CHAVE SÉRIE-PARALELO

Para partida em série-paralelo é necessário que o motor seja religável para duas tensões, a menor delas igual a da rede e a outra duas vezes maior.

Este tipo de ligação exige nove terminais no motor e a tensão nominal mais comum é 220/440 V, ou seja: durante a partida o motor é ligado na configuração série até atingir sua rotação nominal e, então, faz-se a comutação para a configuração paralelo.

1.3.4.5 PARTIDA COM REOSTATO PARA MOTORES DE ANÉIS

O motor de indução de anéis pode ter uma família de curvas conjugado x velocidade, através da inserção de resistências externas no circuito rotórico. Desta maneira, para uma dada velocidade, é possível fazer o motor fornecer qualquer valor de conjugado, até o limite do conjugado máximo. Assim é possível fazer com que o motor tenha altos conjugados na partida com correntes relativamente baixas, bem como fazê-lo funcionar numa dada velocidade com o valor de conjugado desejado.

Em cada uma das curvas da família de curvas, o motor comporta-se de maneira que à medida que a carga aumenta, a rotação cai gradativamente. À velocidade síncrona, o conjugado motor torna-se igual a zero.

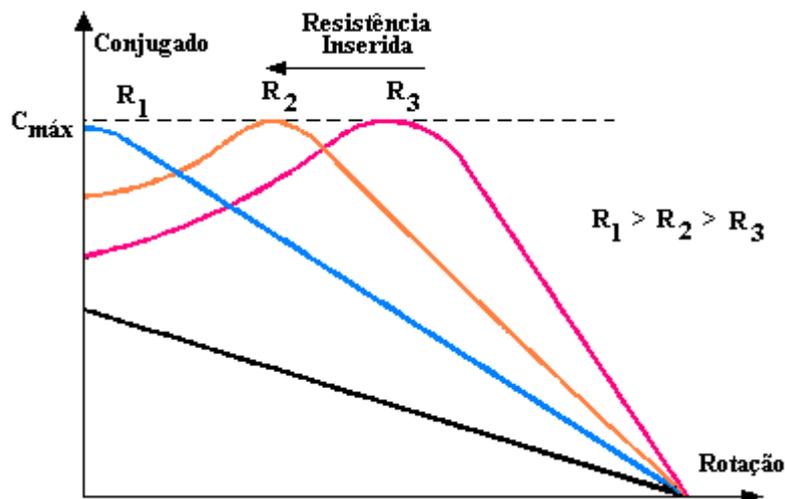


Figura 1.35 – Família de curvas de conjugado x rotação para motores de anéis

A utilização de motores de anéis, baseia-se na seguinte equação:

$$s = \frac{3 \times R_2 \times I_2^2}{\omega_0 \times T} = \frac{P_{j2}}{\omega_0 \times T} \quad (1.3.4.5.1)$$

Onde: s = escorregamento;
 R_2 = resistência rotórica (Ω);
 I_2 = corrente rotórica (A);
 ω_0 = rotação síncrona (rad/s);
 T = torque ou conjugado do rotor (Nm);
 p_{j2} = perdas no rotor (W).

A inserção de uma resistência externa no rotor faz com que o motor aumente o “s”, provocando a variação de velocidade. Na figura 1.35, vê-se o efeito do aumento da resistência externa inserida ao rotor.

1.3.4.6 PARTIDAS ELETRÔNICAS

1.3.4.6.1 SOFT-STARTER

O avanço da eletrônica permitiu a criação da chave de partida a estado sólido a qual consiste de um conjunto de pares de tiristores (SCR, ou combinações de tiristores/diodos), um em cada borne de potência do motor.

O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para uma tensão variável aos terminais do motor durante a “aceleração”. Este comportamento é, muitas vezes, chamado de “partida suave” (soft-starter). No final do período de partida, ajustável conforme a aplicação, a tensão atinge seu valor pleno após uma aceleração suave ou uma rampa ascendente, ao invés de ser submetido a incrementos ou “saltos” repentinos, como ocorre com os métodos de partida por auto-transformador, ligação estrela-triângulo, etc. Com isso, consegue-se manter a corrente de partida próxima da nominal e com suave variação, como desejado.

Além da vantagem do controle da tensão (e por consequência da corrente) durante a partida, a chave eletrônica apresenta, também, a vantagem de não possuir partes móveis ou que gerem arco elétrico, como nas chaves mecânicas. Este é um dos pontos fortes das chaves eletrônicas, pois sua vida útil é bem mais longa (até centenas de milhões de manobras).

