

LUCAS QUISSAK BARTELEGA PEIXOTO

**ASPECTOS DE PROJETO DE
MOTORES DE INDUÇÃO
MONOFÁSICOS APLICADOS EM
COMPRESSORES HERMÉTICOS
PARA REFRIGERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos

2011

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Peixoto, Lucas Quissak Bartelega.

P379a Aspectos de projeto de motores de indução monofásicos aplicados em
compressores herméticos para refrigeração. / Lucas Quissak Bartelega Peixoto ; orientador
Rogério Andrade Flauzino -- São Carlos, 2011.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e
Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

AGRADECIMENTOS

À Escola de Engenharia de São Carlos por todo o aprendizado obtido durante o período da graduação, e aos profissionais que fazem desta uma universidade de ponta.

Ao orientador Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino pela disponibilidade e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, sempre presentes em todos os momentos, que possibilitaram minha graduação, sendo os grandes responsáveis por todas as minhas conquistas.

À Tecumseh do Brasil Ltda. e ao time da Engenharia de Produto – Motores, pela oportunidade de estágio e por todos os ensinamentos passados durante este período.

Aos meus colegas da República Oligarquia e minha namorada, que fizeram com que os anos vividos em São Carlos tenham sido intensos e de muito crescimento.

RESUMO

Peixoto, L. (2010) *Aspectos de projeto de motores de indução monofásicos aplicados em compressores herméticos para refrigeração*. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos 2011.

Este trabalho consiste em mostrar as variáveis existentes em um projeto de motor de indução monofásico, quando aplicado em compressores herméticos para refrigeração. Serão listados também os componentes e tipos de materiais utilizados nestes projetos, bem como os tipos de ligações existentes e os testes feitos para validação do projeto. Tal conhecimento foi complementado no período de estágio na Tecumseh do Brasil Ltda.

Palavras-chave: Projeto, Compressor Hermético, Motor de Indução, Refrigeração.

ABSTRACT

Peixoto, L. (2010) *Single phase induction motors applied in hermetic compressors for refrigeration design aspects*. Monograph – Engineering School of São Carlos, USP. São Carlos 2011.

This work consists in show the variables that exist in a design of a one-phase induction motor, when applied in hermetic compressors for refrigeration. Also will be listed the types of components and materials used in those projects, as well as the types of existing connections and tests for design validation. Such knowledge was complemented at the intern period at *Tecumseh do Brasil Ltda.*

Keyword: Design, Hermetic Compressor, Induction Motor, Refrigeration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de funcionamento de um compressor Alternativo	3
Figura 2 – Esquema de funcionamento de um compressor Rotativo	4
Figura 3 – Vista interna de um compressor hermético Alternativo	4
Figura 4 – Tipos de máquinas elétricas	5
Figura 5 – Componentes básicos dos motores de indução (a) Estator e (b) Rotor	6
Figura 6 – Representação da lei de Faraday	7
Figura 7 – Representação da lei de Lenz	7
Figura 8 – Ligação do motor Monofásico	8
Figura 9 – Motor monofásico com bobina auxiliar	8
Figura 10 – Relé Amperométrico	9
Figura 11 – Relé PTC	10
Figura 12 – Relé Voltimétrico	11
Figura 13 – Protetor Térmico	11
Figura 14 – Esquema Elétrico RSIR	13
Figura 15 – Esquema Elétrico CSIR	13
Figura 16 – Esquema Elétrico PSC	14
Figura 17 – Esquema Elétrico CSR	14
Figura 18 - Esquema Elétrico PTCSIR (sem capacitor permanente)	15
Figura 19 – Esquema Elétrico PTCSCR (com capacitor permanente)	15
Figura 20 – Lâminas do Estator (externa) e Rotor (interna)	17
Figura 21 – Rotor, corte longitudinal e lâmina	17
Figura 22 – Resultados obtidos em Simulação via SPEED	18
Figura 23 – Torque obtido em Simulação via SPEED	19
Figura 24 – Inputs do Projeto	20
Figura 25 – Input de bobina mais fina e resultados	21
Figura 26 – Input de bobina mais grossa e resultados	21
Figura 27 – Bobinagem Original	22
Figura 28 – Bobinagem Alterada	22
Figura 29 – Harmônicas bobinagem original	22
Figura 30 – Harmônicas bobinagem alterada	22
Figura 31 – Esquema de passos e bobinagem no SPEED	23
Figura 32 – Resultados obtidos com a bobinagem alterada	23
Figura 33 – Motor com bobinagem de cobre	24
Figura 34 – Resultados para altura de pacote 80 mm	24
Figura 35 – Resultados para altura de pacote 90 mm	25

Figura 36 – Troca de aço no Software	25
Figura 37 – Resultados utilizando novo aço	26
Figura 38 – Entreferro original de 0,45 mm	26
Figura 39 – Entreferro modificado para 0,70 mm	26
Figura 40 – Resultados para entreferro modificado	27
Figura 41 – Alteração na ranhura e resultados	27
Figura 42 – Saturação motor ranhura normal	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos em teste de dinamômetro	18
Tabela 2 – Resultados comparativos Real x Simulado Erro! Indicador não definido	19

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE GRÁFICOS	vii
SUMÁRIO	viii
1. OBJETIVOS	1
2. INTRODUÇÃO	2
3. O COMPRESSOR HERMÉTICO	3
4. O MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO	5
4.1. Classificação das máquinas elétricas	5
4.2. Motores de indução	6
4.3. Conceitos básicos do motor de indução	6
4.4. Princípios de funcionamento do motor de indução monofásico	8
5. COMPONENTES ELÉTRICOS	9
5.1. Relês	9
5.1.1. Relês de Partida	9
5.1.2. Relé Amperométrico	9
5.1.3. Relê PTC	10
5.1.4. Relê Voltimétrico	10
5.2. Protetor Térmico	11
5.3. Capacitores	12
5.3.1. Capacitor de Partida	12
5.3.2. Capacitor Permanente	12
6. TIPOS DE LIGAÇÕES	12
6.1. RSIR (Resistance Start / Induction Run)	12
6.2. CSIR (Capacitor Start / Induction Run)	13
6.3. PSC (Permanent Split Capacitor)	13
6.4. CSR (Capacitor Start / Capacitor Run)	14
6.5. Motores PTC	14
7. ELEMENTOS DE PROJETO DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS	16
7.1. As variáveis de Projeto	16
7.2. Validação do Software SPEED	18
7.3. Alteração da eficiência do motor	19
7.4. Alteração da bobinagem	20

7.4.1. Alteração na bitola das bobinas	20
7.4.2. Número de fios	21
7.4.3. Harmônicas	22
7.4.4. Material das bobinas	23
7.5. Altura de pacote	24
7.6. Tipos de aço	25
7.7. Entreferro	26
7.8. Ranhuras do Estator e do Rotor	27
7.9. Saturação	27
7.10. Componentes Elétricos	28
7.11. Custos de Projeto	28
8. TESTES DE VALIDAÇÃO	30
8.1. Teste de Capacidade	30
8.2. Testes de Protetor	30
8.3. Teste de Partida	30
8.4. Teste de Rotor Travado	31
8.5. Teste de Falha	31
8.6. Testes de Gabinete	31
9. CONCLUSÃO	32
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo mostrar como é feito o projeto de um motor de indução monofásico aplicado a compressores herméticos. Será dada ênfase às variáveis do projeto, deixando em segundo plano a teoria existente.

O trabalho se iniciará com os compressores herméticos, seu funcionamento e aplicações. Posteriormente será abordado o motor de indução monofásico, seus princípios básicos e o papel que este tem no compressor, juntamente com os componentes elétricos que fazem parte dos projetos.

O principal objetivo será mostrar que o projeto do motor em questão apresenta muitas variáveis. Assim, todas as etapas de desenvolvimento, no que se diz à parte elétrica (rotor, estator e componentes elétricos – relés e protetor térmico), serão consideradas e detalhadas, tendo em vista o melhor resultado de projeto levando-se em conta complexidade, tempo e custo. Para tal, será utilizado o software *SPEED*. Os testes apresentados serão de acordo com os requisitados pelos órgãos homologadores.

2. INTRODUÇÃO

A armazenagem e conservação de alimentos foi um problema decorrente dos homens por muito tempo. Após a descoberta de que o frio mantém os alimentos conservados, civilizações utilizaram de diferentes artifícios para fazê-lo. Na Grécia, por exemplo, eram usados escravos que transportavam neve das montanhas para utilizá-la em meses seguintes mais quentes.

No século XVII descobriu-se que esta prática de se utilizar baixas temperaturas tinha como motivo a redução da proliferação de micróbios, responsáveis pelo apodrecimento dos alimentos. Deste modo, os primeiros refrigeradores se tratavam de recipientes fechados onde se colocavam os alimentos junto com gelo. No século XIV foi feita a primeira patente para refrigeração, na Inglaterra. Esta segue os mesmos princípios da retirada de calor (energia) do ambiente por um líquido que muda de seu estado líquido para o gasoso.

No início do século XX desenvolveu-se o primeiro refrigerador movido à eletricidade. Este não era muito eficiente, além de complexo e de custo elevado, limitando a refrigeração apenas a pequenas aplicações.

A descoberta da propriedade criogênica dos gases foi o passo fundamental para os sistemas de refrigeração modernos: quando um gás é expandido se torna capaz de retirar energia do sistema, deixando-o mais frio. Iniciou-se então a busca pelos gases mais eficientes que pudessem ser utilizados visando este comportamento.

Assim, toda esta evolução culminou na sociedade moderna, completamente dependente de sistemas refrigeradores. Esta deixou de tê-los como um artigo de luxo, se tornando uma das necessidades básicas de residências e em alguns setores do comércio.

3. O COMPRESSOR HERMÉTICO

Pode-se dizer que o compressor é o “coração” do sistema de refrigeração, já que é o responsável pelas transformações físicas (evaporação e condensação) que ocorrem no fluido refrigerante. Por definição, o compressor “é uma máquina alternativa ou rotativa que se usa para comprimir um fluido” (HOUAISS, 2001). Sendo este perfeitamente selado, impedindo a troca de ar com o ambiente externo, se trata de um compressor *hermético*.

O projeto de um compressor hermético visa o desenvolvimento de um equipamento de fácil manutenção, custo baixo, silencioso e eficiente. Por estes motivos, em praticamente todos os refrigeradores domésticos estão presentes um conjunto moto-compressor. Vale ressaltar que este tipo de compressor é aplicado apenas para baixas potências.

O compressor atua criando o fluxo do refrigerante ao longo dos componentes do sistema. No processo, recebe vapor refrigerante em baixas temperatura e pressão e eleva o vapor até uma pressão e temperatura maior. Junto com o capilar (ou outro dispositivo de expansão), o resultado é que no evaporador a pressão e temperatura do refrigerante são reduzidas, permitindo assim que ele absorva calor. Já no condensador elas são aumentadas, permitindo que ele ceda calor para o meio ambiente. Os mais comuns tipos de compressores herméticos são os Alternativos e os Rotativos.

Nos compressores alternativos o gás é comprimido em uma câmara de volume variável por um pistão, ligado a um mecanismo biela-manivela similar ao de um motor alternativo. Quando o pistão (em seu movimento ascendente) comprime o gás a um valor determinado, uma válvula se abre deixando o gás escapar, praticamente com pressão constante. Ao final do movimento de ascensão, a válvula de exaustão se fecha e a de admissão se abre, preenchendo a câmara à medida que o pistão se move. A Figura 1 mostra o esquema de funcionamento de um compressor alternativo.

