

HUGO KNIPPELBERG BIFANO FERNANDES

**Estudo e ensaio de um Motor de Indução Monofásico para a determinação do valor
ótimo do Capacitor de Regime**

Guaratinguetá - SP
2017

Hugo Knippelberg Bifano Fernandes

Estudo e ensaio de m Motor de Indução Monofásico para a determinação do valor ótimo do Capacitor de Regime

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Inácio Bianchi

Guaratinguetá - SP
2017

F363e

Fernandes, Hugo Knippelberg Bifano Fernandes

Estudo e ensaio de um motor de indução monofásico para a determinação do valor ótimo do capacitor de regime / Hugo Knippelberg Bifano Fernandes – Guaratinguetá, 2017.

46 f : il.

Bibliografia: f. 46

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Inácio Bianchi

1. Motores de indução. 2. Capacitores. 3. Energia elétrica. I.Título

CDU 621.313.13

HUGO KNIPPELBERG BIFANO FERNANDES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. INACIO BIANCHI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
UNESP-FEG


Prof. Dr.. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG

Novembro de 2017

Dedico este trabalho aos meus
pais pelo incentivo, paciência
e carinho incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo presente da vida, pela família e amigos que ele me deu.

ao meu orientador Prof. Dr. Inácio Bianchi meus sinceros agradecimentos, pelos incentivos, pela orientação e paciência.

ao meu pai Luis Claudio e minha mãe Anete, pelo apoio de todas as formas e em todos momentos, pelas suas orações e seus incentivos.

ao meu tio Sílvio e minha Tia Arlete, pela pronta ajuda em diversos momentos de necessidade.

aos meus irmãos da Igreja e aos da República, pelos anos de amizade, diversão e companheirismo.

aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, pela dedicação e anos de serviços prestados.

“Conhece-te. Aceita-te. Supera-te”
Santo Agostinho

RESUMO

Este trabalho foca no estudo dos Motores de Indução Monofásicos, utilizados em ventiladores, classificados como Motores com Capacitor Permanente, que utilizam um capacitor permanentemente conectado em série com o enrolamento auxiliar, e estes por sua vez em paralelo ao enrolamento principal. Esse tipo de motor funciona como um Motor Bifásico Assimétrico. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do valor da capacitância do capacitor de regime na eficiência energética do motor, para isto foi usada como função objetivo a ser maximizada a razão entre a velocidade (rpm) e a potência consumida pelo motor (W) durante seu funcionamento em regime. A escolha dessa função objetivo é pertinente pois a maioria dos ventiladores não necessitam de torque e potência muito elevado na partida. Neste trabalho foram realizados diversos ensaios com um ventilador de teto, sendo a única alteração feita para cada ensaio o valor do capacitor (ou associação de capacitores) utilizado no motor. Realizou-se também uma simulação de um motor de indução monofásico através do SIMULINK em que a capacitância do capacitor de regime crescia linearmente com o tempo de simulação, o que possibilitou a avaliação da influência desse capacitor em tempo real. Foi obtida uma melhoria de 12% na função objetivo com o capacitor ótimo em relação ao resultado com o capacitor nominal do ventilador. Já os resultados obtidos pela simulação apontam um aumento de 11% na função objetivo ao comparar o resultado obtido com o capacitor ótimo em relação com o resultado obtido com o capacitor nominal. Chegou-se à conclusão que o método utilizado no trabalho é válido em casos no qual o objetivo principal é um ganho na eficiência energética, uma vez que a alteração sugerida tem como contrapartida uma pequena redução da velocidade atingida pelo ventilador.

PALAVRAS-CHAVE: Motor de Indução Monofásico. Eficiência Energética. Capacitor de Regime.

ABSTRACT

This work focus on the Single Phase Induction Motors used in fans, classified as Capacitor-Run Motors, using permanently series capacitors connected to the auxiliary winding and these parallel connected to the main winding. This motor works similarly to a Two-Phase Asymmetrical motor. This work aims to evaluate the influence of the used capacitance value on the energy efficiency of the capacitor-run motor. In order to reach this purpose it was used as an objective function to be maximized, the ratio between the speed (rpm) and the power consumed by the motor (W) during its permanent regime running. The choice of this objective function is pertinent since the majority of fans do not require a high starting torque and power. In this work, several tests were performed with a ceiling fan, the only change made for each test was the value of the used capacitor (or association of capacitors) in the motor. A simulation of a single-phase induction motor was carried out through SIMULINK, in this simulation the capacitance of the capacitor increased linearly with the simulation time, thus enabling the evaluation of the influence of this capacitor in real time. In the tests, a 12% improvement in the objective function was obtained with the optimum capacitor in relation to the result where the fan's nominal capacitor was used. The simulation showed an increase in 11% in the objective function when comparing the result obtained with the optimum capacitor to that one obtained with the nominal capacitor. It was concluded that the method used in the work is valid in cases in which the main objective is a gain in energy efficiency, since the suggested change has as a counterpart a small reduction in the speed reached by the fan.

KEYWORDS: Single-Phase Induction Motor. Capacitor-run. Energy Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Participação da Energia Hídrica na geração total do Brasil.....	13
Figura 2 - Gráfico comparativo: Motor Monofásico x Motor Trifásico.....	14
Figura 3 - Gráfico do torque em razão da velocidade do rotor de um motor de indução monofásico.	17
Figura 4 - Circuito de um motor com partida por fase auxiliar.....	18
Figura 5 - Circuito de um motor com partida por fase auxiliar com capacitor de partida.	18
Figura 6 - Circuito de um motor com partida por fase auxiliar com capacitor de regime.	19
Figura 7 - Circuito de um motor com partida por fase auxiliar com capacitor de partida e de regime.	19
Figura 8 - Campos girantes em um motor de indução monofásico com fase auxiliar com capacitor.....	20
Figura 9 - Diagrama do circuito equivalente para um motor monofásico com capacitor de regime. (a) Fase principal. (b) Fase auxiliar.	22
Figura 10 - Curva da potência consumida e do componente proporcional ao torque de partida em função do capacitor de regime.	27
Figura 11 - Resistência entre os terminais do ventilador, e esquema do circuito utilizado.	29
Figura 12 - Gráfico da rotação do ventilador em função da capacitância do capacitor de regime.	32
Figura 13 - Gráfico da potência consumida pelo ventilador em função da capacitância do capacitor de regime.....	32
Figura 14 - Gráfico da função objetivo do ventilador em função da capacitância do capacitor de regime.	33
Figura 15 - Gráfico da velocidade do motor em função da potência consumida.	34
Figura 16 - Diagrama esquemático do modelo desenvolvido por Krause.....	36
Figura 17 - Configurações do motor simulado.....	38
Figura 18 - Alteração feita no modelo do motor.	39
Figura 19 - Desenho esquemático da simulação.	40
Figura 20 - Gráfico velocidade do motor simulado x capacitância do capacitor de regime.	41
Figura 21 - Gráfico potência consumida no motor simulado x capacitância do capacitor de regime.....	42
Figura 22 - Gráfico função objetivo do motor simulado x capacitância do capacitor de regime.	42

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Enrolamento auxiliar
a	Relação de espiras
C	Capacitor
C_r	Capacitor de regime
C_s	Capacitor de partida
E_{ba}	Tensão induzida por Φ_{ba}
E_{bm}	Tensão induzida por Φ_{bm}
E_{fa}	Tensão induzida por Φ_{fa}
E_{fm}	Tensão induzida por Φ_{fm}
F	Viscosidade do conjunto rotor-carga
fmm	Força magnetomotriz
i'_{dr}	Corrente no rotor do eixo d
i'_{qr}	Corrente no rotor do eixo q
I_a	Corrente no enrolamento auxiliar
i_{as}	Corrente no estator da fase principal
i_{bs}	Corrente no estator da fase auxiliar
i_{ds}	Corrente no estator do eixo d
I_m	Corrente no enrolamento principal
i_{qs}	Corrente no estator do eixo q
I_t	Corrente Total
J	Momento de inércia do conjunto rotor-carga
L'_{lr}	Indutância de dispersão do rotor da fase principal
L'_{lR}	Indutância de dispersão do rotor da fase auxiliar
L'_{rr}	Indutância total do rotor da fase principal
L'_{RR}	Indutância total do rotor da fase auxiliar
L_{lr}	Indutância de dispersão do rotor referida ao enrolamento principal do estator

L_{lR}	Indutância de dispersão do rotor referida ao enrolamento auxiliar do estator
L_{ls}	Indutância de dispersão do enrolamento principal do estator
L_{lS}	Indutância de dispersão do enrolamento auxiliar do estator
L_{ms}	Indutância de magnetização do enrolamento principal do estator
L_{mS}	Indutância de magnetização do enrolamento auxiliar do estator
L_{rr}'	Indutância própria do rotor referida ao enrolamento principal do estator
L_{RR}'	Indutância própria do rotor referida ao enrolamento auxiliar do estator
L_{ss}	Indutância própria do enrolamento principal do estator
L_{SS}	Indutância própria do enrolamento auxiliar do estator
M	Enrolamento principal
N_s	Número de espiras do enrolamento principal
N_S	Número de espiras do enrolamento auxiliar
$\varnothing_a$	Fluxo do enrolamento auxiliar
$\varnothing_{ba}$	Fluxo de sentido negativo do enrolamento auxiliar
$\varnothing_{bm}$	Fluxo de sentido negativo do enrolamento principal
$\varnothing_{fa}$	Fluxo de sentido positivo do enrolamento auxiliar
$\varnothing_{fm}$	Fluxo de sentido positivo do enrolamento principal
$\varnothing_m$	Fluxo no enrolamento principal
p	Operador diferencial
R_r'	Resistência do rotor da fase principal
R_R'	Resistência do rotor da fase auxiliar
r_r	Resistência do rotor referida ao enrolamento principal do estator
r_R	Resistência do rotor referida ao enrolamento auxiliar do estator
r_s	Resistência do enrolamento principal do estator
r_S	Resistência do enrolamento auxiliar do estator
R_s	Resistência de dispersão do estator da fase principal
R_S	Resistência de dispersão do estator da fase auxiliar
T_e	Torque eletromagnético

T_L	Conjugado de carga
T_m	Torque mecânico do eixo
V'_{dr}	Tensão no rotor do eixo d
V'_{qr}	Tensão no rotor do eixo q
V_{as}	Tensão no estator da fase principal
V_{bs}	Tensão no estator da fase auxiliar
V_{ds}	Tensão no estator do eixo d
V_{qs}	Tensão no estator do eixo q
v_{qs}^s	Tensão de alimentação do motor
ϑ_m	Posição angular do rotor
ϑ_r	Posição angular elétrica
ϕ'_{dr}	Fluxo do rotor do eixo d
ϕ'_{qr}	Fluxo do rotor do eixo q
ϕ_{ds}	Fluxo do estator do eixo d
ϕ_{qs}	Fluxo do estator do eixo q
ω_m	Velocidade angular do rotor
ω_r	Velocidade angular elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	SITUAÇÃO ENERGÉTICA DO BRASIL	13
1.2	USO DE MOTORES MONOFÁSICOS NO BRASIL	14
1.3	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	15
2	DESENVOLVIMENTO	16
2.1	MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO	16
2.1.1	Método de Partida dos Motores Monofásicos.....	17
2.1.1.1	Fase auxiliar.....	17
2.1.1.2	Fase Auxiliar com Capacitor de Partida	18
2.1.1.3	Fase Auxiliar Com Capacitor de Regime	18
2.1.1.4	Fase Auxiliar com Capacitor de Partida e Regime.....	19
2.1.2	Operação do Motor de Indução Monofásico.....	20
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.3	PROPOSTA DO TRABALHO	26
3	ENSAIOS.....	28
3.1	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	28
3.2	RESULTADOS DO EXPERIMENTO	31
4	SIMULAÇÃO.....	36
4.1	DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO	36
4.2	RESULTADOS DA SIMUAÇÃO	41
5	DISCUSSAO DO RESULTADOS	43
6	CONCLUSÃO.....	45
	REFERÊNCIAS	46