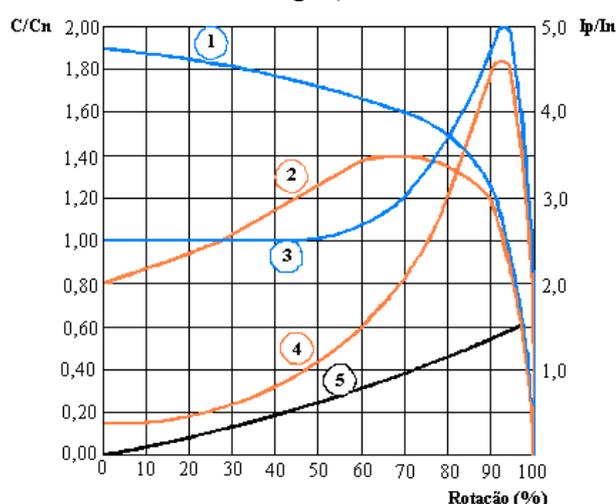


Figura 1.36 – Partida direta e com soft-starter

- 1 – Corrente de partida direta;
- 2 – Corrente de partida com soft-starter;
- 3 – Conjugado com partida direta;
- 4 – Conjugado com soft-starter;
- 5 – Conjugado da carga.

1.3.4.6.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Por muitos anos, motores CA foram usados estritamente em aplicações de velocidade constante. Tradicionalmente, com bombas, ventiladores e compressores, o controle da vazão também foi realizado através de meios mecânicos como o estrangulamento de válvulas e abafadores. Quando a velocidade variável era requerida, motores CC, juntamente com turbinas e motores de combustão interna, eram escolhidos.

O advento de acionamentos de velocidade variável, confiáveis e de custo efetivo, mudaram rapidamente estes procedimentos. Estes acionamentos, que regulam a velocidade do motor, controlando a tensão e a frequência da rede, tem alargado vastamente a abrangência das aplicações e capacidades dos motores CA.

O uso de controles de frequência ajustável, entretanto, impacta o projeto, desempenho e confiabilidade dos motores CA. Muitos efeitos são positivos. Velocidades baixas significam ciclos menores (portanto fadiga minimizada) dos rolamentos, ventoinhas e outros elementos girantes. A “Partida Suave” de um motor elimina os altos esforços da partida nos enrolamentos estáticos e barras do rotor que são usuais quando parte-se motores diretamente à rede.

Acionamentos de frequência ajustável podem influenciar positivamente a vida útil do motor, quando adequadamente aplicados. Há, contudo, uns poucos fatores importantes que devem ser considerados quando do uso de motores com acionamento. Estes problemas são bem definidos e administráveis e a seguir abordados. A vivência de problemas com a instalação de acionamentos será significativamente reduzida pela consideração adequada desses fatores já na especificação técnica.

Aspectos adicionais na Especificação de Motor com Velocidade Variável

Aplicações com velocidade variável possuem a maioria dos problemas das aplicações com motor à velocidade constante, tais com, requisitos específicos da carga, integridade da isolamento, vibrações, qualidade dos materiais e da construção. Há cinco aspectos adicionais que devem ser levados atentamente em consideração quando se especifica motores para aplicações com velocidade variável:

1) Tensão de modo comum

Quando operando, diretamente conectado à rede, o motor é alimentado pela tensão de entrada trifásica. Com uma fonte de alimentação regular trifásica, a soma de todos os vetores de fase é zero, o neutro é estacionário e é usualmente mantido aterrado. Uma ponte retificadora trifásica é a fonte de alimentação de um motor acionado por Inversor de Frequência. Em operação, somente duas fases conduzem simultaneamente, portanto, a soma vetorial não é zerada. O centro do Link CC movimenta-se e tem valores de tensão positivos e negativos com

relação ao terra (tensão de “Modo Comum”), com magnitudes que variam com o ângulo de disparo da ponte retificadora. A magnitude da tensão de Modo Comum em cada perna da ponte pode ser igual à metade da tensão nominal Fase-Neutro. Assim, a tensão total aplicada nas fases do motor com conversor CA-CA pode ser duas vezes a tensão nominal de fase.

Isto é um problema uma vez que motores não são normalmente projetados para operar com o dobro da tensão nominal. Uma forma de solucionar este fato é especificar motores com isolamento suficiente para suportar o dobro da tensão nominal (normal quando se especifica um motor para operar com variador de frequência).