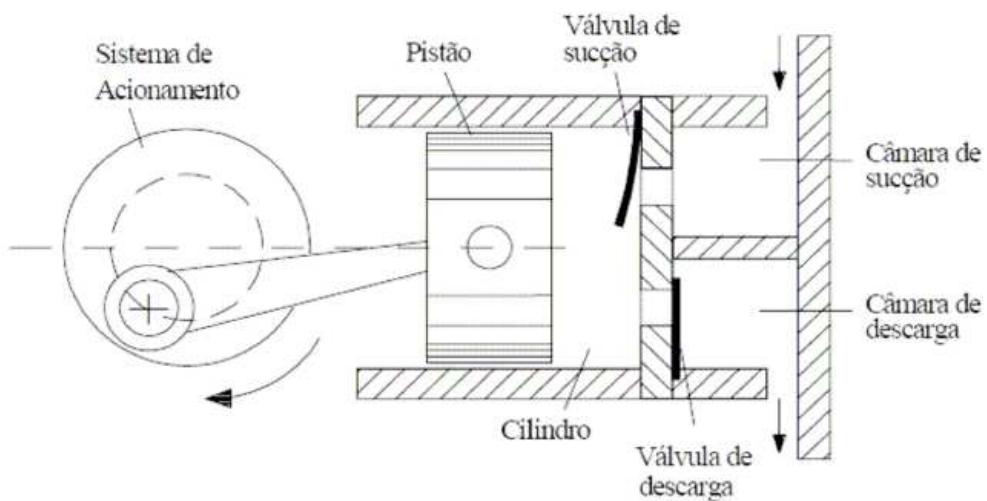


Figura 1 - Esquema de funcionamento de um compressor alternativo

Nos compressores rotativos, um rotor é montado dentro de uma carcaça com uma excentricidade (desnívelamento entre o centro do eixo do rotor e da carcaça). No rotor são montadas palhetas móveis, de modo que a rotação faz as palhetas se moverem para dentro e para fora de suas ranhuras. O gás contido entre duas palhetas sucessivas é comprimido à medida que o volume entre elas diminui devido à rotação e à excentricidade do rotor.

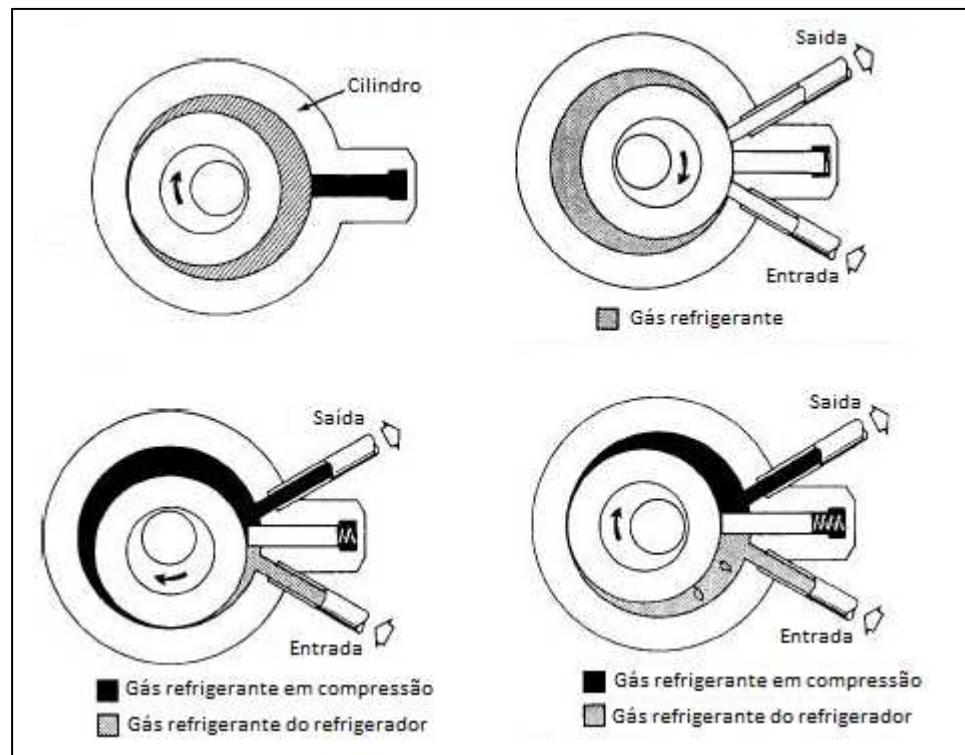


Figura 2 - Esquema de funcionamento de um compressor rotativo

Os compressores são formatos por dezenas de partes. Na Figura 3 ilustra-se uma vista interna de um compressor hermético tipo alternativo.

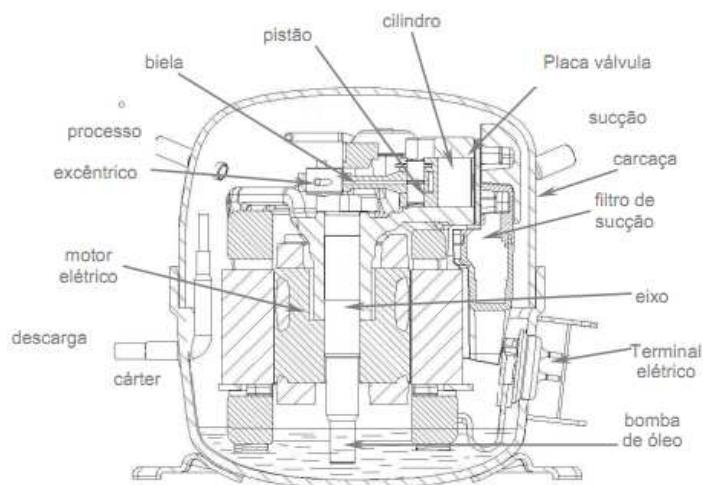


Figura 3 - Vista interna de um compressor hermético alternativo

O acionamento destes equipamentos é feito através dos motores de indução. Nos capítulos a seguir serão explicados os princípios de funcionamento destes motores, assim como as variáveis de projeto existentes.

Basicamente, os motores são projetados de acordo com as características do compressor no qual será inserido, ou seja, levando em consideração fatores como óleo e gás refrigerante utilizados. Visto a necessidade global na busca pela diminuição da energia consumida, percebe-se a necessidade de se ter projetos otimizados, e compressores mais eficientes.

4. O MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

4.1. Classificação das máquinas elétricas

As máquinas elétricas podem ser classificadas em dois tipos: estacionárias e rotativas. As rotativas são divididas em dois grandes grupos: as de corrente contínua e as de corrente alternada. Ambas são constituídas de dispositivos reversíveis, do ponto de vista conversão de energia, podendo operar seja como motor seja como gerador.

Dentre as máquinas de corrente alternada há máquinas síncronas e máquinas assíncronas, essas últimas são também denominadas máquinas de indução. Tais máquinas são compostas, normalmente, de dois enrolamentos. Por outro lado, há máquinas em que um enrolamento é substituído por peças polares de imãs permanentes e, ainda, outras máquinas, cujos princípios de funcionamento são baseados em propriedades magnéticas, como a relutância ou a histerese.

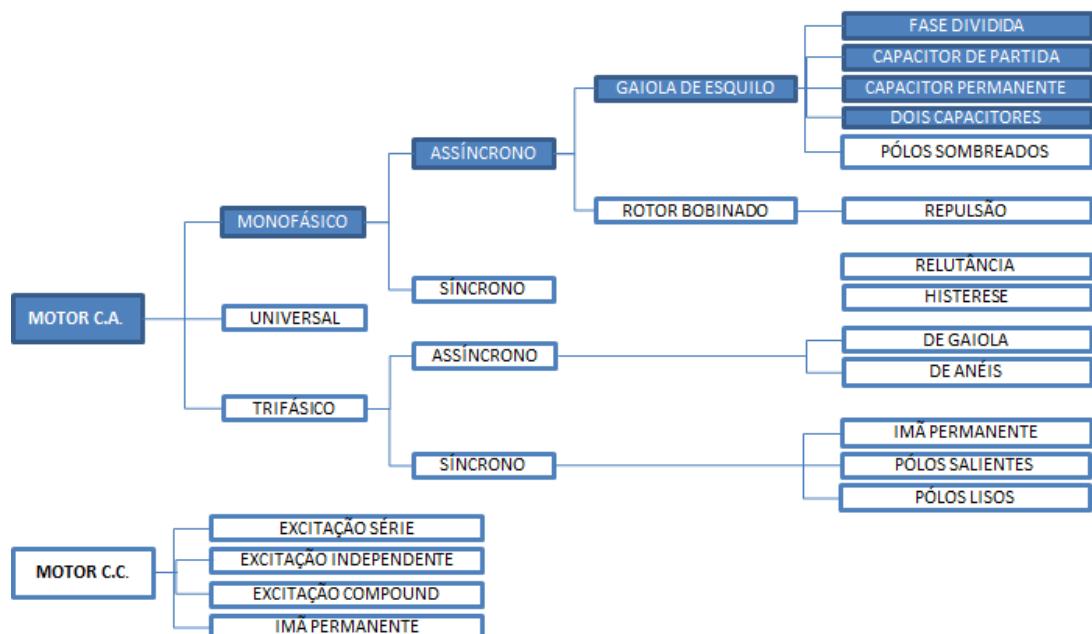
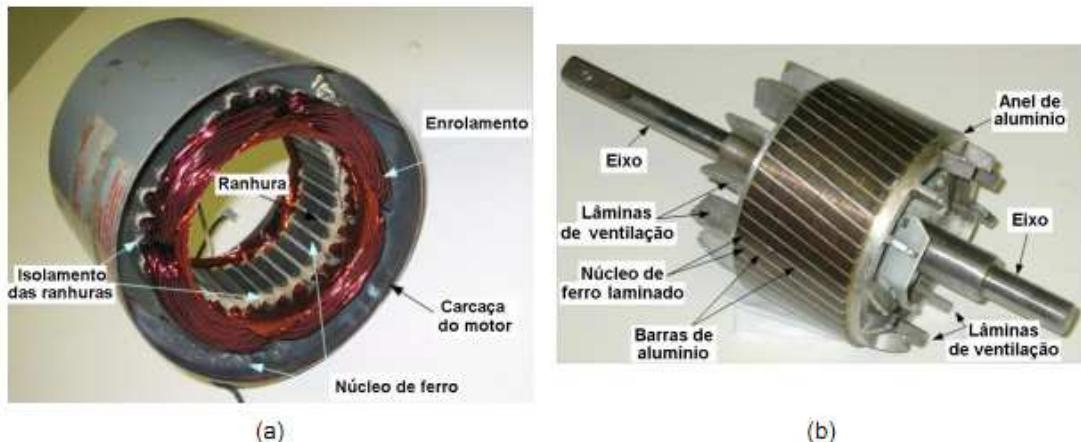


Figura 4 - Tipos de máquinas elétricas

4.2. Motores de Indução

A máquina de indução é um tipo de motor assíncrono. Estes, historicamente, foram difundidos em substituição às máquinas de corrente contínua, por serem menos ruidosos, necessitarem menos manutenção, serem mais simples e baratos.

Estas máquinas são compostas de basicamente duas partes, sendo uma estacionária (estator) e outra rotativa (rotor). Eles são montados de forma que se tenha um eixo em comum entre ambos, porém de um modo que não haja contato entre eles.



O estator é formado por finas chapas de aço que apresentam ranhuras internas, por onde são inseridos fios metálicos (geralmente cobre ou alumínio), formando as bobinas, elemento responsável pela criação do campo magnético. As lâminas são submetidas a um tratamento térmico, a fim de se reduzir as perdas por correntes parasitas e histerese.