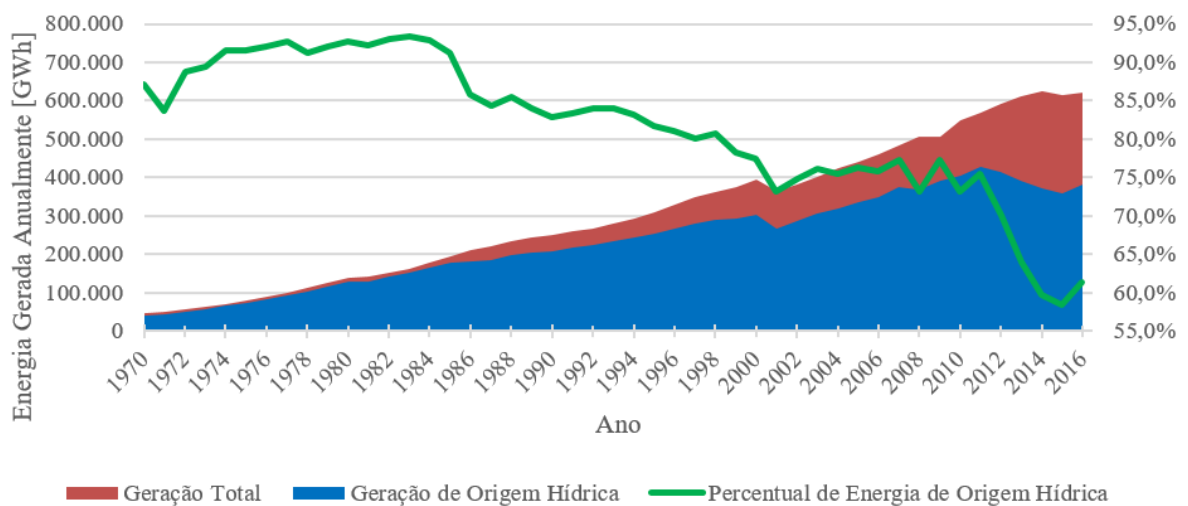
1 INTRODUÇÃO

1.1 SITUAÇÃO ENERGÉTICA DO BRASIL

Grande parte da energia elétrica gerada no Brasil tem origem de fontes hídricas, isso se deve ao fato do Brasil possuir uma das maiores bacias hidrográficas do mundo, aumentando assim o potencial de geração de energia com um custo relativamente baixo. Outra vantagem do uso de energia proveniente de hidrelétricas é que essa fonte de energia é do tipo renovável, tendo assim, um baixo risco de esgotamento.

Entretanto a energia hídrica possui também as suas desvantagens. As usinas hidrelétricas precisam represar uma grande quantidade de água para que possam ter um certo nível de controle da geração de energia, causando assim um considerável impacto ambiental na área usada para a represa. A segunda principal desvantagem dessa fonte de energia é que ela depende de condições climáticas favoráveis para poder gerar todo o seu potencial energético.

Figura 1 - Participação da Energia Hídrica na geração total do Brasil.



Fonte: (BRASIL, 2017).

Pode-se observar pela Figura 1 que de 2012 a 2016 o Brasil passou por um período de estiagem, que causou a diminuição da geração de energia proveniente das fontes hidrelétricas (BRASIL, 2017). Essa queda de geração ocorreu enquanto havia um considerável aumento na demanda de energia, que foi atendida em grande parte pelas usinas termelétricas. As

termelétricas permitiram, porém com um maior custo marginal, uma rápida expansão (BRASIL, 2011), o que causou um aumento do custo médio da energia elétrica brasileira.

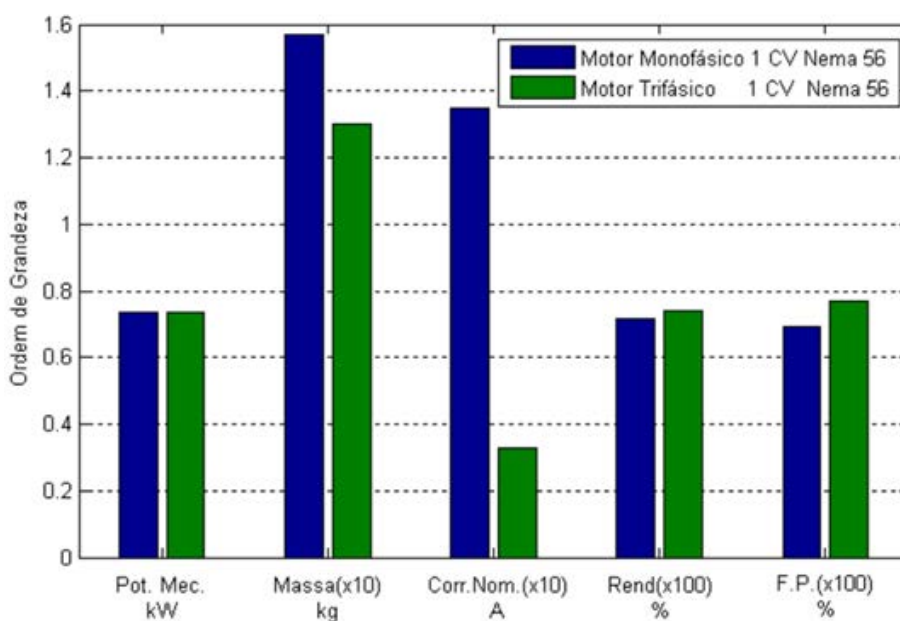
Visto que há uma certa dificuldade em se aumentar o potencial de geração elétrico, e que grande parte desse potencial é dependente de condições climáticas favoráveis, é de grande importância a presença de estudos de eficiência energética para que parte da demanda sempre crescente de energia seja atendida.

O estudo proposto nesse trabalho se trata de um estudo de eficiência energética. Ele tem por finalidade melhorar o aproveitamento de energia de motores monofásicos, especificamente aqueles que usam um capacitor permanente acoplado em série com a fase auxiliar. Esse tipo de motor é utilizado em larga escala em ventiladores.

1.2 USO DE MOTORES MONOFÁSICOS NO BRASIL

O uso de motores monofásicos se dá principalmente em aplicações de baixa potência. Isso ocorre porque o motor monofásico possui um rendimento inferior quando comparado com um motor trifásico, como pode ser observado pelo gráfico comparativo da Figura 2. Em contrapartida, ele possui um menor custo de fabricação, e também não necessita de distribuição trifásica de energia para o seu funcionamento.

Figura 2 - Gráfico comparativo: Motor Monofásico x Motor Trifásico



Fonte: (PELIZARI, 2009)

1.3 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Dadas as seguintes estimativas:

Potência Média de um Ventilador:	100 W
Nº de ventiladores por casa:	1,08 (SILVA; FERES; LÍRIO, 2012)
Uso médio de um ventilador:	1 hora/dia
Número de residências no Brasil	68 milhões (BRASIL, 2016)
Energia consumida pelo setor residencial	132000 GWh (BRASIL, 2017)

Pode-se chegar à conclusão que uma residência consome quase 40 kWh por ano somente com o uso de ventiladores. Se multiplicarmos essa estimativa de consumo pelo número de residências no Brasil, conclui-se que o uso de ventiladores consome cerca de 2680 GWh por ano apenas no setor residencial, representando aproximadamente 2% do uso de energia desse setor. Uma queda de 15% na potência consumida de todos os ventiladores causaria uma economia de 400 GWh por ano. Vale lembrar que essa é uma estimativa que considera apenas o setor residencial, a economia pode ser ainda maior se considerarmos os setores comercial e industrial.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO

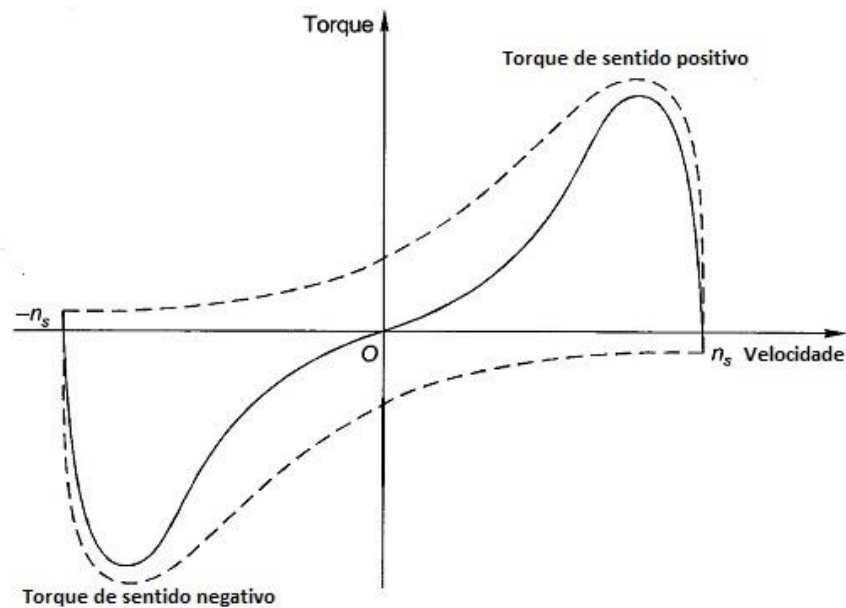
Os motores de indução monofásicos são motores pequenos, na grande maioria com potência menor que 1 cavalo. Esses motores são usados em diversos tipos de equipamentos residenciais, comerciais ou industriais tais como: máquinas de lavar, refrigeradores, aparelhos de ar-condicionado, ventiladores, liquidificadores, portões elétricos e etc.

A maior parte dos motores de indução monofásicos possuem uma estrutura semelhante à de motores polifásicos de gaiola, exceto, pelo arranjo dos enrolamentos do estator, que ao invés de três ou mais bobinas, possuem apenas um enrolamento principal no estator distribuído em ranhuras de modo a produzir uma distribuição espacial de força magnetomotriz (fmm) aproximadamente senoidal. Esse tipo de construção do motor não desenvolve um torque de partida para o motor, necessitando partir por meios auxiliares.

Alimentando somente a bobina principal do estator, a fmm do estator é estacionária no espaço, mas pulsa em módulo, e a intensidade de campo do estator alterna em polaridade, e varia senoidalmente com o tempo. As correntes que são induzidas no rotor por ação do transformador, são em tal sentido de modo a produzir uma fmm opondo-se a fmm do estator. O eixo da fmm do rotor coincide com o campo do estator, o ângulo de carga portanto é nulo, e nenhum conjugado de partida é produzido. O motor pode ser tratado como sendo um transformador estático com o secundário curto-circuitado, gerando dois campos idênticos que giram em sentidos opostos.

A Figura 3 ilustra o gráfico do torque em razão da velocidade do rotor do motor de indução monofásico. Nesse gráfico as linhas tracejadas representam os torques de sentido positivo e negativo, a linha contínua representa o torque resultante, e n_s é a velocidade síncrona. Nota-se que quando o rotor está parado, o torque de sentido positivo e o de sentido negativo se anulam. Mas uma vez que essa condição é superada o torque resultante deixa de ser zero para assumir o mesmo sentido do movimento do rotor, isso faz que o rotor acelere até atingir a velocidade de regime permanente.