2) Harmônicas

Os efeitos das harmônicas geradas pelo acionamento podem afetar a operação, vida útil e desempenho do motor. Estes efeitos podem ser divididos em 3 categorias: aquecimento, dielétrico e mecânico. A figura 1.37 ilustra um exemplo de forma de onda de tensão (PWM) e corrente que pode ser fornecida à um motor por um inversor de frequência.

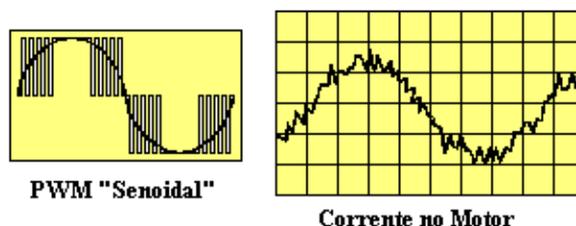


Figura 1.37 – Tensão e corrente no motor

As harmônicas de corrente são aditivos à corrente fundamental e, portanto geram calor adicional nos enrolamentos do motor. Se as harmônicas forem negligenciáveis, haverá calor adicional negligenciável no motor. Mesmo um valor de 30% de distorção de corrente num motor, não gera mais que 8% de calor adicional (devido principalmente aos enrolamentos do motor que se comportam como um filtro).

É necessário que o fornecedor do acionamento supra o fornecedor do motor com informações sobre as harmônicas geradas para permitir que o motor seja devidamente projetado com a adequada capacidade de absorção/dissipação de calor para contra-balancear qualquer perda e/ou aquecimentos adicionais. Um motor operando com velocidade variável através de um inversor de frequência deve atender os mesmos limites de elevação de temperatura que um motor operando com uma sonoidal pura.

As harmônicas de corrente podem originar emissão maior de ruído audível. Os motores devem demonstrar que o limite de nível ruído sonoro é atendido quando estes são acionados por inversores estáticos de frequência. Ainda, as harmônicas também contribuem com o “Torque Pulsante”. O torque pulsante causa excitações torcionais que podem ter conseqüências destrutivas se não forem apropriadamente dirigidas.

Em casos extremos, a magnitude da pulsação é suficientemente grande para criar contra-torques. Em aplicações com baixa inércia tais como bombas centrífugas diretamente acopladas, usualmente há pouco perigo. Porém, aplicações em ventiladores ou em compressores de alta velocidade com redutores de alta inércia há alto risco potencial. Esta situação potencialmente perigosa pode ser analisada e evitada com segurança.

Uma análise torcional é normalmente realizada nos elementos mais importantes do trem de acionamento. Com acionamento de velocidade variável, itens adicionais devem ser acrescentados para análise. O Torque Pulsante deve ser incluído, pois as magnitudes deste e a fadiga resultante podem então ser calculadas. Em outros casos, pode ser requerida a modificação

do diâmetro do eixo e fatores de concentração de tensões, para evitarem-se falhas por fadiga nos elementos do trem de acionamento.

3) *Frequências de chaveamento e ondas estacionárias*

Além da possibilidade de gerar calor adicional, as formas de ondas dos acionamentos podem ter outros efeitos diretos no sistema de isolamento dos motores. Todos os acionamentos estáticos utilizam-se de dispositivos eletrônicos de chaveamento na sua secção de inversão. A ação do chaveamento (liga-desliga) produz picos e transientes de tensão e corrente que afetam de forma variada a isolamento do motor.

Ocasionalmente pela frequência de chaveamento, picos de tensão ou alto dV/dt , terão impacto na vida útil dos enrolamentos do motor. A frequência e amplitude desses surtos influenciam na vida do isolamento e provável forma de defeito.

Uma recomendação conservadora e justa seria requerer que o fabricante do acionamento especificasse ao fabricante do motor qualquer outro requisito especial de isolamento (visto que a utilização de filtros encareceria demais o inversor). Quando necessário (geralmente acima de 20m) o usuário deverá prover ao fabricante do inversor/motor os comprimentos estimados dos cabos, pois a partir deste comprimento o aumento da capacitância da linha em relação ao terra ocasiona a amplificação (pelo fenômeno da reflexão) dos picos de tensão, que podem danificar o isolamento do motor. Este efeito pode ser minimizado colocando filtros reativos na saída do conversor ou aumentando o isolamento das bobinas do motor.