De maneira similar tem-se o rotor, com lâminas tratadas termicamente e com ranhuras, nas quais se alojam longitudinalmente os enrolamentos. O rotor presente nos motores de indução monofásico são os Rotores com Gaiola de Esquilo. Este tipo de motor é, dentre os vários tipos existentes vistos anteriormente, um dos mais simples, baratos e de fácil instalação.

O motor de indução monofásico é geralmente maior e menos eficiente que um motor de indução trifásico. Porém, pela instalação elétrica de residências, comércios e algumas indústrias ser feita em duas fases (ou fase-neutro), vê-se a necessidade do uso dos motores monofásicos. Não apenas presentes nos compressores, estes tipos de motores são vistos também em condicionadores de ar e ventiladores, por exemplo.

4.3. Conceitos básicos do motor de indução

Os motores de indução seguem os princípios das Leis de Faraday-Neumann-Lenz, as quais quantificam a indução eletromagnética, que é o efeito da produção de corrente elétrica em um circuito colocado sob efeito de um campo magnético variável ou por um circuito em

movimento em um campo magnético constante. Iniciaremos a abordagem destas máquinas com a abordagem destas leis.

- **Lei de Faraday:** A corrente elétrica induzida em um circuito fechado por um campo magnético é proporcional ao número de linhas do fluxo que atravessa a área envolvida do circuito, na unidade de tempo. Neumann expressou tal lei matematicamente.

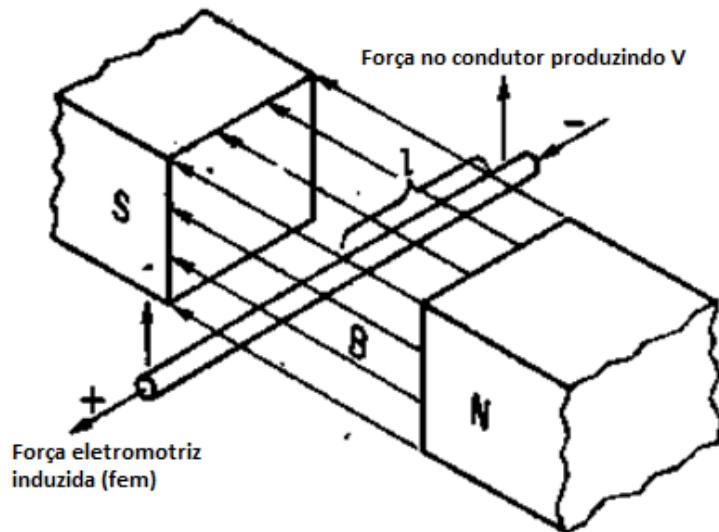


Figura 6 - Representação da lei de Faraday

- **Lei de Lenz:** Havendo diminuição do fluxo magnético, a corrente criada gerará um campo magnético de mesmo sentido do fluxo magnético da fonte. Havendo aumento, a corrente criada gerará um campo magnético oposto ao sentido do fluxo magnético da fonte.

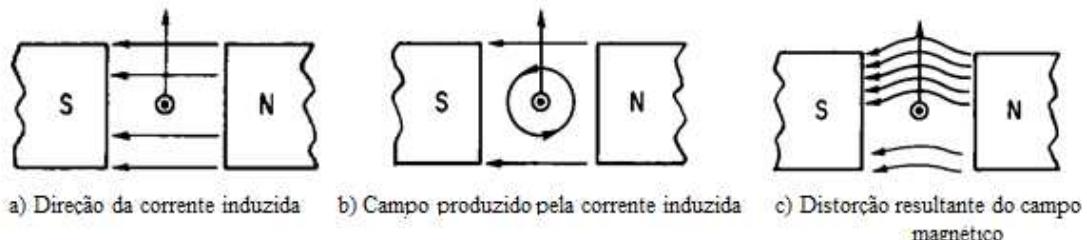


Figura 7 - Representação da lei de Lenz

Assim, as leis juntas nos permite entender o comportamento físico de quando induzimos a corrente elétrica em um circuito fechado. Resumindo:

- Se um condutor é passado através de um campo magnético, a tensão é induzida através do condutor. (Lei de Faraday).
- A corrente que flui no condutor cria um campo magnético ao redor do condutor, que se opõe ao campo indutor. (Lei de Lenz).
- A oposição é uma força mecânica que pode ser usada para criar o trabalho.

4.4. Princípios de funcionamento do motor de indução monofásico

Neste trabalho será abordado o motor de indução monofásico com rotor gaiola de esquilo, o mais comum utilizado em compressores herméticos.

Considera-se inicialmente que o motor, conforme esquematizado na Figura 8, tem seu enrolamento principal (distribuído nas ranhuras das lâminas do estator) conectado a uma fonte de tensão alternada.

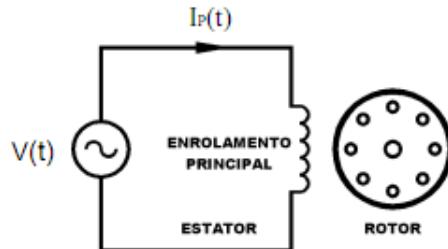


Figura 8 - Ligação do motor monofásico

Assim, surge no enrolamento uma corrente elétrica. Porém, temos que este enrolamento monofásico produz um campo magnético com comportamento estacionário, sendo pulsante no tempo, não sendo suficiente então para fazer com que o rotor gire, não conseguindo assim acelerar e atingir a rotação nominal (as correntes induzidas criam torques de direções opostas no rotor).

Deste modo, torna-se necessário criar um desequilíbrio no campo do estator, para que haja força suficiente para o rotor girar, ou seja, um torque de partida. É utilizada então a bobina auxiliar, posicionada a 90° em relação à principal, conforme a figura 9. Essa bobina faz com que o campo resultante seja girante, e assim este campo interage com a corrente do rotor produzindo torque.

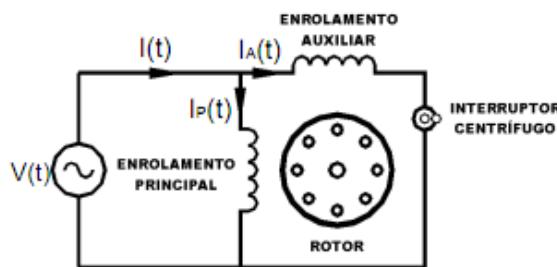


Figura 9 - Motor monofásico com bobina auxiliar

Este torque produzido deve ser suficiente para vencer as forças existentes no regime estacionário, de modo que o motor possa partir. A bobina auxiliar, ou “bobina de partida”, já que é utilizada principalmente na partida do motor, pode também ser projetada para manter-se energizada durante o funcionamento do motor. Para isso, existem diferentes tipos de ligações,

empregando o uso de componentes elétricos, como capacitores e relés, como será visto no capítulo a seguir.

5. COMPONENTES ELÉTRICOS

Foi visto até então que o motor de indução monofásico com rotor gaiola de esquilo necessita de duas bobinas para seu funcionamento: a principal, ou de marcha, responsável pelo funcionamento contínuo do motor e a auxiliar, ou de partida, responsável por compor o torque necessário para partida do motor.

Analisaremos inicialmente os componentes que possibilitam os diferentes tipos de ligações, bem como os elementos responsáveis pela proteção do conjunto moto-compressor. [2]

5.1. Relês

5.1.1. Relês de Partida

O relê de partida do compressor hermético é um dispositivo que energiza a bobina de partida do motor e desconecta esta bobina após o motor alcançar a rotação normal de funcionamento.

5.1.2. Relê Amperométrico

Possui os contatos normalmente abertos. Quando o motor é energizado, a corrente que passa pela bobina do relê cria um campo magnético que atrai a armadura para cima, proporcionando o fechamento dos contatos e energizando a bobina de partida do motor.

Quando o motor do alcança a rotação de síncrona, a corrente diminui até o ponto em que o campo magnético não tem força para manter a armadura para cima. Dessa forma a armadura desce pela força da gravidade abrindo os contatos e consequentemente desconectando a bobina de partida do motor.

A figura 10 apresenta um exemplo de relê amperométrico.



Figura 10 - Relê Amperométrico

O relê Amperométrico tem como características técnicas as correntes de *Pick-up* e *Drop-out*, que se tratam da máxima e mínima correntes suportadas pelo componente, respectivamente. Assim, o projeto do motor aplicado a um compressor engloba a escolha de um relê com as características suficientes para garantir o funcionamento do motor.

5.1.3. Relê PTC

O relê PTC é formado por uma pastilha de material cerâmico. Este material possui a propriedade de aumentar a resistência elétrica quando aquecido pela corrente que passa através dele. Durante a partida do motor, o PTC está frio, e com uma resistência elétrica baixa, consequentemente, conduz corrente através da bobina de partida, fazendo o motor girar. Esta corrente o aquece fazendo com que a resistência aumente e a corrente diminua através da bobina de partida até se tornar praticamente zero.

Seu uso é recomendado para freezers e refrigeradores domésticos, onde o tempo entre os ciclos de operação é suficiente para o PTC esfriar e estar pronto para uma nova partida.



Figura 11 - Relê PTC

As características físicas do Relê PTC se baseiam em sua resistência interna, que varia dependendo do que se deseja no projeto e da tensão a qual está submetido.

5.1.4. Relê Voltimétrico

É usado normalmente em aplicações comerciais de médio porte onde estão presentes capacitores de partida e de marcha no esquema de ligação do motor. O relê voltimétrico possui os contatos normalmente fechados. A bobina do relê é ligada em paralelo com a bobina de partida do compressor.

A tensão na bobina de partida aumenta quando aumenta a velocidade do motor até atingir o valor específico de *pick-up*, neste ponto a armadura do relê é atraída abrindo os seus contatos e desconectando o capacitor de partida do circuito. Após a abertura, há tensão induzida na bobina de partida suficiente para continuar atraindo a armadura e manter os contatos do relê abertos.

Analogamente aos relês amperométricos, os relês voltmétricos apresentam características técnicas de *pick-up* e *drop-out*, relacionados com as tensões máxima e mínima suportadas.

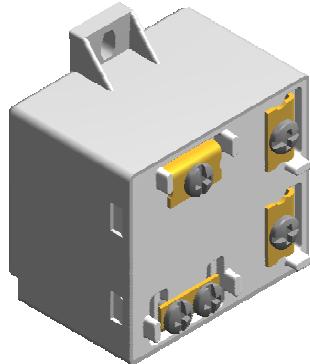


Figura 12 - Relê Voltimétrico

5.2. Protetor Térmico

Este componente é ligado em série com o circuito que alimenta o motor. É fixo encostado à carcaça do compressor e atua abrindo o circuito e desligando o compressor rapidamente se houver qualquer aumento anormal de temperatura ou de corrente ocasionado por problemas mecânicos, elétricos ou por aplicação inadequada.



Figura 13 - Protetor Térmico

Um disco bimetálico dentro do protetor, sensível a excesso de temperatura e/ou corrente, flexiona afastando seus contatos e abre o circuito. Alguns protetores possuem uma resistência em série com o disco que com o seu aquecimento, auxilia a abertura dos contatos em situações de aumento excessivo da corrente elétrica.

5.3. Capacitores

5.3.1. Capacitor de Partida

Estes capacitores entram em funcionamento somente na partida do compressor, sendo desligados do circuito logo em seguida por meio de um relé. A função deste capacitor é, claramente, dar ao motor um alto torque de partida, que é exigido normalmente em sistemas de refrigeração onde as pressões não estão totalmente equalizadas.