Figura 3 - Gráfico do torque em razão da velocidade do rotor de um motor de indução monofásico.



Fonte: (FITZGERALD; KINGSLEY; KUZKO, 1978)

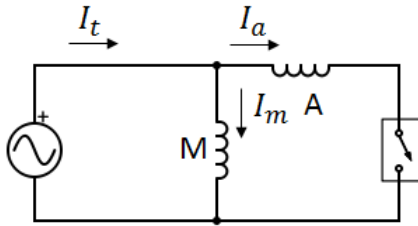
2.1.1 Método de Partida dos Motores Monofásicos

A maioria dos métodos de partida dos motores de indução monofásicos emprega a estratégia de se criar campos magnéticos através de enrolamentos auxiliares construídos no estator e conectados em paralelo com o enrolamento principal. Podem se destacar os seguintes métodos:

2.1.1.1 Fase auxiliar

O enrolamento auxiliar é deslocado espacialmente do principal de 90 graus e é projetado para ser menos indutivo e ter maior resistência elétrica do que o principal. Essas diferenças entre a fase principal e a auxiliar fazem com que as suas correntes tenham uma defasagem no tempo entre si, gerando assim o torque de partida do motor. Uma chave centrífuga desliga a fase auxiliar assim que a velocidade do eixo atinja aproximadamente 75% da velocidade síncrona. A Figura 4 apresenta um circuito simplificado de um motor de indução monofásico com partida por fase auxiliar. Nessa figura M representa o enrolamento principal, A representa o enrolamento auxiliar, I_t representa a corrente total, I_m representa a corrente no enrolamento principal e I_a representa a corrente no enrolamento auxiliar.

Figura 4 - Circuito de um motor com partida por fase auxiliar.

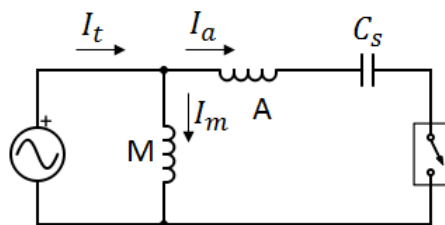


Fonte: (BIM, 2009)

2.1.1.2 Fase Auxiliar com Capacitor de Partida

A defasagem entre as correntes dos enrolamentos é obtida através da inserção de um capacitor em série com a fase auxiliar. O capacitor é calculado usando o parâmetro de otimização do torque de partida, tentando obter uma defasagem entre as correntes de aproximadamente 90° , já que uma chave centrífuga desliga a fase auxiliar quando o rotor atinge uma certa porcentagem da velocidade síncrona. A Figura 5 apresenta um circuito simplificado de um motor de indução monofásico com partida por fase auxiliar com capacitor, sendo C_s o capacitor de partida.

Figura 5 - Circuito de um motor com partida por fase auxiliar com capacitor de partida.



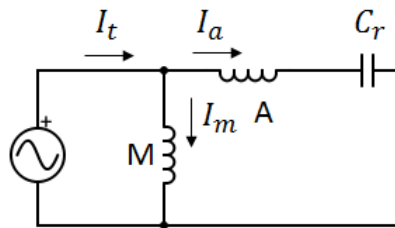
Fonte: (BIM, 2009)

2.1.1.3 Fase Auxiliar Com Capacitor de Regime

Esse método só difere do anterior pelo fato do enrolamento auxiliar com o capacitor em série ficar permanentemente conectado em paralelo com o enrolamento principal. Porém essa diferença também leva a algumas outras considerações que devem ser feitas na análise do motor, além de que a melhor escolha para o capacitor deve-se considerar tanto a partida quanto o regime permanente do motor. A Figura 6 ilustra um circuito simplificado de um

motor de indução monofásico com fase auxiliar com capacitor de regime, sendo C_r o capacitor de regime.

Figura 6 - Circuito de um motor com partida por fase auxiliar com capacitor de regime.

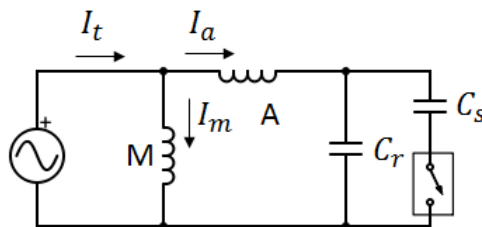


Fonte: (BIM, 2009)]

2.1.1.4 Fase Auxiliar com Capacitor de Partida e Regime

Nesse caso é usado na partida a associação do capacitor de regime com o capacitor de partida. Assim que se atinge 75% da velocidade síncrona, a chave centrífuga desliga o capacitor de partida, enquanto o outro capacitor continua a atuar. Esse método permite que sejam escolhidos valores ótimos de capacitor tanto para a partida quanto para o regime permanente. A Figura 7 apresenta um circuito simplificado de um motor de indução monofásico com fase auxiliar com capacitor de partida e de regime. Como pode-se observar, o capacitor de regime fica em paralelo com capacitor de partida que é desativado pela chave centrífuga.

Figura 7 - Circuito de um motor com partida por fase auxiliar com capacitor de partida e de regime.



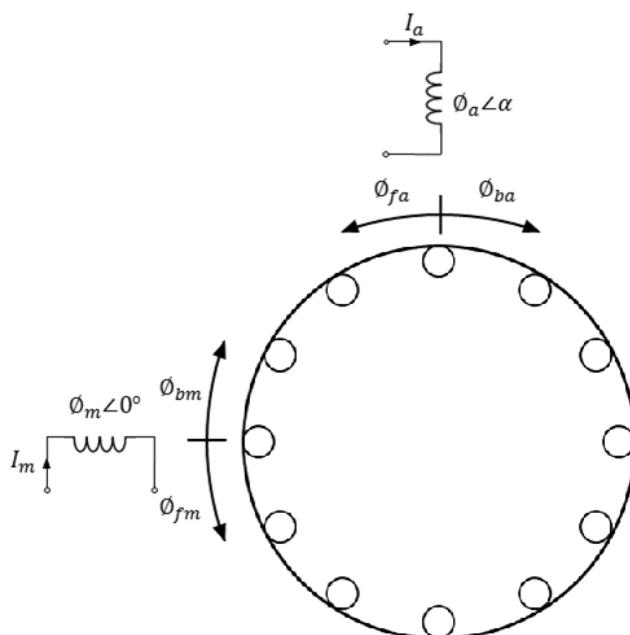
Fonte: (BIM, 2009)

2.1.2 Operação do Motor de Indução Monofásico

A teoria do duplo campo girante determina que a excitação do enrolamento monofásico produz uma fmm estacionária e pulsante que pode ser vista como a resultante da soma de duas ondas de fmm que giram na velocidade síncrona em sentidos opostos e que induzem correntes no rotor. Esses dois fluxos produzem dois conjugados opostos, que possuem a mesma amplitude caso o motor esteja parado, tendo como resultante um conjugado nulo. Portanto se faz necessário o uso de algum método para a produção do conjugado de partida. O método utilizado na maioria dos ventiladores se baseia em acrescentar um enrolamento auxiliar no mesmo circuito magnético do enrolamento principal, porém em paralelo e defasado em $\pi/2$ radianos em relação ao mesmo (SEN, 1989).

O enrolamento principal, e o enrolamento auxiliar são excitados pelas correntes I_m e I_a respectivamente, como mostrado na Figura 8. O fluxo do enrolamento principal pode ser visto como a soma de dois fluxos Φ_{fm} (fluxo no sentido positivo) e Φ_{bm} (fluxo no sentido negativo). Similarmente o fluxo no enrolamento auxiliar também é dividido em um fluxo no sentido positivo (Φ_{fa}) e um no sentido negativo (Φ_{ba}). Todos esses quatro fluxos induzem tensões nos dois enrolamentos.

Figura 8 - Campos girantes em um motor de indução monofásico com fase auxiliar com capacitor.



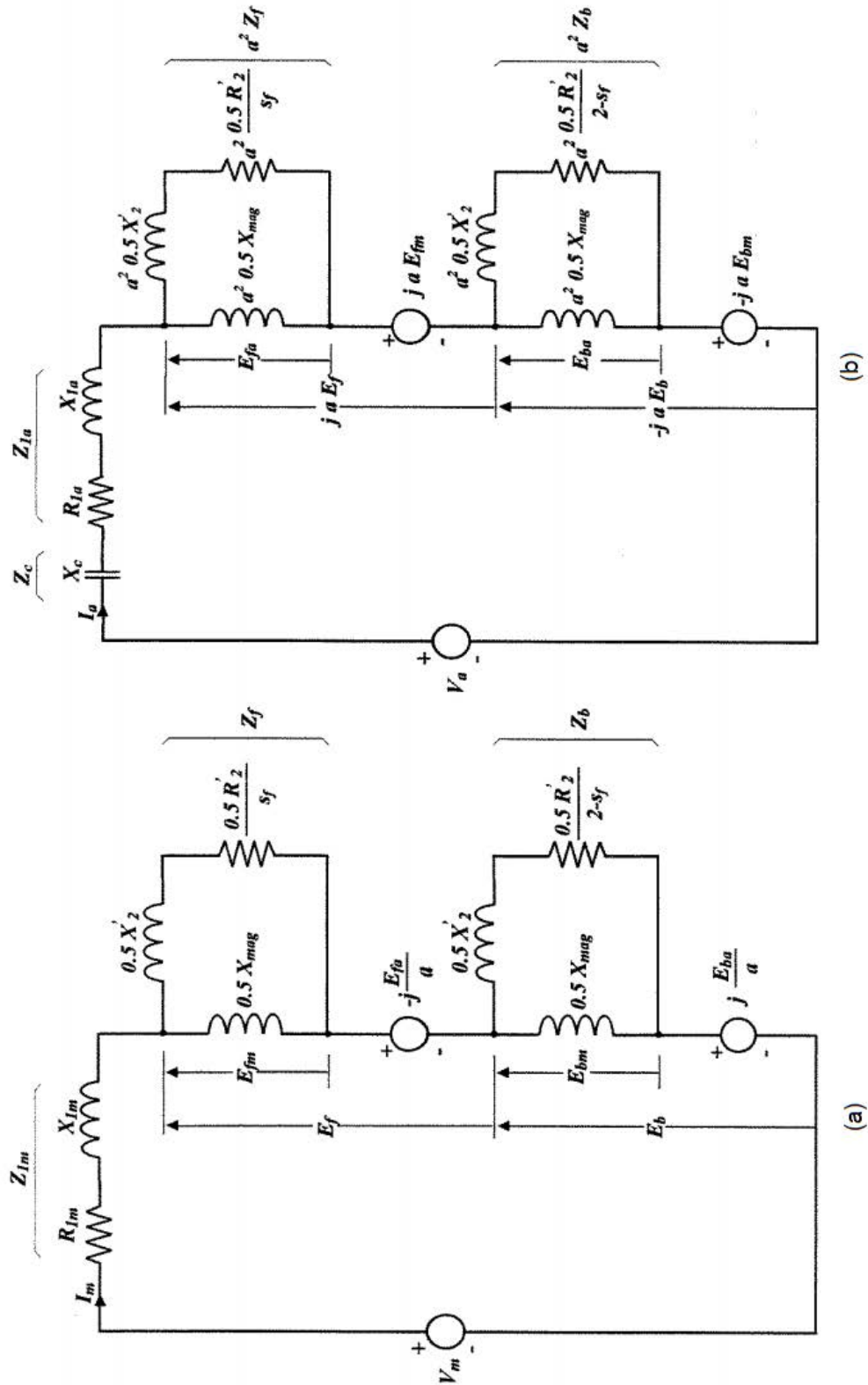
Fonte: (SEN, 1989).