4) *Faixa de Velocidade*

Apesar da inércia não ser um problema para o motor com partida suave o é para o acionamento. Aplicações centrífugas requerem que o motor e acionamento sejam dimensionados para as condições de máxima velocidade de operação.

Cargas alternativas (ou outras cargas com toque constante, tais como estrusoras, britadores e alguns tipos de sopradores e compressores) devem ser dimensionadas para condições de velocidade mínima operacional.

De qualquer ponto de vista razoável, os dados reais de carga devem ser fornecidos para todos os fornecedores de motores a fim de assegurar-se que o motor será capaz de partir e acelerar a carga e funcionar dentro dos limites especificados de temperatura e sob todas as condições de operação.

Na maioria das aplicações com velocidade variável, a máxima velocidade de operação é ou esta perto da rotação nominal de um motor padrão ligado diretamente à rede.

As operações em baixa velocidade não partilham os mesmos problemas de integridade mecânica das operações em alta velocidade, mas certamente partilham os problemas de mancais, lubrificação e de refrigeração.

A mínima velocidade de operação deve ser especificada na Especificação ou Folha de Dados, tendo em vista que o sistema de refrigeração do motor está ligado intimamente à sua rotação.

Operação à velocidade crítica pode resultar em níveis de vibração altos que podem levar à falha por fadiga dos componentes do trem de acionamento. Para evitar este risco, deve-se especificar uma máquina que não tenha qualquer frequência crítica dentro da faixa de operação pretendida, ou fazer com que o inversor de frequência “pule” esta rotação.

Para a maioria das aplicações com motores de IV pólos e maiores, na faixa de 50% a 100% da velocidade, tal solução é normal. Porém, com motores de II pólos ou faixas mais amplas de variação de velocidade pode haver uma grande oportunidade para surgimento de problemas. Em motores maiores, de mais alta velocidade estas soluções podem ser custosas ou indisponíveis. Utilizar motores que tenham frequências críticas na faixa de operação é possível, se eles tiverem uma resposta em frequência bem amortizada. Alternativamente, o controle pode ser bloqueado para operações em frequências bem definidas, que por sua vez limita a flexibilidade operacional do acionamento.

5) Aspectos na partida

Um aspecto positivo na operação de motores com acionamento de frequência variável é a partida suave. As instalações típicas de acionamento são configuradas para limitar a corrente do motor a 100% da nominal, eliminando assim os esforços de partida no isolamento do motor e na rede de alimentação.

A maioria das aplicações são projetadas para manter a relação V/f constante, mantendo o fluxo eletromagnético no entreferro do motor uniforme, desta maneira, nas baixas frequências a tensão será baixa (figura 1.38).

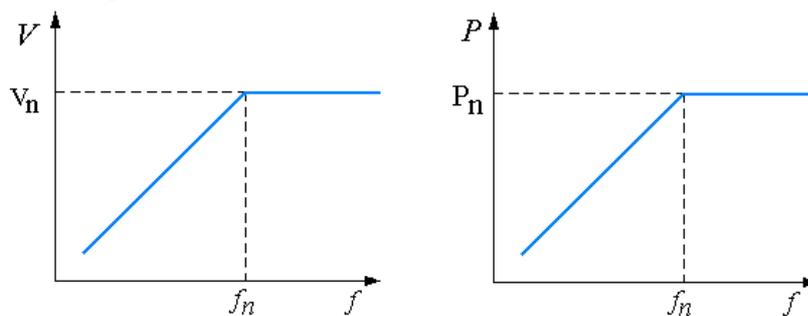


Figura 1.38 – Variação linear de tensão e frequência

Durante as partidas o acionamento controla a tensão e frequência para permitir que o motor trabalhe próximo do escorregamento e fluxo nominais e esteja operando, na porção estável da curva torque x rotação. Assim, para a maioria das aplicações e certamente para as cargas centrífugas, as correntes de partida são muito baixas, a aceleração é suave e controlada, e por causa do baixo escorregamento, o aquecimento do rotor é bastante reduzido.