5.3.2. Capacitor Permanente

O capacitor permanente, ou de marcha, é projetado para atuar continuamente em série com a bobina de partida (ligação PSC), melhorando a eficiência, o torque de partida e de trabalho do motor. Trata-se de um elemento de custo elevado, e por isso não é sempre utilizado.

6. TIPOS DE LIGAÇÕES

Os motores monofásicos vêm em uma variedade de configurações. O motivo é que estes não tem inherentemente uma auto-partida, como foi visto anteriormente. Então, cada tipo de motor soluciona o problema de partida de uma maneira diferente.

As conexões elétricas do motor são feitas através de três terminais fixos na carcaça do compressor, identificadas baixo:

C – Terminal comum às duas bobinas

S – Terminal da bobina de partida

R – Termina da bobina de marcha

Analisaremos então as técnicas de partida existentes, levando em consideração as possíveis ligações destes terminais pelos componentes elétricos.

6.1. RSIR (Resistance Start / Induction Run)

Se o enrolamento auxiliar é enrolado de maneira diferente a partir do enrolamento principal, com um número menor de fios e mais voltas, não há diferença na reatância dos dois enrolamentos. Quando uma tensão é aplicada, o campo se acumula no enrolamento principal antes do enrolamento auxiliar.

O rotor percebe esta diferença de tempo como um campo que se deslocam no estator. Há então um movimento relativo, e a corrente é induzida nas barras do rotor e este gira. Uma vez que o motor é ligado, o enrolamento auxiliar não é mais necessário e é desconectada.

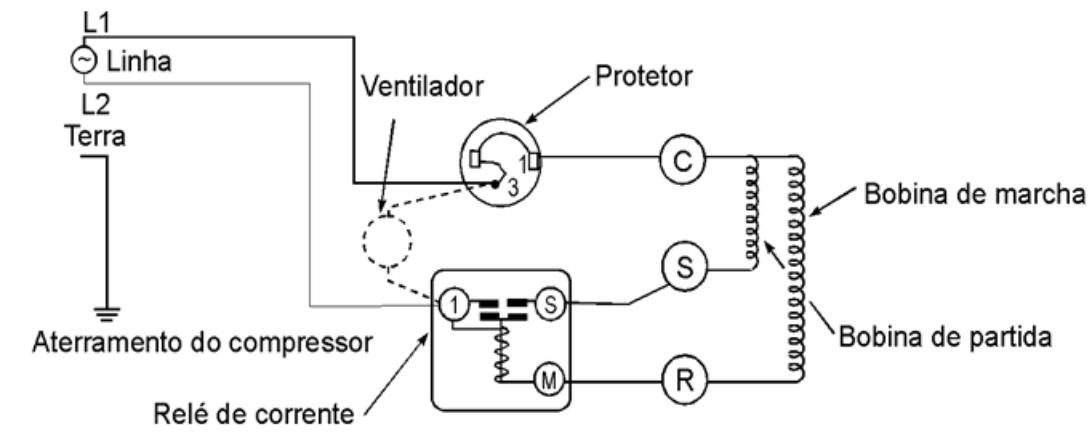


Figura 14 - Esquema Elétrico RSIR

6.2. CSIR (Capacitor Start / Induction Run)

No motor RSIR, a diferença na reatância dos enrolamentos faz com que os campos do principal e do auxiliar reajam uns com os outros.

Se um grande capacitor é colocado em série com o enrolamento auxiliar este faz com que sua corrente lidere a corrente principal. Isso faz com que os dois campos dos enrolamentos interajam ainda mais, aumentando o fluxo que corta as barras de rotor produzindo um torque de partida ainda maior do que o observado nos motores RSIR.

Mais uma vez, após a partida do motor, a bobina auxiliar e capacitor são desconectados.

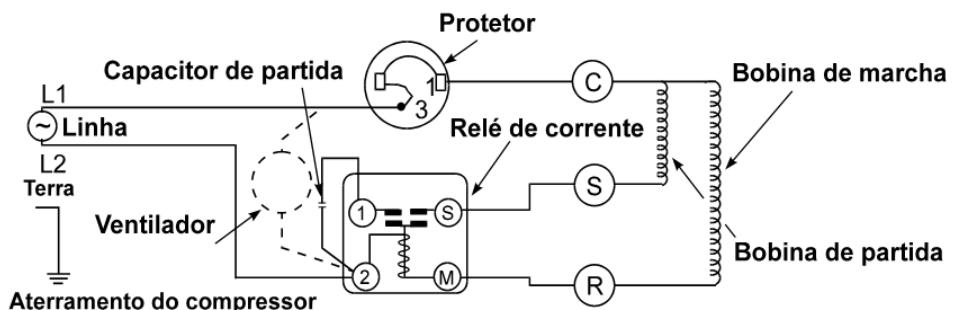


Figura 15 - Esquema Elétrico CSIR

6.3. PSC (Permanent Split Capacitor)

Desconectando o enrolamento auxiliar em motores RSIR e CSIR apenas o enrolamento principal transporta a carga em execução.

Ao se combinar um menor valor de capacitância com o enrolamento auxiliar adequado, este pode permanecer no circuito de fluxo e contribuir para o motor em funcionamento. Esta é a teoria que envolve os motores PSC. Para tal, é necessário o uso do capacitor permanente, que fará com que a bobina auxiliar permaneça no circuito. Este tem uma capacitância menor que o capacitor de partida.

Pela bobina auxiliar estar no circuito todo o tempo, os motores PSC são mais eficientes que RSIR ou motores CSIR. Abaixo o esquema de ligação.

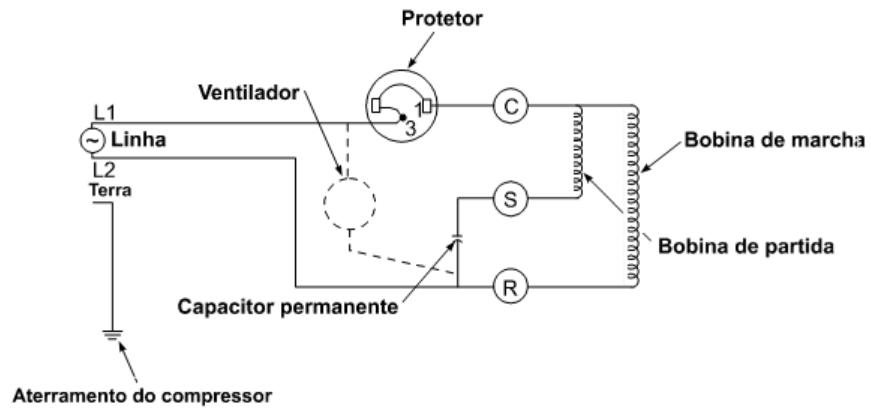


Figura 16 - Esquema Elétrico PSC

6.4. CSR (Capacitor Start / Capacitor Run)

Se a capacitância de um motor PSC pode ser aumentada na partida e reduzida a plena carga, o motor teria a eficiência de um PSC e o torque de partida de uma CSIR.

O motor CSR tem esta característica, pois contém um capacitor de curta duração (de partida) ligado em paralelo com um capacitor permanente de menor valor na partida. Após o início, o capacitor de alto valor é então desconectado. O motor continua a funcionar como um motor PSC.

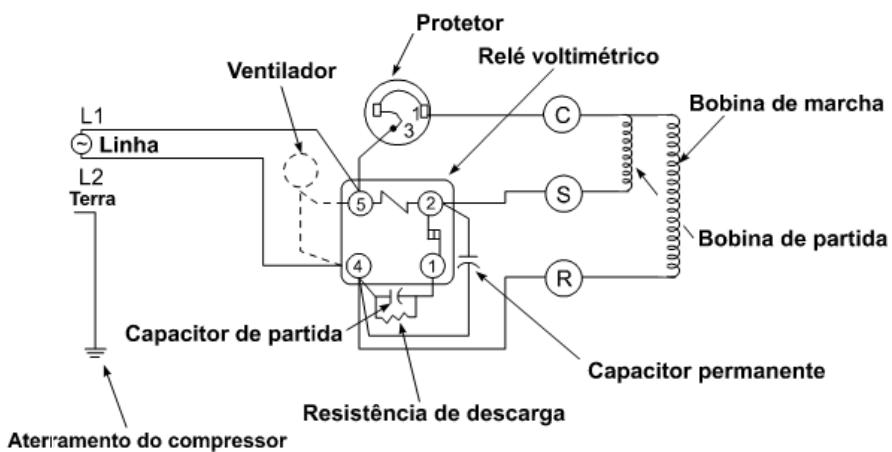


Figura 17 - Esquema Elétrico CSR

6.5. Motores PTC

Como visto anteriormente, o dispositivo PTC tem um valor de resistência fixa na temperatura ambiente. Com a corrente aplicada, a temperatura do dispositivo aumenta. Com isso, a resistência do PTC aumenta rapidamente. Eventualmente, a resistência do aparelho é tão grande que aparece como um circuito aberto para o sistema.

Estes dispositivos são usados nos motores com e sem capacitores, ligado em série com a bobina auxiliar. Quando há capacitor permanente, este é ligado em paralelo ao PTC.

Por estar ligado em série com a bobina auxiliar e a corrente de partida ser elevada, o PTC aquece aumentando a resistência ôhmica, dificultando a passagem da corrente para a bobina auxiliar em frações de segundos, e só volta a permitir a passagem de corrente após alguns minutos de parada do compressor. Se eventualmente ocorrer um corte de energia com retorno em seguida, antes do PTC esfriar, o mesmo não permitirá dar nova partida. Nesses casos atípicos o protetor térmico fica atuando até que o PTC permita nova partida.

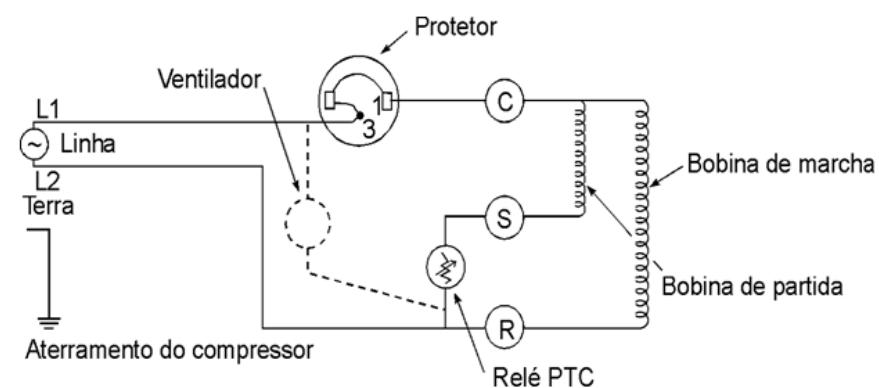


Figura 18 - Esquema Elétrico PTCSIR (sem capacitor permanente)

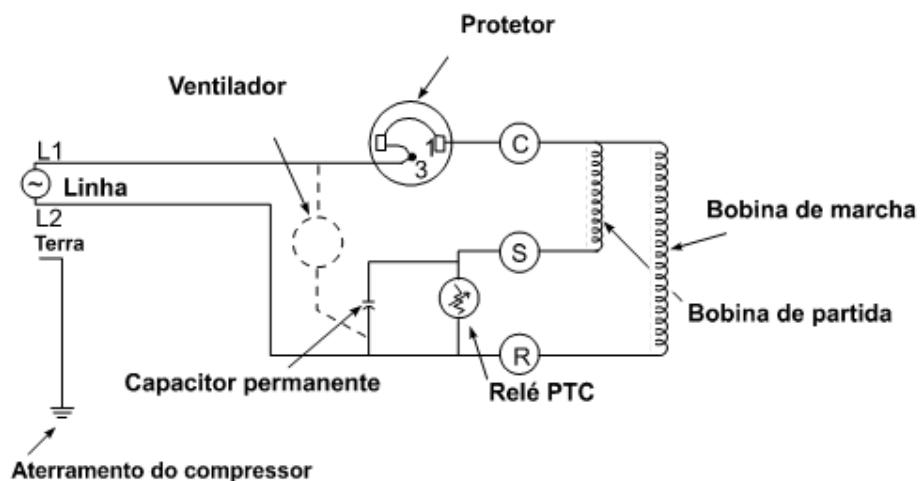


Figura 19 - Esquema Elétrico PTCSCR (com capacitor permanente)

As Figuras 18 e 19 apresentam se diferem na presença do capacitor permanente, já que o tipo PTCSIR (PTC Start Induction Run) não o contém, diferentemente do PTCSCR (PTC Start Capacitor Run).