O enrolamento principal pode ser representado pelo circuito equivalente mostrado na Figura 9, em que E_{fm} e E_{bm} são as tensões induzidas pelos próprios fluxos Φ_{fm} e Φ_{bm} respectivamente. As tensões induzidas $-jE_f/a$ e jE_b/a ($a = N_a/N_m$) no enrolamento principal pelos fluxos Φ_{fa} e Φ_{ba} são mostrados como tensões internas.

A fmm Φ_{fa} do enrolamento auxiliar induz uma tensão E_{fa} no enrolamento auxiliar. Esse fluxo Φ_{fa} da Figura 8 induzirá também uma tensão no enrolamento principal que terá seu pico atrasado em $\pi/2$ radianos. Sendo a a relação de espiras entre o enrolamento auxiliar e o enrolamento principal, a tensão induzida será de $-jE_{fa}/a$, sendo que, $-j$ representa o atraso da fase de $\pi/2$ radianos. Similarmente, o fluxo Φ_{ba} induzirá uma tensão E_{ba} no enrolamento auxiliar, e uma tensão jE_{ba}/a no enrolamento principal que está adiantada em $\pi/2$ radianos.

O enrolamento auxiliar é representado pelo circuito equivalente da Figura 9, em que as tensões internas jaE_{fm} e $-jaE_{bm}$ são as tensões induzidas no enrolamento auxiliar pelos fluxos Φ_{fm} e Φ_{bm} do enrolamento principal.

Figura 9 - Diagrama do circuito equivalente para um motor monofásico com capacitor de regime. (a) Fase principal. (b) Fase auxiliar.



A seguir tem-se as equações das tensões e das correntes para os dois enrolamentos (SEN, 1989):

$$V_m = I_m(Z_{1m} + Z_f + Z_b) - j\frac{E_{fa}}{a} + j\frac{E_{ba}}{a} \quad (1)$$

$$V_a = I_a(Z_c + Z_{1a} + \alpha^2 Z_f + \alpha^2 Z_b) + jaE_{fm} - jaE_{bm} \quad (2)$$

$$V_m = V_a \quad (3)$$

$$I_s = I_m + I_a = \text{corrente de entrada} \quad (4)$$

Onde:

$$Z_{1m} = R_{1m} + jX_{1m} \text{ (reatância de dispersão do enrolamento principal)} \quad (5)$$

$$Z_{1a} = R_{1a} + jX_{1a} \text{ (reatância de dispersão do enrolamento auxiliar)} \quad (6)$$

$$Z_c = -jX_c \text{ (reatância do capacitor conectado em série com o enrolamento auxiliar)} \quad (7)$$

Tem-se:

$$E_{fa} = I_a \alpha^2 Z_f \quad (8)$$

$$E_{ba} = I_a \alpha^2 Z_b \quad (9)$$

$$E_{fm} = I_m Z_f \quad (10)$$

$$E_{bm} = I_m Z_b \quad (11)$$

Pode-se chegar a:

$$V_m = (Z_{1m} + Z_f + Z_b)I_m - ja(Z_f - Z_b)I_a \quad (12)$$

$$V_a = ja(Z_f - Z_b)I_m + (Z_c + Z_{1a} + \alpha^2 Z_f + \alpha^2 Z_b)I_a \quad (13)$$

Essas equações podem ser resolvidas para se obterem as correntes I_m e I_a .

O torque desenvolvido pelo motor é calculado como a diferença entre o torque de componente positivo com o torque de componente negativo.

$$T = T_f - T_b = \frac{P_{gf} - P_{gb}}{\omega_{syn}} \quad (14)$$

$$P_{gf} = \Re(E_f I_m + ja E_f I_a) \quad (15)$$

$$P_{gb} = \Re(E_b I_m + ja E_b I_a) \quad (16)$$

$$P_{gf} - P_{gb} = \Re[(E_f - E_b)I_m^* + ja(E_f + E_b)I_a^*] \quad (17)$$

$$P_{gf} - P_{gb} = (|I_m|^2 + |aI_a|^2)(R_f - R_b) + 2a|I_a||I_m|(R_f + R_b)\sin(\theta_a - \theta_m) \quad (18)$$

Onde $I_m = I_m \angle \theta_m$, e $I_a = I_a \angle \theta_a$.

A partir das equações (14) e (18) tem-se que o torque é:

$$T = \frac{(|I_m|^2 + |aI_a|^2)(R_f - R_b) + 2a|I_a||I_m|(R_f + R_b)\sin(\theta_a - \theta_m)}{\omega_{syn}} \quad (19)$$

Em condições de partida, tem-se $s=1$ e conseqüentemente $R_f = R_b$, pode-se chegar então à seguinte equação:

$$T_{st} = \frac{2a|I_a||I_m|(R_f + R_b)}{\omega_{syn}} \sin(\theta_a - \theta_m) \quad (20)$$

$$T_{st} = k I_a I_m \sin(\theta_a - \theta_m) \quad (21)$$

Da equação (20) conclui-se que um maior torque de partida será produzido quando a diferença de fase entra as correntes se aproximar de $\pi/2$ radianos. Entretanto esse trabalho em particular prioriza o rendimento do motor em regime permanente, logo essa equação não será usada como parâmetro de escolha do capacitor. Vale lembrar que tirando a relação de espiras, todos os termos da equação (19) variam dependendo da velocidade de rotação do rotor.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse trabalho tem como apoio alguns livros da literatura clássica de máquinas elétricas. Um dos livros utilizados como base é a obra *Máquinas Elétricas e Acionamento* (BIM, 2009), este livro além de apresentar a teoria básica de funcionamento de motores de indução monofásicos ele classifica esse tipo de motor através de seu método de partida. Outra obra clássica utilizada foi o livro *Máquinas Elétricas* (FITZGERALD; KINGSLEY; KUZKO, 1978), que apresenta além de um exame qualitativo dos motores de indução monofásicos, diversos gráficos característicos de conjugado para cada tipo de método de partida.

O livro *Principles of Electric Machines and Power Electronics* (SEN, 1989) possui uma explicação mais aprofundada do funcionamento dos motores de indução monofásico com fase auxiliar com capacitor de regime, além de apresentar o circuito equivalente desse tipo de motor em específico, que é o objeto de análise desse trabalho.

Alguns autores apresentam trabalhos que guardam uma certa semelhança ao que aqui se apresenta, eles consistem em geral na análise de desempenho do motor de indução monofásico, alguns focados em ensaios práticos e outros em simulações computacionais.

PELIZARI (2009) realizou um estudo da influência da configuração dos enrolamentos no desempenho do motor. Nesse estudo duas configurações de enrolamentos foram desenvolvidas e testadas em laboratório, na primeira configuração o enrolamento principal foi alocado na parte inferior das ranhuras, e na segunda as posições dos enrolamentos foram invertidas. Além da análise de desempenho nessas duas configurações, foram realizadas simulações computacionais, com a finalidade de analisar o campo magnético no entreferro da máquina para as duas configurações.

VERMA; PANT; SINGH (2008) realizaram testes em um motor de indução monofásico com um inversor como fonte de tensão com um capacitor acoplado para simular um capacitor variável. Esse capacitor variável que está em série com o enrolamento auxiliar é controlado de maneira que mantenha a corrente do enrolamento auxiliar e do enrolamento principal em quadratura para a produção de máximo torque.

O trabalho de OLIVEIRA (2013) avaliou a aplicação de estratégias de controle originalmente desenvolvidas para motores trifásicos em motores de indução monofásicos. Para essa aplicação o modelo desenvolvido considera a transformação de coordenadas para um eixo estacionário. Uma transformação de simetria para compensar a assimetria dos enrolamentos foi necessária para a aplicação das estratégias de controle.

2.3 PROPOSTA DO TRABALHO

Como descrito anteriormente, esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência da capacitância do capacitor de regime no desempenho de um motor de ventilador. Por se tratar de um motor de ventilador, que tem uma carga muito pequena na partida, pode-se considerar o problema da geração de um conjugado de partida do motor como secundário, algo impossível de se considerar para a maioria das aplicações de motores elétricos.

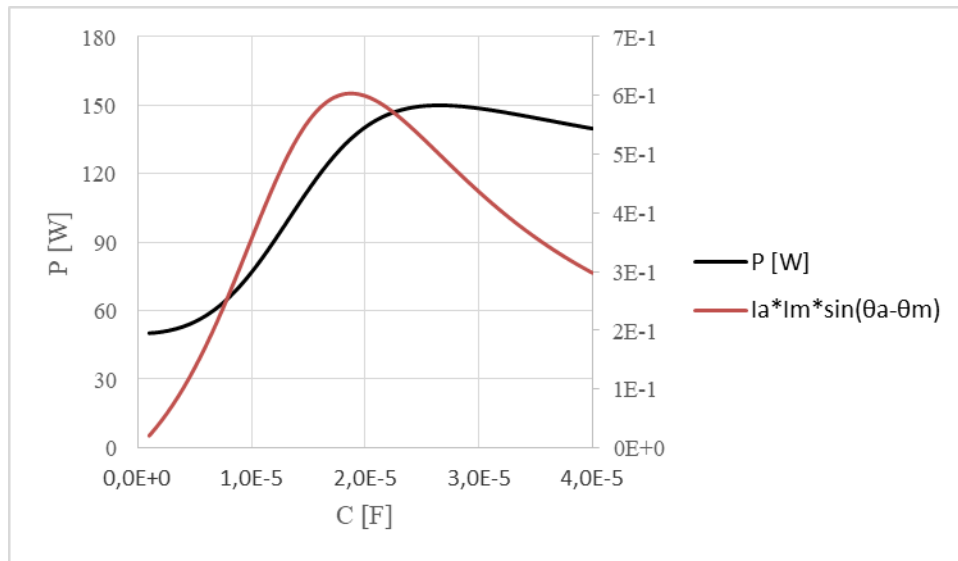
Essa escolha levou a um critério de avaliação que diverge dos critérios geralmente usados, tem-se como critério principal a eficiência do motor em regime permanente. Neste trabalho, a eficiência do motor em regime permanente é medida pela função objetivo, dada pela divisão da velocidade atingida em regime permanente (rpm) pela potência total que o motor consome (W).

O ventilador objeto desse estudo, assim como a grande maioria dos ventiladores, usa um motor de indução monofásico com fase auxiliar com capacitor de regime. Já que a fase auxiliar fica permanentemente acionada, o motor é analisado como um motor bifásico (Figura 9).

Através de uma análise simplificada, em que a impedância do enrolamento não varie com a velocidade angular, é possível ter uma ideia da influência do valor do capacitor na potência real do motor. Essa análise simplificada toma por base o modelo mostrado anteriormente na Figura 6, sendo que o enrolamento M tem impedância $Z_M = R_M + jX_M$, o enrolamento A tem impedância $Z_A = R_A + jX_A$ e o capacitor tem impedância $Z_C = -jX_C$. Para simplificar esta análise, considerou-se $Z_M = Z_A = 100 + j100[\Omega]$, e a tensão de entrada $E = 100[V]$. Variando o valor do capacitor de $1\mu F$ até $40\mu F$, obtém-se o gráfico da Figura 10, em que se tem uma curva representando a potência consumida pelo motor em Watts, e uma grandeza que é proporcional ao torque de partida do motor, apresentada pela equação (20).