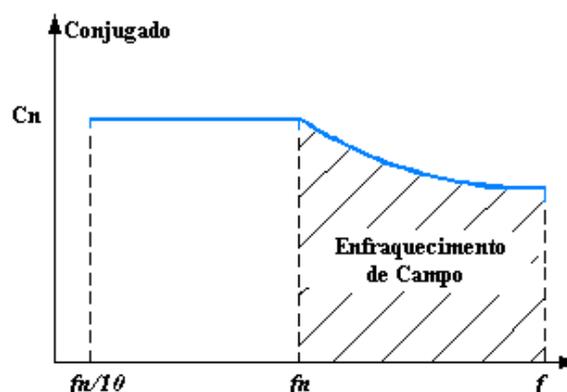


Figura 1.39 – Curva típica de motor aplicado à inversor de frequência

Considerações Importantes:

- Quanto menor a tensão e a frequência do estator, mais significativa é a queda de tensão neste, de modo que para baixas frequências, mantendo-se a proporcionalidade entre a frequência e a tensão, o fluxo e conseqüentemente o conjugado da máquina diminui bastante. Para que isto seja evitado, a tensão do estator para baixas frequências deve ser aumentada, através da compensação $I \times R$, conforme figura abaixo:

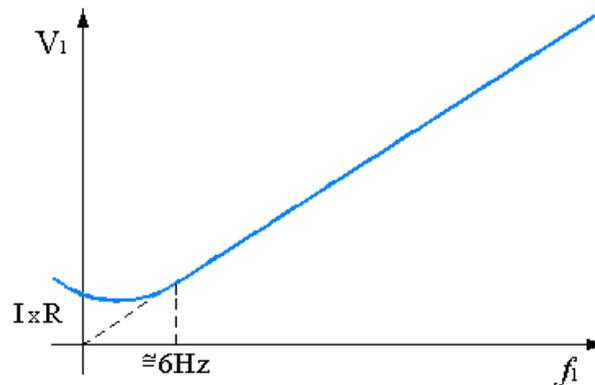


Figura 1.40 – Curva característica V/f com compensação $I \times R$

Para a faixa compreendida entre 0 à aproximadamente 6 Hz, a relação entre V_1 e f não é determinada facilmente, pois dependem tanto de f_1 (frequência estatórica) como de f_2 (frequência rotórica). Portanto, a elevação da tensão em baixas frequências depende também da frequência do escorregamento e conseqüentemente da carga;

- Relações V_1/f_1 acima dos valores nominais estão limitadas em função de que para altos valores de tensão ocorre a saturação e o conseqüente enfraquecimento do campo. Combinando as equações já apresentadas e com a consideração de pequenos valores de escorregamento e supondo f_2 proporcional a f_1 , pode-se dizer que:
 - Conjugado máximo decresce com o quadrado da velocidade ($1/n^2$);
 - Conjugado nominal decresce hiperbolicamente com a velocidade ($1/n$), e decresce aproximadamente com o quadrado do fluxo (ϕ^2);
 - Aproximadamente, a velocidade máxima com potência constante é:

$$n_{m\acute{a}x} < \left(\frac{C_{m\acute{a}x}}{C_n} \right) \times n_N$$

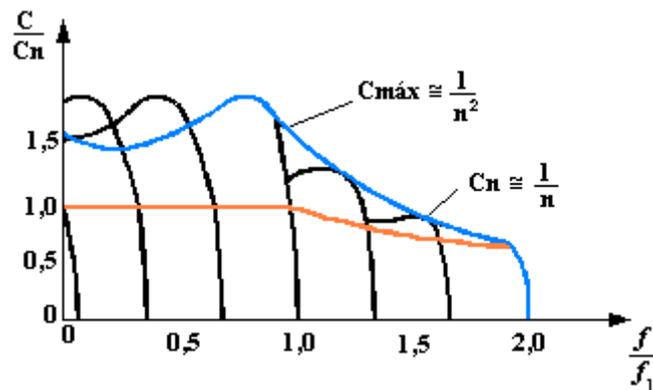


Figura 1.41 – Enfraquecimento de campo para valores de tensão e frequência acima dos nominais

- Em função de que as formas de onda, tanto de tensão como de corrente, produzidas pelos conversores de frequência não são senoidais puras, ou seja, possuem um alto conteúdo de harmônicos de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordem, as perdas nos motores são maiores. Ainda, em função dos picos de tensão, o isolamento do motor deve ser dimensionado para suportar até o dobro da tensão nominal (linha). Portanto, faz-se necessário uma redução nas características nominais do motor de aproximadamente 15%;

1.3.5 SENTIDO DE ROTAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Um motor de indução trifásico trabalhará em qualquer sentido dependendo da conexão com a fonte elétrica. Para inverter o sentido de rotação, inverte-se qualquer par de conexões entre motor e fonte elétrica.

Os motores WEG possuem ventilador bidirecional, proporcionando sua operação em qualquer sentido de rotação, sem prejudicar a refrigeração do motor.