7. ELEMENTOS DE PROJETO DE MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS

Foi visto anteriormente os tipos de motores elétricos existentes e o princípio de funcionamento dos motores de indução monofásicos. Com a utilização do software de simulação *SPEED* (Professor Tym Miller, da Universidade de Glasgow – Escócia) será mostrado como a variação dos principais elementos de projeto dos motores de indução monofásicos alteram sua características de funcionamento.

A adoção do motor de indução monofásico foi feita para que fossem aproveitados os recursos disponibilizados pela Tecumseh do Brasil Ltda., no que se diz respeito à metodologia de projetos e ferramentas de simulação.

Nesta etapa será analisado como alterações realizadas nas diversas partes do motor afetam suas características em funcionamento, seja eficiência, corrente, torque, etc. Um projeto ideal se trata daquele capaz de suprir as necessidades de maneira completa, uma vez que, como será visto posteriormente, a busca pela melhoria em algum aspecto geralmente culmina na piora de outro.

7.1. As Variáveis de Projeto

Foi visto no capítulo 4 como são formados os motores de indução monofásicos, e neste caso, com rotores gaiola de esquilo. Seu funcionamento se baseia no circuito magnético formado a partir da interação do estator com o rotor, através do campo magnético gerado. Assim, as variáveis de projeto referem-se a alterações nos elementos que formam o conjunto estator/rotor, bem como os componentes elétricos vistos no capítulo 6.

Para o estator têm-se como elementos de projeto as bobinas e as lâminas. No caso das bobinas, as alterações podem ser feitas modificando a espessura, a quantidade e o material utilizado (cobre ou alumínio, sendo o primeiro deles de melhores propriedades elétricas, porém mais caro). Para as lâminas, temos alterações possíveis em seu *design* (tamanho e formato das ranhuras), quantidade e também o tipo de aço utilizado.

O projeto do rotor engloba também no *design* de suas lâminas, assim como o diâmetro das mesmas, visando uma maior proximidade com o diâmetro interno do estator, diminuindo assim as perdas magnéticas. Outras variáveis existem, como o anel de curto e o ângulo de hélice, porém neste trabalho não serão abordadas a fundo uma vez que se relacionam muito com os processos de produção existentes, não sendo então variáveis facilmente alteradas de acordo com cada projeto.

A Figura 20 mostra as lâminas do estator e rotor. Em ambos os casos estas devem ser colocadas em um conjunto de lâminas sobrepostas, formando um pacote de lâminas, o qual se

torna a base de ambas as peças. Tem-se como diferença que as lâminas do estator são postas de forma que as ranhuras estejam perfeitamente alinhadas uma com as outras, enquanto as do rotor apresentam certo ângulo de inclinação, que tem como finalidade minimizar as harmônicas.

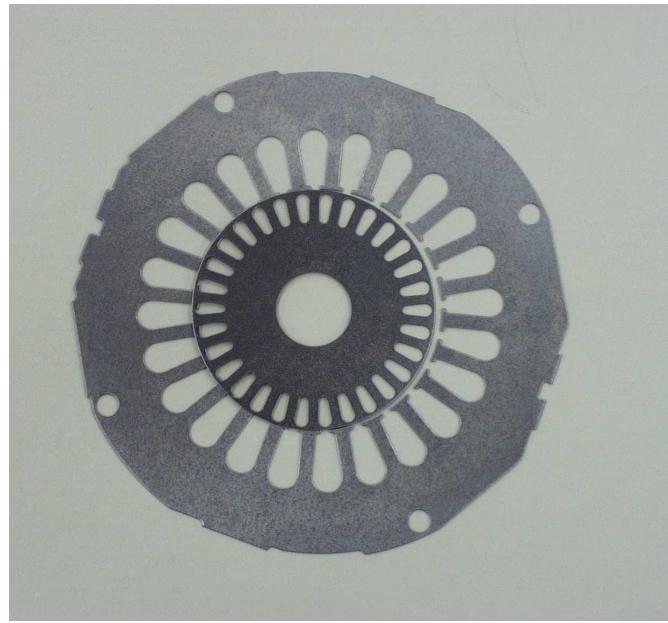


Figura 20 - Lâminas do estator (externa) e rotor (interna)

Para um maior entendimento de como as lâminas são postas em conjunto e formam o rotor, a figura 21 mostra um rotor, seu corte longitudinal e sua lâmina. A parte de alumínio do rotor, em cima e embaixo do pacote de lâminas, se trata do anel de curto anteriormente citado, material de alumínio responsável por curto-circuitar as barras do rotor.



Figura 21 - Rotor, corte longitudinal e lâmina

7.2. Validação do Software SPEED

Primeiramente, são mostrados abaixo resultados comparativos entre o teste de dinamômetro¹ e os resultados obtidos através de simulação utilizando o software proposto, a fim de validá-lo para que seja suficiente em garantir resultados próximos aos reais quando os parâmetros do projeto forem alterados.

Tabela 1: Resultados obtidos em teste de dinamômetro.

MOTORES # E1685B - PSC - 230V/60Hz						
#ESTAT.	LINE		RPM	TORQUE	PF	EEF
#ROTOR	AMPS	WATTS		M+A		%
E1685B_#01	4	859	3496	61,1	0,929	84,8
E1685B_#02	3,97	855	3493	60,9	0,932	85,2
E1685B_#03	3,97	857	3488	60,7	0,933	84,9
E1685B_#04	3,97	853	3494	61,3	0,931	85,5
Média	3,98	856	3493	61	0,931	85,1

Resistências reais do motor: Bobina de Marcha 2,62Ω, Bobina Auxiliar: 7,00Ω.

OP[Ctrl+A] - OutPut						
Vt	230.0000	PElec	851.0127	Bstpk	1.7918	TBrk
Freq	60.0000	IL1	4.0229	Bsypk	1.6757	IBrk
Tshaft	23.4997	R1	2.6315	Brtpk	1.9334	TLR
P.F.	0.9197	R1aux	7.2085	Brypk	1.0234	ILR
Effcy	84.1139	rpm	3432.6665	WtCuMain	0.5549	ILRMain
						29.0833

Figura 22: Resultados obtidos em simulação via SPEED.

A Tabela 1 apresenta os valores obtidos em teste da corrente e potência de linha (LINE AMPS e WATTS), a rotação (RPM), o torque total, da bobina principal mais auxiliar (TORQUE M+A), o fator de potência (PF) e a eficiência (EEF %).

A Figura 22 representa os resultados obtidos pelo software: Tensão (Vt), frequência (Freq), torque do rotor (Tshaft), fator de potência (P.F.), eficiência (Effcy), potência consumida (PElec), corrente de linha (IL1), resistências das bobinas principal e auxiliar (R1 e R1aux), rotação (rpm) e os parâmetros obtidos por elementos finitos para cálculo de saturação, apresentados nas duas últimas colunas.

¹Teste de dinamômetro: Dinamômetro é o equipamento capaz de medir a potência, trabalho executado na unidade de tempo, de um motor em suas diversas condições de funcionamento.

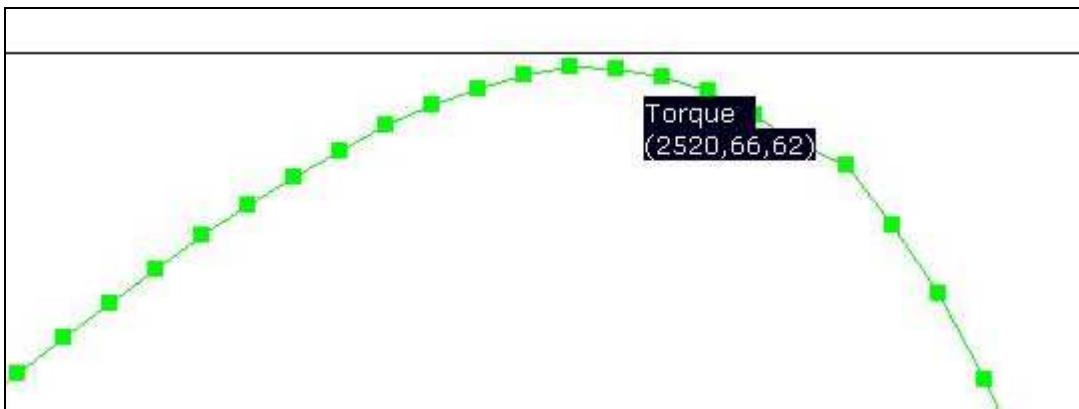


Figura 23: Torque obtido em simulação via SPEED.

É visto então através da comparação entre a Tabela 1 e a Figura 22 resultados bastante semelhantes entre o motor original testado e o simulado. Resumindo:

Tabela 2: Resultados comparativos Real x Simulado.

	I _L	RPM	Torque	FP	Eff	Rmain	Raux
Real (médio)	3,98	3493	62,6	0,921	85,1	7	2,62
Simulado	4,02	3432	66,62	0,919	84,11	7,2	2,63
Variação	-1,01%		1,75%	-6,42%	0,22%	1,16%	-2,86%

Com estes resultados conclui-se que o software utilizado apresenta uma boa precisão. A maior variação ocorreu com o torque, o que já era esperado considerando a metodologia de projeto utilizado, onde este valor geralmente está acima do real.

7.3. Alteração da eficiência do motor

Temos, pelos princípios básicos:

$$\text{Potência} = I^2 \times Z \text{ (onde } I = \text{corrente, } Z = \text{impedância)}$$

e

$$\text{Eficiência} = \text{Potência}_{\text{saída}} / \text{Potência}_{\text{entrada}}.$$

Assim, para reduzir o consumo, e consequentemente aumentar a eficiência, deve-se diminuir a impedância ou a corrente no motor. Os itens a seguir mostram como isto pode ser feito.

É importante ressaltar que tem-se como “regra” nos projetos de motores que qualquer alteração na performance de funcionamento afetará sua performance na partida, e vice-versa. Ou

seja, para projetos já otimizados, qualquer alteração feita buscando a melhoria da eficiência do motor acarretaria uma piora em sua partida, podendo ser crucial para o funcionamento do motor. Então, os itens a seguir, em projetos já otimizados, devem ser cuidadosamente alterados visando o pleno funcionamento do motor.

7.4. Alteração na bobinagem

A impedância Z acima citada refere-se à resistência da bobina (R) e à indutância (X), na relação:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Para se reduzir R , tem-se como opção engrossar a bitola das bobinas do estator ou diminuir este número de bobinas. Para se reduzir a indutância X , além da diminuição do número de fios tem-se a escolha de um metal com maior permeabilidade.