A partir dessas duas curvas é possível ilustrar que a potência consumida e o torque de partida aumentam junto com o valor do capacitor até atingir um valor máximo, sendo assim, é possível atingir um valor de capacitor em que a relação entre o torque do motor (e consequentemente a sua velocidade) e a potência consumida esteja otimizada.

Figura 10 - Curva da potência consumida e do componente proporcional ao torque de partida em função do capacitor de regime.



Fonte: Criação própria do autor.

Vale ressaltar que esse gráfico não representa fielmente o funcionamento do motor, uma vez que ele desconsidera a variação das impedâncias Z_f e Z_b as indutâncias mutuas entre os enrolamentos, e a componente do torque que só se apresenta quando o motor já começou a se movimentar. O Capítulo 4 apresenta uma simulação em que o modelo utilizado é mais fiel à operação de um motor monofásico com fase auxiliar com capacitor de regime.

3 ENSAIOS

3.1 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado em um ventilador de teto da marca LOREN SID, as informações de placa desse ventilador são mostradas a seguir:

Tensão [V]	127
Frequência [Hz]	50/60
Corrente [A]	1
Potência [W]	127

Antes de se realizar o experimento, foi feita a medição da resistência entre as três entradas do motor, os valores das medições são mostrados na Tabela 1.

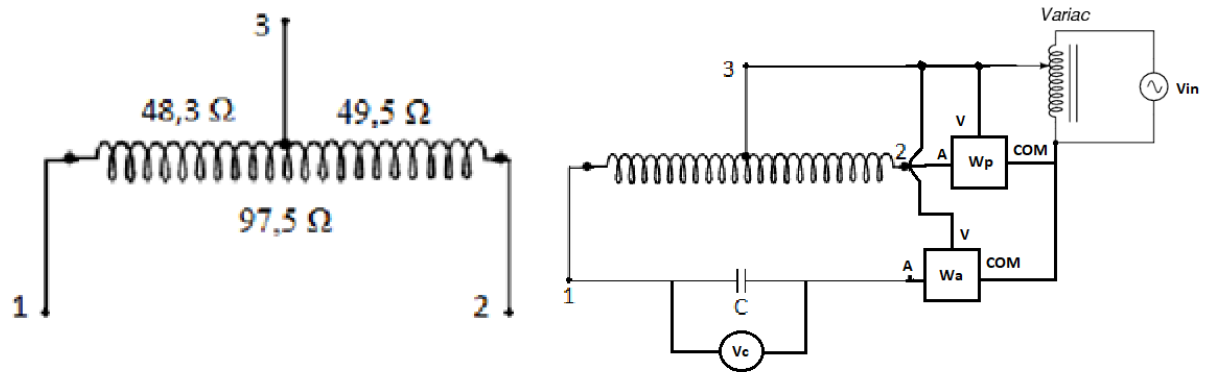
Tabela 1- Medições de resistência entre os terminais das bobinas.

ENTRADAS	RESISTÊNCIA [Ω]
1 - 2	97,5
1 - 3	48,3
2 - 3	49,5

Fonte: Criação própria do autor.

Dadas essas medições chega-se à conclusão que a construção do motor quanto aos enrolamentos pode ser vista da maneira apresentada pela Figura 11. Há uma diferença entre a soma das resistências $R_{1-3} + R_{2-3}$ e a resistência R_{1-2} por conta da incerteza da medição do ohmímetro. Ao considerar o desenho e o sentido de rotação do ventilador, achou-se que entre os terminais 2 e 3 tem-se o enrolamento principal, e entre os terminais 1 e 3 tem-se o enrolamento auxiliar. O capacitor de regime é então conectado aos terminais 1 e 2, a fonte de tensão por sua vez, é conectada aos terminais 2 e 3, se conectada nos terminais 1 e 3 o ventilador se movimenta no sentido contrário.

Figura 11 - Resistência entre os terminais do ventilador, e esquema do circuito utilizado.



Fonte: Criação própria do autor.

Nesse experimento, coletaram-se os seguintes dados:

- Potência Aparente da fase principal (módulo e ângulo);
- Potência Aparente da fase auxiliar (módulo e ângulo);
- Tensão do Capacitor;
- Rotação do ventilador.

Todas as medições foram feitas com o ventilador em regime permanente, antes de realizá-las, a tensão de entrada era ajustada para 127V através de um Variac (Figura 11). As medições de potência aparente foram realizadas através de dois Alicates Multímetros, que mediam as correntes nas entradas 1 e 2, enquanto mediam também a tensão de entrada. Para a medição da tensão do capacitor utilizou-se um voltímetro, e para a medição da velocidade do ventilador utilizou-se um tacômetro laser apontado para o ventilador, que tinha um pedaço de fita reflexiva. Eis a lista de materiais utilizados no experimento:

- Ventilador de teto;
- Variac;
- Tacômetro laser;
- Fita Reflexiva;
- 2 Alicates Multímetro;
- 1 Voltímetro;
- Capacitores de valores variados.

A partir da medição da tensão do capacitor, da potência aparente, com a tensão de entrada fixada em 127 Volts, é possível calcular com maior exatidão (se comparado ao valor nominal do capacitor):

$$X_C = \frac{V_C}{I_a} = \frac{V_C * 127}{S_a} \quad (22)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (23)$$

$$C = \frac{S_a}{2\pi * 60 * V_C * 127} \quad (24)$$

Determinada a capacitância do capacitor, e medida a velocidade do ventilador resta calcular a potência total consumida. Para isso, basta somar as partes reais das potências da fase principal e auxiliar.

$$P_t = P_m + P_a = \Re(S_m) + \Re(S_a) \quad (25)$$

$$P_t = S_m \cos(\theta_m) + S_a \cos(\theta_a) \quad (26)$$

3.2 RESULTADOS DO EXPERIMENTO

Foram realizadas medições com 18 diferentes valores de capacitores, que variavam aproximadamente entre 5 μ F e 20 μ F. Ao se utilizar um capacitor com valor menor que 4 μ F, o motor não conseguiu gerar um conjugado de partida suficiente para se sobrepor ao momento de inércia da carga do ventilador. A medida que o valor do capacitor subia além de 20 μ F, a potência consumida pelo motor também subia, chegando a valores muito maiores que o dado na placa, o que possibilitava a ocorrência de danos ao motor que prejudicariam qualquer teste futuro. Dado que o trabalho tem como objetivo alcançar um valor de capacitor que otimize a performance do motor, a variação das amostras foi considerada suficiente.

Os dados coletados são mostrados na Tabela 2:

Tabela 2: Dados coletados dos ensaios.

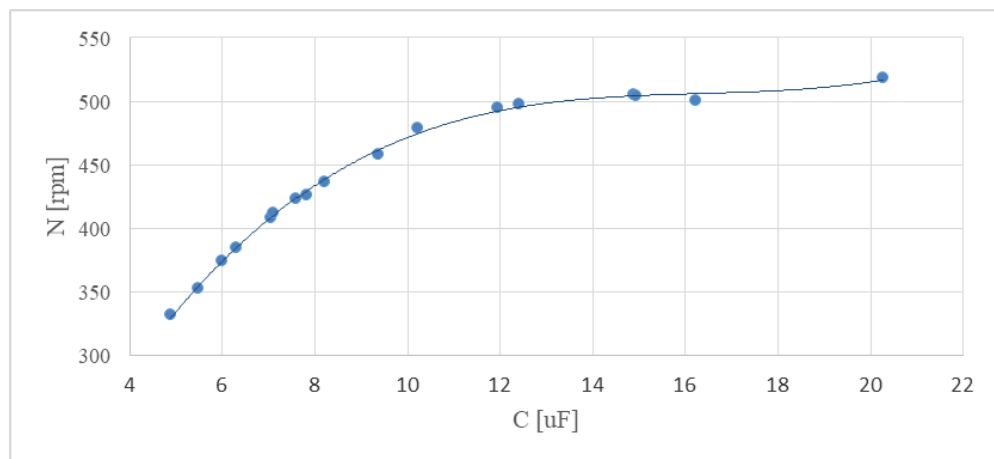
N [rpm]	Saux [VA]	Θ_{aux} [°]	Sp [VA]	Θ_p [°]	Vc [V]	C [μ F]	Pt [W]
332	36,8	-73,2	100,4	46,4	157,5	4,88	79,9
353	42,0	-71,3	104,3	47,2	160,5	5,47	84,4
374	47,2	-68,9	103,4	48,7	164,3	6,00	85,2
385	50,7	-67,0	104,6	48,7	167,8	6,31	88,8
408	57,6	-64,5	104,8	50,2	170,8	7,04	91,8
412	58,8	-63,9	104,3	50,2	173,0	7,10	92,6
423	63,6	-62,0	103,2	50,9	175,0	7,59	94,9
426	65,9	-61,3	102,7	50,9	176,0	7,82	96,4
437	70,1	-59,3	103,0	51,7	178,4	8,21	99,6
458	82,4	-55,3	104,2	53,8	183,6	9,37	108,5
479	91,5	-54,0	104,0	54,0	187,0	10,22	114,9
495	109,0	-46,4	100,1	56,6	190,7	11,94	130,3
498	114,3	-44,8	98,7	55,3	192,3	12,41	137,4
505	134,6	-40,5	100,2	56,0	189,0	14,87	158,4
504	131,5	-34,9	90,2	54,5	184,0	14,93	160,2
501	142,2	-27,1	90,4	51,7	183,0	16,23	182,6
518	168,3	-21,6	98,7	53,1	173,4	20,27	215,7

Fonte: Criação própria do autor.

A Figura 12 mostra a influência da capacitância do capacitor de regime na velocidade final do ventilador. A Figura 13 mostra a potência consumida em função dessa mesma capacitância. Finalmente a Figura 14 ilustra a curva do comportamento da função objetivo, calculado através da divisão da rotação pela potência consumida (rpm/W), em função da capacitância do capacitor de regime. Nesses 3 gráficos foram adicionadas linhas de tendência

(representadas por linhas contínuas) que aproximaram os resultados obtidos às funções polinomiais de terceiro grau. Os índices de correlação (r^2) alcançados por essas linhas de tendência foram todos maiores que 0,99, mostrando que o polinômio gerado representa bem o funcionamento do motor dentro do intervalo de amostras que foi testado.

Figura 12 - Gráfico da rotação do ventilador em função da capacitância do capacitor de regime.

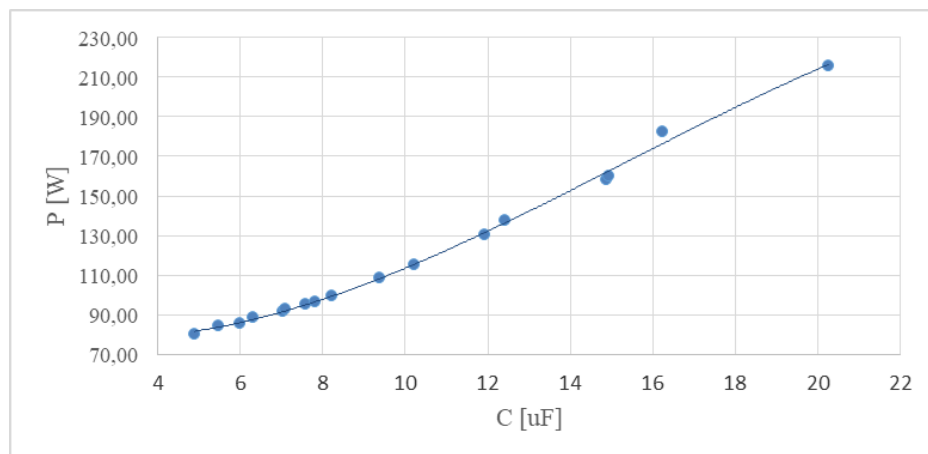


Fonte: Criação própria do autor.

A linha de tendência, com $r^2 = 0,9981$ chegou equação (27):

$$N[rpm](C[\mu F]) = 0,1093C^3 - 5,3607C^2 + 88,652C + 11,731 \quad (27)$$

Figura 13 - Gráfico da potência consumida pelo ventilador em função da capacitância do capacitor de regime.

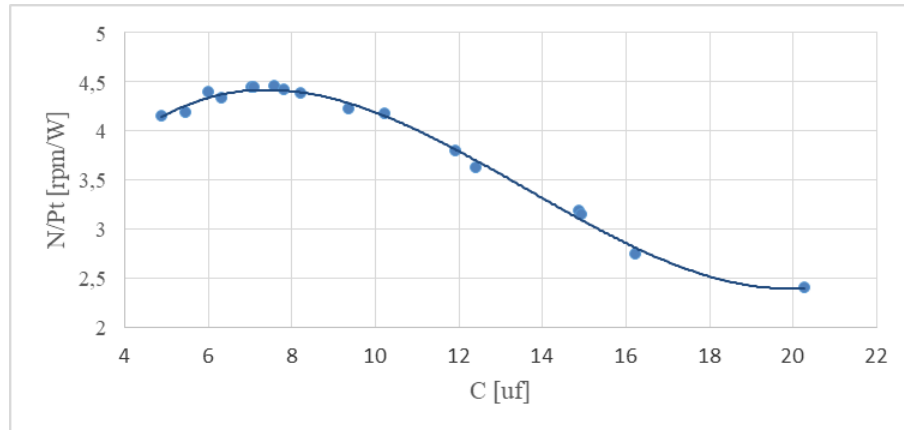


Fonte: Criação própria do autor.

A linha de tendência desse gráfico tem o $r^2=0,9973$, e é representada pela equação (28):

$$P[W](C[\mu F]) = -0,0231C^3 + 1,057C^2 - 5,5032C + 85,905 \quad (28)$$

Figura 14 - Gráfico da função objetivo do ventilador em função da capacitância do capacitor de regime.



Fonte: Criação própria do autor.

A linha de tendência gerada pelas amostras obtidas possui o $r^2=0,9948$, descrita pela equação (29):

$$\frac{N}{P_t} \left[\frac{rpm}{W} \right] (C[\mu F]) = 0,00208C^3 - 0,0851C^2 + 0,916C + 1,46 \quad (29)$$

A partir da equação (29) pode-se determinar o valor da capacitância em que o rendimento do ventilador atinge o seu valor máximo (ponto em que a primeira derivada da função se iguala a zero e a segunda derivada da função é negativa).

$$\frac{d}{dC} \left(\frac{N}{P_t} \right) = 0,00624C^2 - 0,1702C + 0,916 = 0 \quad (30)$$

$$C_1 = 19,9\mu F; C_2 = 7,38\mu F \quad (31)$$

$$\frac{d^2}{dC^2} \left(\frac{N}{P_t} \right) = 0,01248C - 0,1702 \quad (32)$$

$$\frac{d^2}{dC^2} \left(\frac{N}{P_t} \right) (C_1) = 0,0781; \frac{d^2}{dC^2} \left(\frac{N}{P_t} \right) (C_2) = -0,0781 \quad (33)$$

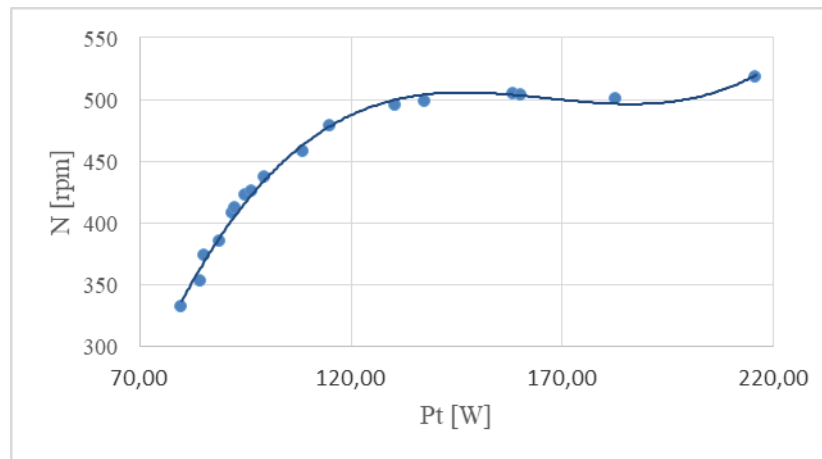
Já que apenas C_2 possui uma derivada segunda negativa, C_2 é o valor do capacitor de regime em que se obtém o maior rendimento possível. Utilizando as equações (27) e (28), é possível estimar a velocidade e a potência consumida usando o capacitor C_2 .

$$N(C_2) = 0,1093 * 7,38^3 - 5,36077,38^2 + 88,652 * 7,38 + 11,731 = 406[rpm] \quad (34)$$

$$P(C_2) = -0,02317,38^3 + 1,0577,38^2 - 5,5032 * 7,38 + 85,905 = 93,6[W] \quad (35)$$

Afim de analisar o impacto da alteração do capacitor acoplado à fase auxiliar, fez-se um gráfico que coloca a velocidade do ventilador em função da potência total consumida (Figura 15). Os dados da placa afirmam que a potência do motor é de 127 Watts, a partir da equação dada pela linha de tendência desse gráfico é possível estimar a rotação atingida usando a potência indicada na placa, e então comparar com os resultados obtidos com o capacitor otimizado.

Figura 15 - Gráfico da velocidade do motor em função da potência consumida.



Fonte: Criação própria do autor.

A linha de tendência formada através desses dados tem $r^2=0,9926$, e segue a equação (36):

$$N[rpm](P_t[W]) = 3,01 \cdot 10^{-4} \cdot P_t^3 - 1,50 \cdot 10^{-1} \cdot P_t^2 + 2,47 \cdot 10^{-1} \cdot P_t - 8,28 \cdot 10^2 \quad (36)$$

Considerando a potência consumida igual a 127 Watts, estima-se através da equação citada acima que a velocidade do ventilador esteja próxima de 497 rotações por minuto. Utilizando essa mesma equação com a potência igual a 93,6 Watts (Equação 35), estima-se que a velocidade do ventilador seja de aproximadamente 411 rotações por minuto. Portanto, a melhora estimada no rendimento será:

$$N_1(P_{t1} = 127) = 496,6[rpm]; \frac{N_1}{P_{t1}} = 3,91[rpm/W] \quad (37)$$

$$N_2(P_{t2} = 93,6) = 410,6[rpm]; \frac{N_2}{P_{t2}} = 4,39[rpm/W] \quad (38)$$

$$\frac{\frac{N_2}{P_{t2}} - \frac{N_1}{P_{t1}}}{\frac{N_1}{P_{t1}}} * 100 = \frac{4,39 - 3,91}{3,91} * 100 = 12,3\% \quad (39)$$

Sendo que a redução da potência consumida foi de:

$$\frac{P_{t1} - P_{t2}}{P_{t1}} * 100\% = \frac{127 - 93,6}{127} * 100\% = 26,3\% \quad (40)$$

E a redução da velocidade do rotor foi de:

$$\frac{N_1 - N_2}{N_1} * 100\% = \frac{496,6 - 410,6}{496,6} * 100\% = 17,3\% \quad (41)$$

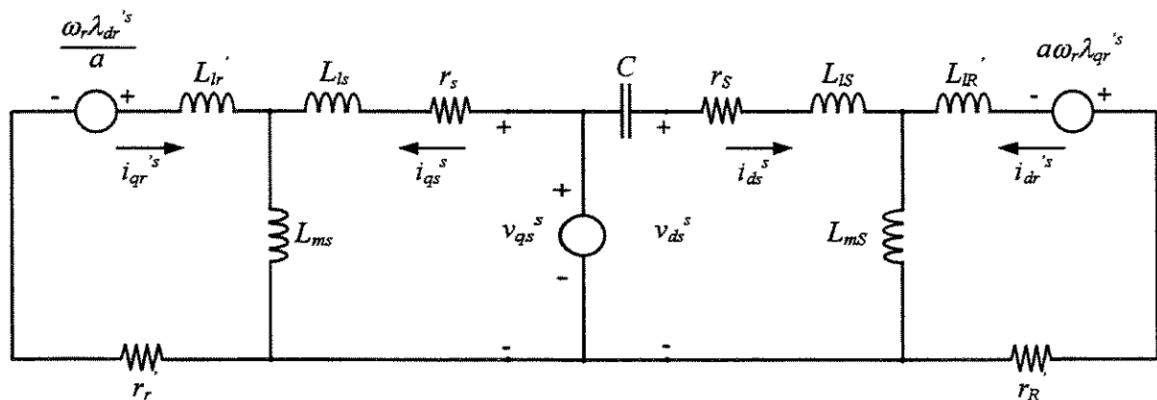
4 SIMULAÇÃO

4.1 DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO

Afim de analisar mais profundamente o impacto da alteração dos capacitores de regime na performance do motor, foram realizadas também algumas simulações usando o software *Matlab 7.10*. Essas simulações usaram um modelo de representação do motor de indução monofásico diferente dos demais já apresentados, se trata de um modelo dinâmico que foi desenvolvido por KRAUSE (1986).

Nesse modelo, o motor monofásico é visto como um motor bifásico assimétrico em um sistema de eixos dq estacionário para que os coeficientes variantes no tempo, que surgem devido à assimetria dos enrolamentos do estator, possam ser eliminados. O diagrama esquemático desse modelo é mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Diagrama esquemático do modelo desenvolvido por Krause.



Fonte: (KRAUSE, 1986).