Além destes, como já citado anteriormente, as harmônicas também afetam a eficiência do motor. O modo que as espiras são distribuídas nos dentes do estator geram tais harmônicas, e um projeto otimizado contempla a melhor distribuição possível a fim de se minimizar as perdas por este motivo.

A seguir serão mostrados os resultados de simulação quando tais alterações são efetuadas. Os resultados serão sempre comparados com os mostrados na Figura 22 vista anteriormente, dados provenientes da entrada dos valores mostrados na Figura 24 abaixo, que apresenta os inputs do projeto:

TED[Ctrl+E] - Input									
Vs	230.0000	XET	0.4000	XBst	1.2000	PC	100.0000	PC_WA	63.0000
Freq	60.0000	AuxXET	0.5000	XBsy	1.0000	TCC	0.3930	TCC_WA	0.3850
FAWG_1	18.5000	XFe	1.0000	XBrt	1.1500	WireDens	8890.0000	Dens_WA	2700.0000
FAWG_A	20.5000	TorqSh...	23.5000	XBry	1.0000	PPaths	1		

Figura 24: Inputs do Projeto

7.4.1. Alteração na bitola das bobinas

Alterando-se a bitola das bobinas temos uma variação na impedância, como explicado anteriormente, o que influencia na eficiência do motor. A Figura 25 ilustra dois casos de alteração da bitola da bobina de marcha, a primeira delas deixando-a mais fina e a segunda mais grossa. As alterações foram feitas apenas na bobina de marcha já que a mesma apresenta mudanças mais significativas nos resultados finais, como potência consumida e torque. Alterações na bobina auxiliar seriam em torno de quatro vezes menor, ou seja, menos impactantes nos resultados finais.

TED[Ctrl+E] - Input							
Vs	230.0000	XET	0.4000	XBst	1.2000	PC	100.0000
Freq	60.0000	AuxXET	0.5000	XBsy	1.0000	TCC	0.3930
FAWG_1	20.5000	XFe	1.0000	XBrt	1.1500	WireDens	8890.0000
FAWG_A	20.5000	TorqSh..	23.5000	XBry	1.0000	PPaths	1

OP[Ctrl+A] - OutPut							
Vt	230.0000	PElec	917.3965	Bstpk	1.7421	TBrk	67.2045
Freq	60.0000	IL1	4.7019	Bsypk	1.6198	IBrk	16.2496
Tshaft	23.4983	R1	4.1741	Brtpk	1.8825	TLR	8.6001
P.F.	0.8483	Riaux	7.2085	Brypk	0.9893	ILR	25.1025
Effcy	77.6214	rpm	3415.0041	WtCuMain	0.3482	ILRMain	25.7387
				WtCuAux	0.1156	ILRAux	1.3367

Figura 25: Input de bobina mais fina e resultados.

TED[Ctrl+E] - Input							
Vs	230.0000	XET	0.4000	XBst	1.2000	PC	100.0000
Freq	60.0000	AuxXET	0.5000	XBsy	1.0000	TCC	0.3930
FAWG_1	17.5000	XFe	1.0000	XBrt	1.1500	WireDens	8890.0000
FAWG_A	20.5000	TorqSh..	23.5000	XBry	1.0000	PPaths	1

OP[Ctrl+A] - OutPut							
Vt	230.0000	PElec	848.7016	Bstpk	1.7898	TBrk	82.2382
Freq	60.0000	IL1	4.3367	Bsypk	1.6748	IBrk	19.8026
Tshaft	23.4999	R1	2.0904	Brtpk	1.9318	TLR	9.5123
P.F.	0.8609	Riaux	7.2085	Brypk	1.0229	ILR	29.6960
Effcy	87.2939	rpm	3429.8891	WtCuMain	0.7008	ILRMain	30.4546
				WtCuAux	0.1156	ILRAux	1.3355

Figura 26: Input de bobina mais grossa e resultados.

Como é visto nos resultados, o engrossamento das bobinas provocam uma diminuição na potência elétrica, e consequentemente uma melhoria na eficiência, visto a diminuição da resistência. No caso contrário, com o afinamento, temos a queda brusca de eficiência. Para cada AWG (unidade utilizada para medição da bitola das espiras) diminuído obteve-se um acréscimo de cerca de 4% na eficiência. Claro que com este afinamento há a possibilidade de aumentar o número de espiras por passo (número de bobinas que passam pelo dente do estator), já que o preenchimento permite. Porém, o que está sendo analisado é apenas o que estas alterações pontuais alteram na performance do motor. O mesmo serve para o segundo caso, uma vez que este engrossamento aumentou muito o preenchimento, tornando-se inviável sua fabricação.

7.4.2. Número de espiras

Como citado anteriormente, uma alternativa é alterar o número de espiras, a fim, novamente, de se alterar a resistência. Apenas diminuir a quantidade de fios, mesmo diminuindo a resistência da bobina, não é uma alternativa válida já que há um aumento no fluxo magnético,

resultando em uma maior corrente (consequentemente maior potência dissipada por $R \cdot I^2$), e das perdas no núcleo, além de diminuir significativamente o torque de partida. Por outro lado, aumentar o número de bobinas, uma vez que estes foram afinados e isto é possível, causa o aumento da resistência e assim a potência consumida.

Nota-se que em ambos os casos há um aumento da potência consumida. Isso acontece justamente porque o projeto apresenta um ponto ótimo, e a partir deste ocorre um aumento das perdas para qualquer alteração realizada.

Percebe-se então a necessidade de se otimizar cada projeto, onde se busca o ponto ótimo na relação número de espiras por passo, bitola dos fios e altura de pacote, sempre levando em conta as limitações físicas, visando a maior eficiência e torque de partida suficiente.

7.4.3. Harmônicas

A distribuição otimizada das espiras, se comparado projetos onde estas têm o mesmo número e espessura, influenciam nas harmônicas geradas no motor. Parte da otimização de projetos se baseia em distribuir as espiras de maneira que estas harmônicas sejam minimizadas.

A seguir serão comparadas simulações onde a simples redistribuição das espiras aumentou a harmônica de 3^a ordem e estas influenciaram consideravelmente a eficiência do motor.

slot	Ph.1
1	44
2	42
3	30
4	24
5	12

Figura 27: Bobinagem Original.

slot	Ph.1
1	48
2	44
3	25
4	24
5	10

Figura 28: Bobinagem Alterada.

Observação: Estes valores indicados pelas figuras 27 e 28 representam o número de voltas que as espiras dão em cada dente do estator. A figura 31 demonstra mais detalhadamente.

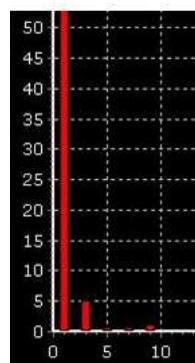


Figura 29: Harmônicas bobinagem original.

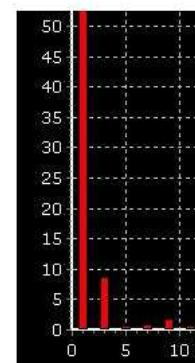


Figura 30: Harmônicas bobinagem alterada.

Percebe-se então um aumento de cerca de 50% na harmônica de 3^a ordem com a alteração da bobinagem. Para esclarecimento do que se diz respeito à bobinagem, abaixo a visualização do software do estator, com cada passo numerado:

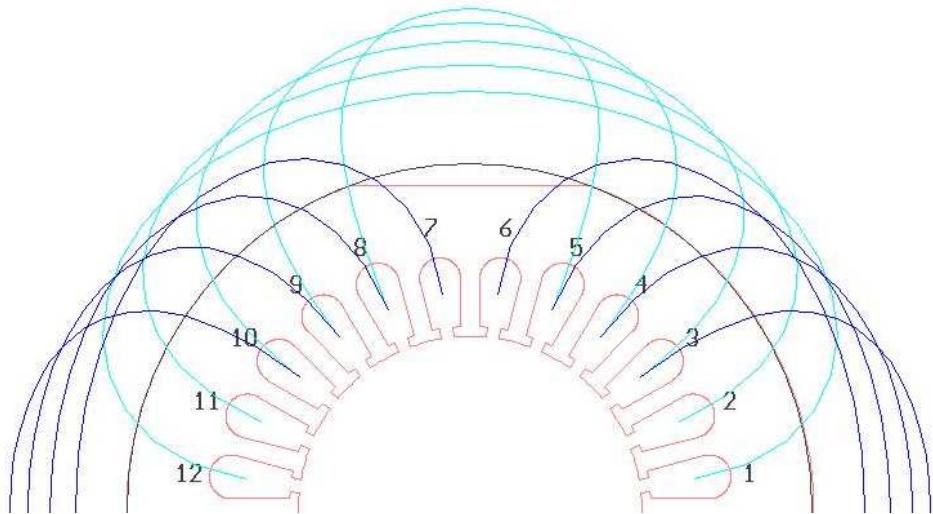


Figura 31: Esquema dos passos e bobinagem no SPEED.

Os resultados obtidos estão representados abaixo na Figura 32:

OP[Ctrl+A] - OutPut						
Vt	230.0000	PElec	882.2805	Bstpk	1.7397	TBrk
Freq	60.0000	IL1	4.6207	Bsypk	1.6155	IBrk
Tshaft	23.4994	R1	2.6368	Brtpk	1.8797	TLR
P.F.	0.8302	R1aux	7.2085	Brypk	0.9866	ILR
Effcy	80.7042	rpm	3414.5784	WtCuMain	0.5560	ILRMMain
						27.1129

Figura 32: Resultados obtidos com a bobinagem alterada.

É visto então que a presença das harmônicas influenciou em uma queda de quase 4% na eficiência do motor. Interessante verificar como algo aparentemente simples de ser trabalhado pode alterar tanto os resultados de um projeto.

7.4.4. Material das bobinas

Outra alternativa em relação à bobinagem é a troca do material utilizado na mesma. No caso, o projeto simulado trata-se da utilização de cobre na bobina de marcha e alumínio na auxiliar. As características metálicas do cobre permitem projetos mais eficientes, porém o alumínio, sendo menos denso, garante projetos mais baratos. A Figura 33 indica como ficaria tal motor com ambas as bobinas de cobre: (os parâmetros *PC*, *TCC* e *WireDens* referem-se à características físicas do material. A última coluna, *WA*, refere-se à bobina auxiliar.

TED[Ctrl+E] - Input

Vs	230.0000	XET	0.4000	XBst	1.2000	PC	100.0000	PC_WA	100.0000
Freq	60.0000	AuxXET	0.5000	XBsy	1.0000	TCC	0.3930	TCC_WA	0.3930
FAWG_1	18.5000	XFe	1.0000	XBrt	1.1500	WireDens	8890.0000	Dens_WA	8890.0000
FAWG_A	20.5000	TorqSh..	23.5000	XBry	1.0000	PPaths	1		

OP[Ctrl+A] - OutPut

Vt	230.0000	PElec	841.8346	Bstpk	1.7918	TBrk	77.8738
Freq	60.0000	IL1	3.9840	Bsypk	1.6757	IBrk	18.6945
Tshaft	23.4997	R1	2.6315	Brtpk	1.9334	TLR	9.2053
P.F.	0.9187	Riaux	4.5636	Brypk	1.0234	ILR	28.3445
Effcy	85.0321	rpm	3432.7155	WtCuMain	0.5549	ILRMain	29.0833
				WtCuAux	0.3807	ILRAux	1.3368

Figura 33: Motor com bobinas de cobre.

Os resultados indicam então que a mudança para um material com melhores propriedades magnéticas ajuda na eficiência do motor, aumentando em cerca de 1% a eficiência do mesmo.