O modelo matemático do circuito elétrico é dado pelas seguintes equações:

$$v_{qs}^s = r_s i_{qs}^s + p \lambda_{qs}^s \quad (42)$$

$$v_{ds}^s = r_s i_{ds}^s + p \lambda_{ds}^s \quad (43)$$

$$v_{ds}^s = v_{qs}^s - \frac{1}{C} \int i_{ds}^s dt \quad (44)$$

$$v_{qr}^{s'} = r_r' i_{qr}^{s'} - \omega_r \frac{N_s}{N_r} \lambda_{dr}^{s'} + p \lambda_{qr}^{s'} \quad (45)$$

$$v_{dr}^{is} = r_r' i_{dr}^{is} - \omega_r \frac{N_s}{N_r} \lambda_{qr}^{is} + p \lambda_{dr}^{is} \quad (46)$$

$$\lambda_{qs}^s = L_{ls} i_{qs}^s + L_{ms} (i_{qs}^s + i_{qr}^{is}) \quad (47)$$

$$\lambda_{ds}^s = L_{ls} i_{ds}^s + L_{ms} (i_{ds}^s + i_{dr}^{is}) \quad (48)$$

$$\lambda_{qr}^{is} = L_{lr}' i_{qr}^{is} + L_{ms} (i_{qs}^s + i_{qr}^{is}) \quad (49)$$

$$\lambda_{dr}^{is} = L_{lr}' i_{dr}^{is} + L_{ms} (i_{ds}^s + i_{dr}^{is}) \quad (50)$$

$$T_e = \left(\frac{p}{2}\right) \cdot \left(\frac{N_s}{N_r}\right) \cdot (L_{ms}) (i_{qs}^s \cdot i_{dr}^{is} - i_{ds}^s \cdot i_{qr}^{is}) \quad (51)$$

$$T_e = \frac{2}{p} \cdot J \cdot p \cdot \omega_r + T_L \quad (52)$$

O sistema mecânico é descrito pelas seguintes equações:

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (53)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{T_e - F \omega_m - T_m}{2H} \quad (54)$$

O diagrama de simulação implementado no Matlab utilizado se chama Single Phase Asynchronous Machine localizado na biblioteca Simscape do Simulink. Esse modelo precisa que os seguintes parâmetros de entrada sejam definidos:

- Potência Nominal (VA);
- Tensão (V);
- Frequência;
- Estator principal: resistência (Ω) e indutância de dispersão (H ou pu);
- Rotor principal: resistência (Ω) e indutância de dispersão (H ou pu), ambas referidas ao estator;
- Indutância de magnetização da fase principal;
- Estator auxiliar: resistência (Ω) e indutância de dispersão (H ou pu);
- Coeficiente de inércia total do motor com a carga (kg.m²);
- Coeficiente de viscosidade (N.m.s)
- Número de pares de polos;
- Relação de espiras (fase auxiliar pela fase principal);

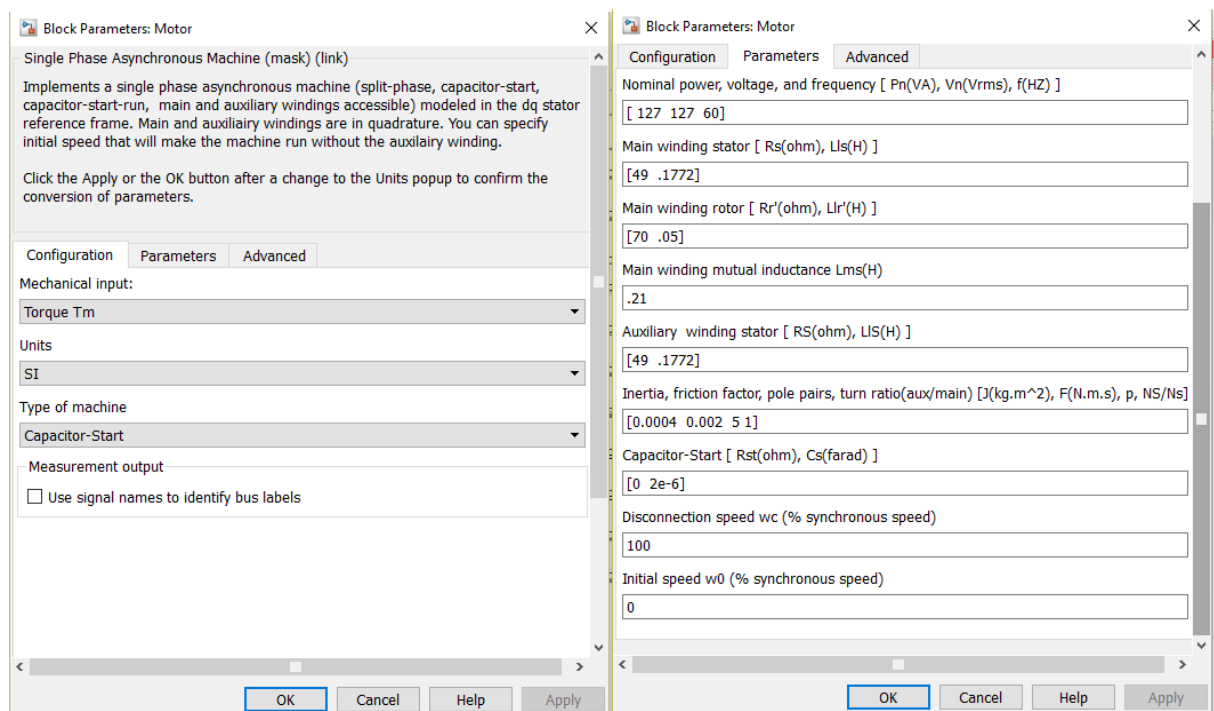
- Capacitor de partida: capacitância (F) e resistência (Ω);
- Capacitor de regime: capacitância (F) e resistência (Ω);
- Velocidade de desconexão (percentual da velocidade nominal em que a fase auxiliar é desconectada);
- Velocidade inicial (percentual da velocidade nominal que se inicia a simulação).

Além disso, é necessário também definir as seguintes configurações:

- Entrada mecânica: seleciona se o torque aplicado ao eixo é visto como uma entrada de um bloco do Simulink, ou como uma porta mecânica rotacional do Simscape;
- Unidades: Especifica o tipo de unidade de entrada e saída como SI ou pu;
- Tipo de Máquina: Especifica o método de partida do motor.

Os parâmetros de entrada do motor utilizados na simulação são mostrados na Figura 17.

Figura 17 - Configurações do motor simulado.



Fonte: Criação própria do autor.

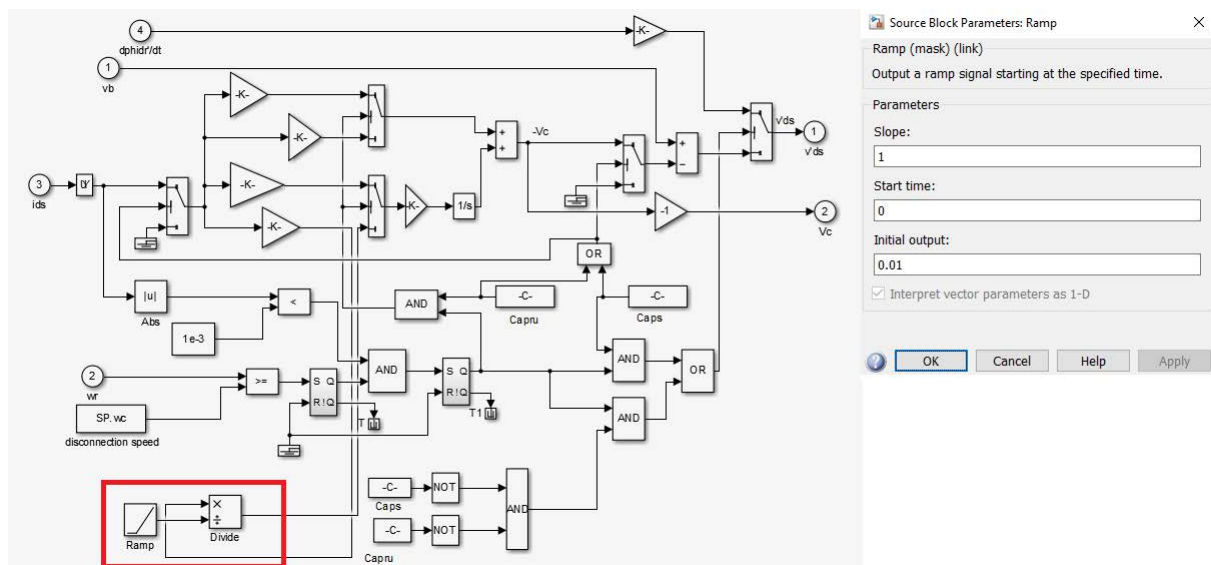
Nesse modelo do Matlab, não há a opção de um motor que use o método de partida de fase auxiliar com capacitor de regime, portanto, configurou-se como um motor com fase auxiliar com capacitor de partida, só que com a velocidade de desconexão de 100% (como pode ser observado na Figura 17).

Os valores das indutâncias de rotor, estator e mútuas foram inicialmente estimados com base em alguns dados obtidos nos ensaios do motor. Após essa primeira estimativa, esses valores foram alterados até obter resultados parecidos com os obtidos nos ensaios.

Já que o objetivo dessa simulação é determinar o valor ótimo do capacitor de regime para um motor qualquer, foi realizada uma pequena alteração dentro do modelo do motor (na submáscara `spsSinglePhaseAsynchronousMachineModel/Continuous/disconnection_system` – Figura 18), colocou-se uma fonte do tipo rampa que multiplica o valor do parâmetro Capacitor-Start (capacitor de partida). Essa rampa inicia a simulação com o valor próximo a zero e sobe em uma taxa de uma unidade por segundo. Já que o valor escolhido para o capacitor de partida é de $1\mu\text{F}$, o valor do capacitor aumenta a uma taxa de $1\mu\text{F}$ por segundo.

$$C = C_s(0,01 + u_{-2}(t)) = 1.10^{-6}(0,01 + u_{-2}(t)) \quad (55)$$

Figura 18 - Alteração feita no modelo do motor.



Fonte: Criação própria do autor.

Com o objetivo de não afetar os resultados, foi escolhido um valor pequeno para o momento de inércia do motor, uma vez que quanto maior fosse esse valor, mais lenta seria a aceleração do ventilador, por sua vez uma resposta lenta prejudicaria a análise já que a capacitância muda com o tempo (essa afirmação pode ser deduzida da equação 54).

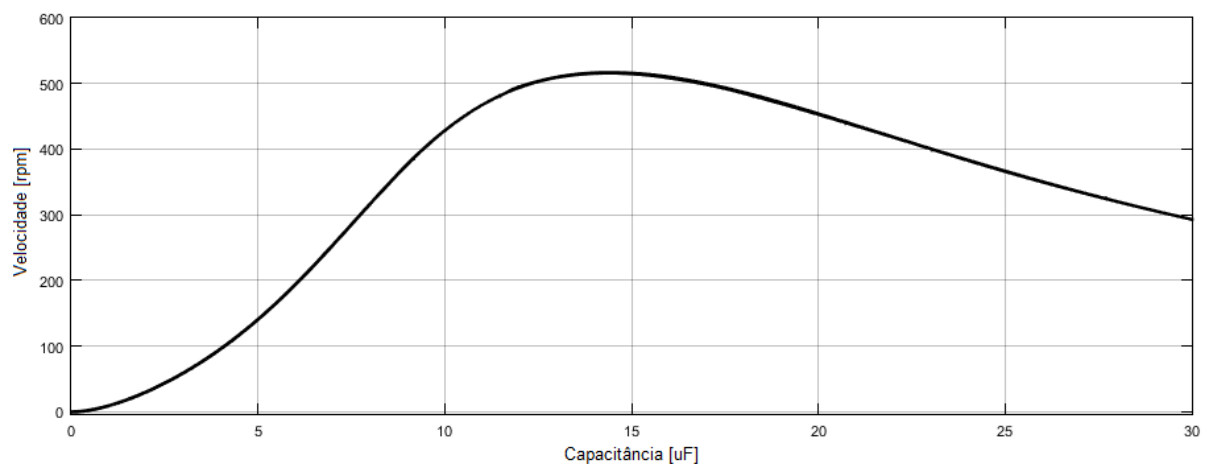
O modelo oferece diversas saídas, dentre elas foram utilizadas:

- Corrente da fase principal;
- Corrente da fase auxiliar;

4.2 RESULTADOS DA SIMUAÇÃO

As figuras 20, 21 e 22 mostram os sinais visto pelos “Scopes”, presentes na Figura 19. Pode-se ver nessas figuras a variação da velocidade, da potência total consumida e da função objetivo do motor em função do tempo. Vale lembrar que o capacitor de regime nessa simulação possui a mesma capacitância (em μF) que o tempo de simulação em segundos, portanto os gráficos das figuras 20, 21 e 22 estão todos em função da capacitância do capacitor de regime. Pode-se observar da Figura 20 que a velocidade do rotor aumenta quase que linearmente até o capacitor chegar a aproximadamente $15\mu\text{F}$ em que a velocidade atinge o seu pico para depois decair lentamente com o aumento da capacitância.