7.5. Altura de pacote

Tem-se que quanto maior a quantidade de aço maior será a capacidade magnética do motor. Assim, a “altura de pacote” relaciona-se com a quantidade de lâminas do estator a serem agrupadas para se formar o corpo do mesmo. As implicações quanto ao uso de grande quantidade de aço (material do corpo do estator) são o custo e às limitações físicas de onde ele será instalado, uma vez que estatores grandes necessitam também de grandes carcaças.

A seguir, resultados do motor com altura de pacote de 80 e 90 mm:

Lstk 80.0000

OP[Ctrl+A] - OutPut

Vt	230.0000	PElec	851.0127	Bstpk	1.7918	TBrk	77.8709
Freq	60.0000	IL1	4.0229	Bsypk	1.6757	IBrk	18.7151
Tshaft	23.4997	R1	2.6315	Brtpk	1.9334	TLR	9.2751
P.F.	0.9197	Riaux	7.2085	Brypk	1.0234	ILR	28.3586
Effcy	84.1139	rpm	3432.6665	WtCuMain	0.5549	ILRMain	29.0833
				WtCuAux	0.1156	ILRAux	1.3359

Figura 34: Resultados para altura de pacote 80 mm.

Lstk			90.0000		
DP[Ctrl+A] - OutPut					
Vt	230.0000	PElec	838.0389	Bstpk	1.6667
Freq	60.0000	IL1	3.7662	Bsypk	1.4726
Tshaft	23.4999	R1	2.8194	Brtpk	1.7949
P.F.	0.9675	R1aux	7.6867	Brypk	0.8989
Effcy	85.1104	rpm	3420.3568	WtCuMain	0.5945
				WtCuAux	0.1233
				ILRMain	26.7620
				ILRAux	1.3386

Figura 35: Resultados para altura de pacote 90 mm.

Comparando os resultados vemos como o aumento da altura de pacote ajudou na melhoria da eficiência do motor, com uma potência elétrica dissipada mais baixa.

7.6. Tipos de aço

O tipo do aço utilizado na confecção das lâminas também interfere nos resultados do motor. Isso porque as perdas no núcleo, sendo estas por Histerese e por correntes parasitas, são amplificadas quando o aço não é bem tratado (técnicas como o *annealing* e *blueing*). Além disso, buscam-se aços de maior qualidade magnética, com uma menor taxa de carbono, para se minimizar estas perdas.

Na figura a seguir serão mostrados resultados quando se troca o tipo de aço. Para tal foi inserido no programa a curva magnética do mesmo. A troca foi feita tanto no estator quanto no rotor.

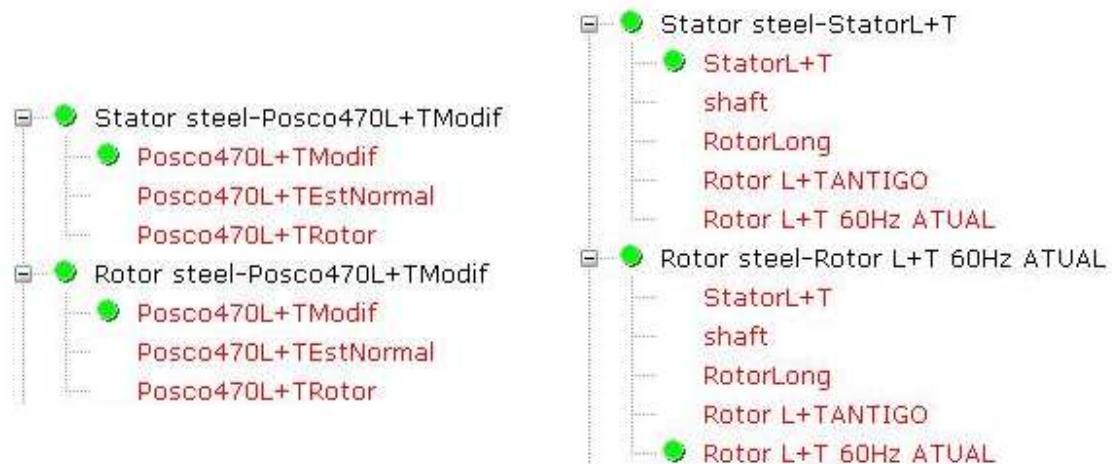


Figura 36: Troca de aço no Software (esquerda: Totalmente processado. Direita: Semi-processado)

OP[Ctrl+A] - OutPut							
Vt	230.0000	PElec	882.8285	Bstpk	1.7991	TBrk	78.8506
Freq	60.0000	IL1	4.5396	Bsypk	1.6473	IBrk	18.6562
Tshaft	23.4998	R1	2.6315	Brtpk	1.9394	TLR	9.2915
P.F.	0.8455	R1aux	7.2085	Brypk	1.6388	ILR	28.3589
Effcy	80.9296	rpm	3426.1801	WtCuMain	0.5549	ILRMain	29.0825
				WtCuAux	0.1156	ILRAux	1.3359

Figura 37: Resultados utilizando novo aço

Percebe-se então uma brusca queda de eficiência, na ordem de 4%, ao se alterar o aço de totalmente processado (processos avançados de tratamento) para um semi-processado.

7.7. Entreferro

O entreferro, ou *air-gap*, trata-se da distância do diâmetro interno do estator se comparado ao diâmetro interno do rotor. Devido às dificuldades de fabricação de motores com um entreferro pequeno, pela dificuldade de centralização do eixo sem que o conjunto estator/rotor entre em contato quando estiver em funcionamento, o entreferro acaba tendo seu valor definido pelo menor possivelmente fabricado. Temos o maior aproveitamento quando este se apresenta em pequenos valores.

As Figuras 38 e 39 mostram o entreferro original do projeto (0,45mm) e um modificado (0,70mm). Posteriormente a figura 40 mostra os resultados obtidos com o entreferro maior. Nas duas primeiras, pode-se verificar o aumento do entreferro como sendo a distância da linha amarela para a linha verde.

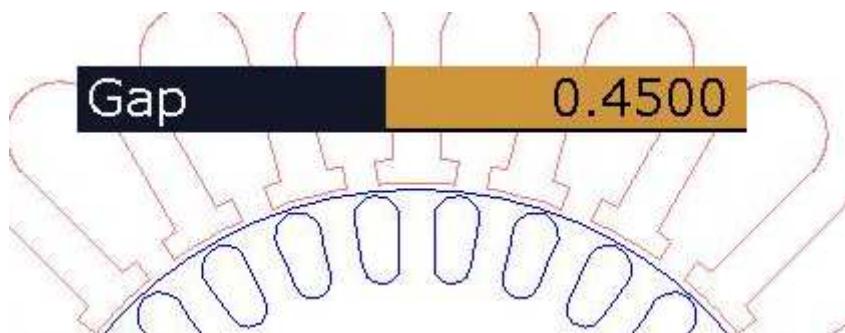


Figura 38: Entreferro original de 0,45 mm.

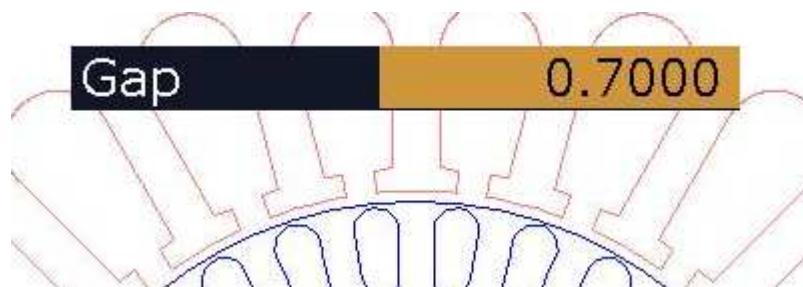


Figura 39: Entreferro modificado para 0,70 mm.

OP[Ctrl+A] - OutPut							
Vt	230.0000	PElec	939.7163	Bstpk	1.7956	TBrk	80.0960
Freq	60.0000	IL1	5.6315	BsyPk	1.6614	IBrk	19.9783
Tshaft	23.5001	R1	2.6370	Brtpk	1.9226	TLR	9.8205
P.F.	0.7255	R1aux	7.2280	Brypk	0.9954	ILR	29.5565
Effcy	75.7729	rpm	3414.5319	WtCuMain	0.5560	ILRMMain	30.2270

Figura 40: Resultados para entreferro modificado.

Tem-se então a visível queda de eficiência quando utilizado um entreferro maior que o original, quase 9% para uma diferença de 0,25mm.

7.8. Ranhuras do Estator e do Rotor

A definição das ranhuras das lâminas do estator e rotor se mostram as etapas mais complexas do projeto, pois envolvem uma análise bastante profunda do comportamento do fluxo magnético existente. O formato das ranhuras, assim como seu tamanho e número influenciam nos resultados. Para ilustrar esta influência, abaixo será mostrada uma simulação onde se modifica a ranhura do dente do estator. Mais especificamente, aumenta-se a altura dos dentes de 14,9mm para 15,3mm.

SDS_A 15.3000

OP[Ctrl+A] - OutPut							
Vt	230.0000	PElec	912.1378	Bstpk	1.7640	TBrk	77.5638
Freq	60.0000	IL1	5.1275	BsyPk	1.6846	IBrk	18.7814
Tshaft	23.4996	R1	2.6369	Brtpk	1.9073	TLR	9.2342
P.F.	0.7734	R1aux	7.2179	Brypk	0.9975	ILR	28.2760
Effcy	78.0951	rpm	3415.9658	WtCuMain	0.5560	ILRMMain	29.0038

Figura 41: Alteração na ranhura e resultados.

Vale ressaltar que em um caso como este tal aumento da ranhura acrescentaria a possibilidade de se aumentar o número de fios por passo, e esta mudança na bobinagem também influencia nos resultados. Busca-se então, novamente, o ponto ótimo onde a maior eficiência é alcançada, sem prejudicar o torque de partida.

7.9. Saturação

Em casos como este, onde o aumento da ranhura provocou a diminuição da quantidade de aço no estator, há de ser levada em conta também a saturação a qual o motor fica submetido. Um motor muito saturado, além de estar em seu limite de capacidade, pode esquentar muito, o que faz aumentar as perdas e a corrente que circula no mesmo. A Figura 42 representa uma

simulação feita utilizando elementos finitos mostra como a saturação aumentou com essa alteração na ranhura do estator.

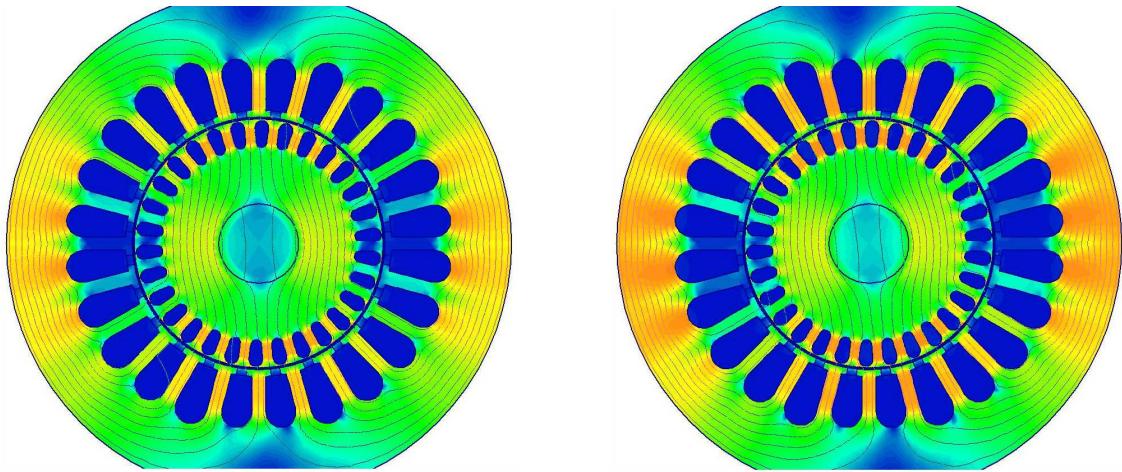


Figura 42: (a) Saturação motor com ranhura normal e (b) Saturação do motor com ranhura alterada

As cores quentes, amarelo e laranja, indicam as regiões mais saturadas. Quanto maior a tendência para o vermelho, maior o nível de saturação. É claramente visto então que a alteração da ranhura aumentou não apenas a saturação no estator, mas também nos dentes do rotor.

7.10. Componentes Elétricos

Foi visto no capítulo 6 que a utilização dos componentes elétricos nos projetos de motores de indução monofásicos tem suma importância em seu funcionamento, sejam os relês, sejam os capacitores.

A presença do capacitor permanente, como mostrado, aumenta consideravelmente a eficiência do motor, se mostrando uma excelente alternativa na busca de motores mais de alta eficiência. Porém, tendo por base o intuito deste trabalho em mostrar as melhores alternativas visando outros fatores como o custo, tem-se que a utilização deste componente faz com que o preço deste motor suba consideravelmente, não sendo então uma alternativa válida em motores para pequenas aplicações, onde o fator custo é fundamental.

De forma semelhante temos o uso dos relês amperométricos ou PTC, que, apesar de terem aplicações bastante parecidas, apresentam algumas diferenças que fazem com que a escolha entre ambos seja baseada em outros fatores que não somente o custo, mas também a temperatura de funcionamento, por exemplo, uma vez que o funcionamento do PTC em temperaturas elevadas é mais crítico.

7.11. Custos de Projeto

Após a análise de todos os resultados referentes às alterações nas diversas partes do motor de indução monofásico se chega à conclusão que melhorar a performance do motor é algo

que implicará em maiores custos do mesmo. As maneiras mais diretas em se aumentar a performance do motor seriam:

- Aumentar a altura de pacote;
- Adicionar mais voltas das espiras às ranhuras do estator;
- Utilizar capacitor permanente.

Porém, vê-se que estas alternativas não somente gerariam um custo elevado ao motor, como também apresentam limitações físicas. A primeira delas faz com que o motor necessite de um compressor com um amplo espaço para instalação, culminando não somente em elevação dos custos materiais na parte mecânica como também a impossibilidade de aplicação deste compressor em ambientes mais compactos.

Adicionar mais voltas das espiras nas ranhuras é um processo extremamente complicado em questões de fabricação. Atualmente, motores pequenos conseguem ter um preenchimento de suas ranhuras na ordem de 78%, enquanto motores maiores apenas de 65%. Assim, a adição de cobre necessitaria altos investimentos nos processos de fabricação.

Por fim, como citado no item anterior, a utilização de capacitores agrava um custo significativo aos compressores. Além disso, para se utilizar capacitores permanentes, onde a bobina auxiliar permanecerá energizada durante o funcionamento do motor, necessita-se que esta seja projetada para não atingir temperaturas elevadas, ou seja, terá de ser feita com fios de maior espessura, tornando-se novamente difícil que estes sejam inseridos no estator.

Assim, percebe-se a necessidade de se procurar maneiras baratas e eficazes para se melhorar a performance do motor. Esta se baseia em otimizar todas as variáveis a fim de se obter o motor ideal para a determinada aplicação. Essa busca pelo ponto ótimo de projeto deve estar sempre relacionada em manter um mínimo torque de partida visando a menor potência consumida do motor e uma menor corrente, para que este não atinja temperaturas muito elevadas em seu funcionamento.

A respeito da temperatura, serão mostrados no capítulo a seguir os testes existentes para se garantir que o conjunto moto-compressor esteja dentro das especificações exigidas pelos órgãos homologadores. Estas especificações se relacionam com não apenas com o funcionamento do motor, mas também na atuação dos elementos protetores caso ocorra alguma falha.

8. TESTES DE VALIDAÇÃO

Após a instalação do motor em um compressor, alguns testes devem ser realizados para garantir a proteção do sistema caso ocorra alguma falha. Estas falhas podem ser relacionadas à qualidade de energia da rede ou de aspectos físicos do próprio compressor, como por exemplo, o travamento do motor impedindo que o mesmo consiga partir. Tais testes visam garantir a segurança das pessoas bem como a vida útil do equipamento.

Neste capítulo serão listados e explicados os principais testes existentes necessários para aprovação de um compressor, a partir de órgãos homologadores de todo o mundo. [11]

8.1. Teste de Capacidade

Tem como finalidade determinar a capacidade do compressor e adequação do motor. Neste teste o compressor é instalado dentro de um calorímetro e será colocado em funcionamento por tempo determinado, a fim de se verificar a capacidade frigorífica que o mesmo apresenta, assim como analisar os parâmetros do motor, como a corrente e velocidade de rotação. Serão aplicadas diferentes temperaturas de evaporação e condensação dos gases, em diferentes níveis de tensão, para atestar que o compressor é capaz de funcionar em diferentes condições de aplicação.

8.2. Testes de Protetor

Compreende alguns testes que visam determinar as temperaturas máximas que o protetor térmico permite no funcionamento do motor. Geralmente esta temperatura não pode ultrapassar 150°C, porém pode variar de acordo com cada região do mundo. O teste de protetor visa analisar sua abertura (atuação) em condições críticas de funcionamento do compressor, que seriam em tensões máximas e mínimas. A aprovação do protetor neste teste só será feita se em todas as condições o compressor não ultrapassar a temperatura determinada.

8.3. Teste de Partida

Este teste visa determinar a capacidade de partida do moto-compressor. Tais testes são efetuados de diferentes maneiras, inicialmente com o compressor “frio” (simulando seu primeiro uso) posteriormente “quente” (em condições normais de utilização). Em ambos os casos, a partida deve ser realizada em condições não normais de aplicação. Por exemplo, um compressor projetado para 127V deve conseguir partir a no mínimo uma tensão de 100V, uma vez que muitas instalações elétricas atuais não garantem a tensão da rede desejada. De forma similar testa-se a partida em condições de tensão elevada, como no caso do exemplo em 140V.

Neste teste também é avaliado o comportamento do relé, se este está atuando de forma correta ao incluir a bobina auxiliar no circuito no momento da partida.

Os testes de partida são realizados não apenas em bancadas de teste, mas também instalados em seus ambientes de funcionamento, seja refrigeradores ou unidades condensadoras.

8.4. Teste de Rotor Travado

Tem por objetivo analisar se o compressor está protegido de superaquecimento devido á falhas nas condições de partidas. Tal teste se baseia em travar o eixo do compressor (elemento acoplado ao rotor), evitando que o mesmo gire. Assim, sempre que o motor tentar partir não obterá sucesso, esquentando cada vez mais. Este teste é também realizado em diferentes tensões, e tem duração de 3 horas. Alguns países necessitam o teste feito durante 15 dias, uma situação ainda mais crítica.

8.5. Teste de Falha

Realizado para assegurar que a bobina de partida não superaqueça durante condições de má instalação e soldagem do relê. Este teste se baseia em inverter os cabos da marcha e da auxiliar do compressor, medindo-se então as temperaturas alcançadas com a bobina auxiliar, mais susceptível às altas tensões, ligada de maneira direta. Outra forma que este teste é realizado é encurtando os contatos do relé alterando suas conexões, de modo a fazer com que ocorra uma falha no capacitor de partida. Assim, é medida novamente a temperatura da bobina auxiliar, garantindo que a mesma não ultrapasse valores determinados.

8.6. Teste de Gabinete

O teste de gabinete se trata de um teste prático, onde se instala o compressor no gabinete do cliente, avaliando seu desempenho no mesmo. Assim, pode-se determinar se o compressor está atingindo os resultados esperados. Neste teste são verificados novamente a capacidade de partida do compressor e a atuação dos protetores térmicos, assegurando o perfeito funcionamento do equipamento quando este for instalado em seu uso final.

9. CONCLUSÃO

Os compressores Herméticos tem importância fundamental na vida humana atual, seja para sua aplicação em refrigeradores, seja para condicionadores de ar. Assim, a aplicação do motor de indução monofásico para esta finalidade exige uma necessidade de investimentos em tecnologia constantes para se garantir máquinas cada vez mais eficientes e menos agressivas ao meio ambiente.

Neste trabalho foi visto um panorama geral a respeito dos compressores herméticos, seguido dos tipos de máquinas elétricas. A partir disso, entrando no foco do trabalho, seguiu-se para o funcionamento e tipos de motores de indução, o principal elemento do compressor hermético, não deixando de lado os componentes elétricos, que auxiliam no funcionamento e proteção do sistema como um todo.

O capítulo 7 trouxe a realidade que são os projetos de motores de indução monofásicos aplicados a compressores para refrigeração. As mais diversas variáveis existentes foram citadas e explicadas, seguindo a teoria informada nos capítulos iniciais. Pode-se ver com clareza que tais projetos não são simples, que exigem tempo e um constante investimento em pesquisa e desenvolvimento.

Mostrar a busca pelo “ponto ótimo”, equilibrando eficiência do compressor com tempo e custo do projeto, foi o principal motivo do trabalho, a fim de se mostrar as reais dificuldades encontradas pelo engenheiro projetista. A utilização do software *SPEED* foi fundamental para o maior entendimento de quais consequências as alterações de projeto geram, além de exemplificar uma ferramenta utilizada para esta finalidade.

Por fim, o fechamento do trabalho com a breve explicação sobre os testes de validação existentes se tornou importante para demonstrar que o trabalho do engenheiro vai além do funcionamento do produto final, mas também de toda a segurança que este terá em sua instalação. Assim, o trabalho, mesmo sem se afundar nas teorias, conseguiu abordar os mais diversos aspectos do dia a dia com projetos de motores de indução monofásicos aplicados a compressores herméticos para refrigeração.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Sirbone,F.R.C. (2007), *Modelagem Semi-empírica de compressores herméticos alternativos*. Dissertação de mestrado, EESC. São Carlos,USP.

Manual de Componentes Elétricos Tecumseh. Pág. 2-8. Disponível em <http://www.tecumseh.com.br/imgs/publicacoes/bit06.pdf>

Kosow, I.L. (1977), *Máquinas elétricas e transformadores*. Porto Alegre: Editora Globo. Cap. 10: Motores monofásicos.

Pelizari, A. (2009), *Um estudo da influência das configurações dos enrolamentos no desempenho de motores de indução monofásicos com capacitor de partida*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica,USP.

IEEE Std 114TM – 2001 – *IEEE Standard Test Procedure for Single Phase Induction Motors*.

Pacheco, A.L.S (2007), *Desenvolvimento de sistema para medir a resistência de enrolamento em motores de compressores energizados*. Dissertação submetida à UFSC para obtenção do grau de Mestre em Metrologia.

ALLEN-BRADLEY, *Motor basics – For controls matched motors*. Disponível em <http://www.ab.com/manuais/gi>.

FEI, R.W. ; LLOYD, J.D. – *Design and Test Analysis Of Single Phase Induction Motors With 4-8 Pole Common Winding*, IEEE Transactions On Industry Applications.

TORO, V.D. (1994), – *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, ED. Prentice Hall.

Arantes, D. (2008), *Simulação e Projeto de motores de indução bifásicos assimétricos*, Trabalho de Conclusão de Curso, EESC. São Carlos, USP.

Especificação de Teste de Compressores Tecumseh do Brasil, Pág. 8-26, 1992.