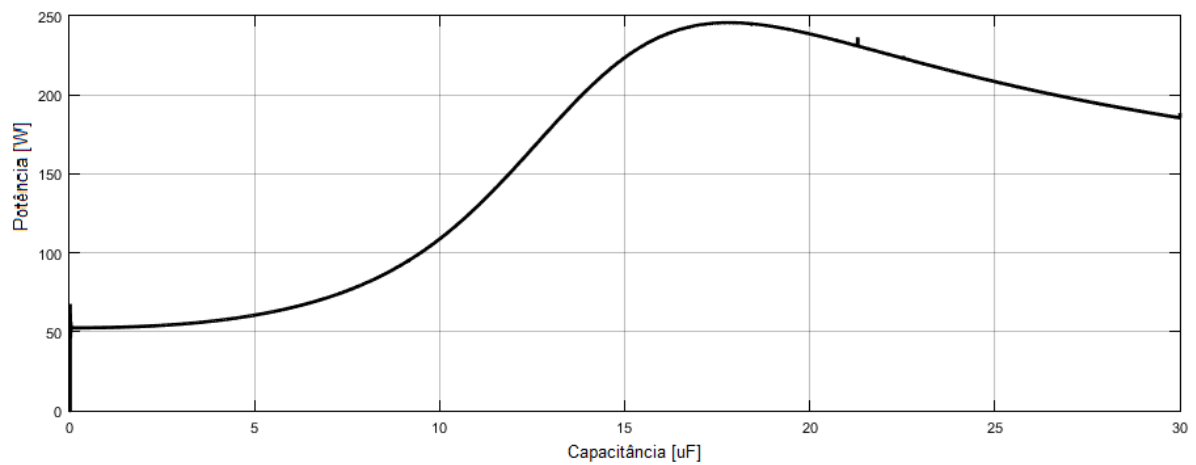
Figura 20 - Gráfico velocidade do motor simulado x capacitância do capacitor de regime.



Fonte: Criação própria do autor.

A Figura 21, que mostra o gráfico da potência consumida possui por sua vez um comportamento um pouco diferente. A potência consumida só começa a subir mais bruscamente a partir dos $7\mu\text{F}$, atingindo o pico com um capacitor de regime com capacitância aproximadamente $17\mu\text{F}$, para depois decair lentamente.

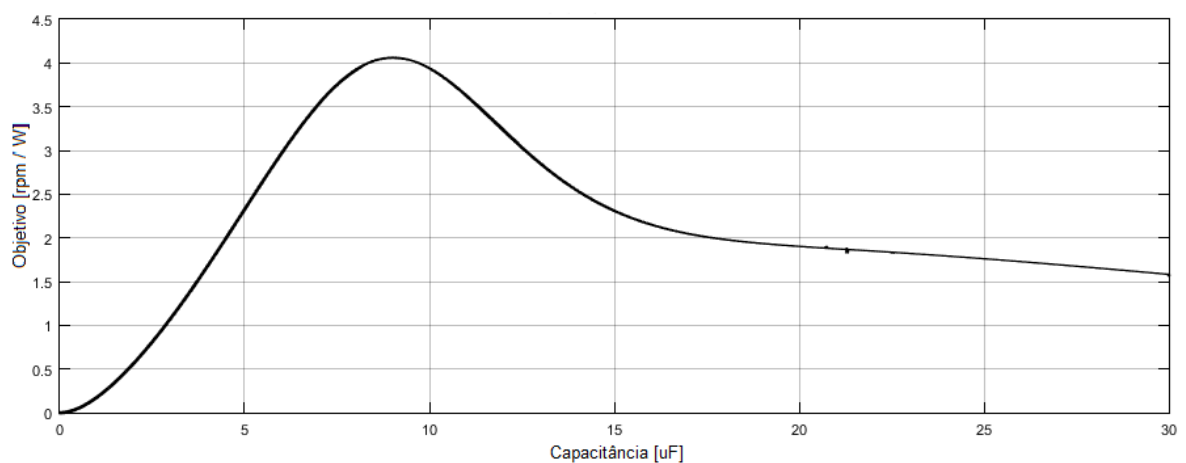
Figura 21 - Gráfico potência consumida no motor simulado x capacitância do capacitor de regime.



Fonte: Criação própria do autor.

A Figura 22 mostra o gráfico da função objetivo do motor em função da capacitância do capacitor de regime, nesse gráfico é possível observar que a função objetivo do motor atinge o seu máximo quando o capacitor tem cerca de 9 μ F. Com essa capacitância, a velocidade do rotor é de aproximadamente 400 rpm, e a potência consumida é igual a aproximadamente 95 W.

Figura 22 - Gráfico função objetivo do motor simulado x capacitância do capacitor de regime.



Fonte: Criação própria do autor.

5 DISCUSSAO DO RESULTADOS

A Tabela 3 a seguir, mostra uma comparação da performance do motor em sua configuração nominal, em que a potência consumida é de 127W, com o motor em sua configuração otimizada, em que a relação entre a rotação e a potência consumida atinge o seu máximo.

Tabela 3: Comparação dos resultados dos ensaios e da simulação com capacitor nominal e otimizado.

	Ensaio		Simulação	
	Nominal	Otimizado	Nominal	Otimizada
Potência [W]	127,0	93,60	127,0	92,44
Velocidade [rpm]	496,6	410,6	464,7	375,8
Desempenho [rpm/W]	3,910	4,387	3,659	4,065
Capacitor [μF]	11,63	7,380	10,90	8,960

Fonte: Criação própria do autor.

Observa-se primeiramente que tanto no ensaio quanto na simulação a configuração com o capacitor dimensionado para um melhor desempenho em regime permanente possui como contrapartida uma velocidade de rotação menor, em ambos os casos ela representa pouco mais que 80% da velocidade do motor em sua configuração nominal. Ao comparar os resultados dos ensaios com os da simulação, nota-se que tanto a velocidade de rotação do motor quanto o seu desempenho foram maiores nos ensaios do que nas simulações, o que pode ser simplesmente uma diferença de alguns aspectos mecânicos (momento de inércia e fator de fricção) estimados para a simulação em relação aos valores reais.

Ao representar os resultados das configurações otimizadas como um percentual relativo ao das configurações nominais obtém-se a Tabela 4:

Tabela 4: Resultados com capacitor otimizado em relação aos resultados com capacitor nominal.

	Ensaio Otimizado	Simulação Otimizada
Potência	73,7%	72,8%
Velocidade	82,7%	80,9%
Desempenho	112,2%	111,1%
Capacitor	63,5%	82,2%

Fonte: Criação própria do autor.

Pode-se observar dessa última tabela que tirando a relação entre os capacitores, a comparação entre os valores percentuais do ensaio e da simulação são muito próximos em todos os outros aspectos. O que demonstra primeiramente que a simulação realizada tem potencial de, em certos aspectos, apresentar dados muito próximos aos obtidos em ensaios.

Os valores percentuais do capacitor dos ensaios, quando comparados com a simulação por sua vez apresentaram uma certa discrepância de valores. O real motivo dessa diferença entre os ensaios e a simulação não pode ser determinado com certeza, porém, o mais provável é que a diferença seja consequência da inexatidão na determinação dos parâmetros de entrada da simulação. Sugere-se para um trabalho futuro um estudo em que, esses parâmetros sejam medidos e /ou calculados afim de obter-se um modelo ainda mais próximo do motor real, uma vez que ao alcançar tal feito, é possível monitorar diversos outros aspectos na simulação.

A discrepância entre os valores percentuais do capacitor dos ensaios quando comparados com a simulação podem ser explicados pela provável diferença entre os aspectos dos enrolamentos do motor real com os valores utilizados na simulação, uma vez que esses valores foram obtidos depois de algumas tentativas para aproximar os resultados da simulação com os dos ensaios.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como maior objetivo avaliar a influência do capacitor de regime no desempenho do motor de indução monofásico. Ao levar em consideração os resultados dos ensaios chega-se à conclusão de que se por um lado é possível ter uma redução de até 30% na potência consumida, há em contrapartida uma redução da velocidade de rotação, que nesse experimento foi por volta de 20%. Contando esses dois fatores conclui-se que há de fato uma melhoria no desempenho do motor de cerca de 12% se comparado com a sua condição nominal.

Há de se considerar que parte dessa melhora de desempenho também poderia ser alcançada com o controle da tensão de entrada. Porém, deve-se lembrar que alguns métodos de controle de tensão produzem harmônicos que podem no final acabar diminuindo ainda mais o rendimento do motor.

Considerando que o objetivo da simulação foi o de possibilitar a determinação do valor ótimo da capacitância do capacitor de regime de um motor qualquer, pode-se concluir que isso só é realmente viável caso os valores característicos de indutância e resistências dos enrolamentos sejam conhecidos. Porém, isso só é possível caso se tenha acesso às características físicas do motor.

Por fim, deve-se avaliar caso a caso quais são os fatores prioritários no projeto do motor. Esse método de dimensionamento do capacitor de regime geralmente é válido para projetos de baixa carga, em que a partida não seja uma grande preocupação, e em que não se tenha a necessidade da operação do motor em seu máximo nominal.

REFERÊNCIAS

- BIM, Edson; Regime permanente de máquinas de indução. In____. **Máquinas elétricas e acionamento**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. p. 267-324.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional: séries históricas completas**. 2017. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>>. Acesso em: 6 mar. 2017.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Custo marginal de expansão**. 2011. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/geracao/Documents/Estudos_26/NT_MetodologiadecalculoCME_2011.pdf>. Acesso em 08 mar. 2017.
- BRASIL. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão. **Pesquisa nacional por amostra de domicílios**: acesso à internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal. 2016. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv99054.pdf>> Acesso em 13 nov. 2017.
- FITZGERALD, A. Ernest; KINGSLEY Jr., Charles; KUSKO, A. Motores de c. a. de pequena potência. In____. **Máquinas elétricas**. São Paulo: McGraw Hill, 1978. p. 527-585.
- KRAUSE, Paul, C. Theory of symmetrical and unsymmetrical two-phase induction machines. In____. **Analysis of electric machinery**. E.U.A.: McGraw Hill, 1986. p. 415-448.
- OLIVEIRA, Jacson Luís de. **Avaliação de estratégias de controle do motor de indução monofásico**. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2013.
- PELIZARI, Ademir. **Um estudo da influência das configurações dos enrolamentos no desempenho de motores de indução monofásicos com capacitor de partida**. 2009. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- SEN, Paresh C. Single phase motors. In____. **Principles of electric machines and power electronics**. Estados Unidos: John Wiley & Sons, 1989. p. 377-431.
- SILVA, Niágara; FERES, José; LÍRIO, Viviane. **Análise da estrutura da demanda de energia elétrica residencial segundo os quantis de consumo**. Disponível em: <www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/radar/121114_radar22_cap6.pdf> Acesso em 13 nov. 2017.
- VERMA, Vilsha; PANT, Peeyush; SINGH, Bhim. **Simulation of a single-phase induction motor with dynamic capacitor for maximum torque operation**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4745291/>> Acesso em 5 ago. 2016.