

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LEONARDO PHILIPPI SENS

**Motor de Indução Trifásico com Capacitor e Alimentação
Monofásica**

**Rio de Janeiro - RJ
Março - 2011**

LEONARDO PHILIPPI SENS

**Motor de Indução Trifásico com Capacitor e Alimentação
Monofásica**

**PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE
DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO ELETRICISTA**

Orientador: Prof. Sebastião E. M. de Oliveira

**Rio de Janeiro – RJ
Março - 2011**

LEONARDO PHILIPPI SENS

**Motor de Indução Trifásico com Capacitor e Alimentação
Monofásica**

**PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE
DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO ELETRICISTA**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Orientador: Sebastião E. M. de Oliveira

Prof. Sergio Sami Hazan

Prof^a. Maria Karla Vervloet Sollero

**Rio de Janeiro - RJ
Março - 2011**

SENS, LEONARDO PHILIPPI.
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM CAPACITOR E ALIMENTAÇÃO
MONOFÁSICA

[Rio de Janeiro, 2011]

(DEE-POLI/UFRJ, Engenharia Elétrica, 2011)

p. 77 x 29,7 cm

Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica,
Curso de Engenharia Elétrica

- 1- Motor elétrico,
- 2-Capacitor,
- 3- Ensaio.

Agradecimentos

Agradeço minha família pela dedicação e educação que sempre me proporcionaram e fizeram de mim a pessoa que sou;

Aos professores e amigos com quem convivi durante toda a graduação.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi a verificação experimental do comportamento de um motor elétrico de indução trifásico, tipo rotor em gaiola, operando monofasicamente com uma das fases ligadas a um capacitor, e de avaliar o grau de desbalanço entre as correntes de alimentação do motor quando conectado a diferentes capacitores, em distintos escorregamentos impostos pela carga no eixo do mesmo.

Trata-se de uma investigação experimental de laboratório visando o estudo da aplicabilidade de antigas idéias já propostas por Carl August Rudolph Steinmetz (1865-1923) ^[1] e avaliados teoricamente por, Sebastião, E. M. de Oliveira ^[2], ^[3].

Para os estudos foi utilizado um pequeno motor trifásico de tensão de 220 V e potência de ¼ de cv (185 W), comercialmente disponível, de fabricação WEG.

Palavras-chave: Motor elétrico; Capacitor; Ensaio.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Considerações Iniciais	12
1.2 Objetivos.....	14
CAPÍTULO 2 SISTEMA SOB ENSAIO	15
2.1 Equipamentos	16
2.1.1 Amostra ensaiada	16
2.1.2 Contactora eletromagnética 127 V	19
2.1.3 Variador de tensão trifásico 0-240 V 22 A;	20
2.1.4 Junta torquimétrica Ono Sokki 2Nm, alimentação 100 V	20
2.1.5 Motor de corrente contínua – CEN – 350 W	21
2.1.6 Fonte de corrente contínua bipolar estabilizada de 100 V 10 A	21
2.1.7 Fonte de corrente contínua bipolar estabilizada de 200 V 6 A	22
2.1.8 Capacitores	22
2.1.9 Década de capacitores – 1419-K-Mica GenRad	23
2.2 Instrumentação.....	23
2.2.1 Analisador de potência trifásico – Power Sight PS3000	23
2.2.2 Sensores de corrente tipo alicate – HA5 0,02 – 5 A	24
2.2.3 Analisador digital de torque e rotação Ono Sokki TS-3600 A	24
2.2.4 Osciloscópio digital Agilent DSO3202 A	25
2.2.5 Termômetro digital infravermelho – Raytek Minitemp	25
2.2.6 Laptop DELL Inspiron1545	26
2.2.7 Conversor serial para USB	26
2.2.8 Capacímetro digital	27
2.3 Aplicativos.....	27
2.3.1 PowerSight manager version 2.1G	27
2.3.2 Agilent 3000 series scope connect software V. 1.1.18	27
2.4 Verificação da Instrumentação	27
2.4.1 Verificação do analisador de potência	27
2.4.2 Verificação do torquímetro	28
2.4.3 Verificação do tacômetro	29
2.4.4 Verificação do capacímetro	29
CAPÍTULO 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	30
3.1 Fator de desequilíbrio de um sistema trifásico	30
3.1.1 Causas do desequilíbrio em um sistema trifásico	30
3.1.2 Efeitos do desequilíbrio	31
3.2 Métodos de cálculo do desequilíbrio	32
3.2.1 Método 1: Componentes simétricas	32
3.2.2 Método 2: CIGRÉ	33
3.2.3 Método 3: NEMA	34
3.2.4 Método 4: IEEE	34
3.3 Fator de desequilíbrio de motor trifásico alimentado monofasicamente.....	35
3.4 Operação equilibrada do motor trifásico alimentado monofasicamente	38
3.5 Determinação do circuito equivalente	39
3.5.1 Ensaio de rotor bloqueado	40
3.5.2 Ensaio em vazio	42
CAPÍTULO 4 ENSAIO DO MOTOR EM ALIMENTAÇÃO TRIFÁSICA	44
4.1 Ensaio de rotor bloqueado do motor trifásico	44
4.2 Ensaio em vazio do motor trifásico	48
4.3 Ensaio de sequência negativa	51

4.4	Ensaio sob carga do motor com alimentação trifásica	55
4.5	Ensaio sob carga mínima do motor nas condições normais	58
4.6	Ensaio sob carga nominal do motor nas condições normais	58
4.7	Determinação do circuito equivalente	59
4.7.1	Parâmetros série obtidos pelo ensaio de rotor bloqueado	60
4.7.2	Parâmetros mútuos pelo ensaio a vazio	61
CAPÍTULO 5 ENSAIO EM ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA COM CAPACITOR		66
5.1	Escolha do capacitor para partida do motor	66
5.1.1	Ensaio de rotor bloqueado na corrente nominal	66
5.1.2	Ensaio de rotor bloqueado na tensão nominal	67
5.2	Escolha do capacitor para operação do motor em carga	69
5.2.1	Escolha do capacitor para operação do motor em carga mínima	69
5.2.2	Escolha do capacitor para operação do motor em carga nominal	71
5.3	Ensaio sob carga do motor com capacitor	73
5.3.1	Motor com capacitor de 40,7 μ F	73
5.3.2	Motor com capacitor de 30 μ F	74
5.3.3	Motor com capacitor de 20 μ F	75
5.3.4	Motor com capacitor de 17 μ F	76
5.3.5	Motor com capacitor de 15 μ F	77
CAPÍTULO 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS		78
6.1	Comportamento do motor sob carga em rede trifásica	78
6.2	Comportamento do motor sob carga em rede monofásica com capacitor	79
6.2.1	Análise pelo torque de partida do motor	79
6.2.2	Análise pela partida do motor em carga mínima	80
6.2.3	Análise pela partida do motor em carga nominal	82
6.2.4	Análise pelo ensaio de carga com capacitor	83
6.2.5	Análise pelo circuito equivalente	92
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		97
ANEXO - PROGRAMAÇÃO AUXILIAR EM VBA		98

TABELAS

	Página
Tabela 1 – Dados de placa e dimensionais do motor	17
Tabela 2 – Resultados dos ensaios em motor bloqueado	44
Tabela 3 – Resultados dos ensaios em vazio	48
Tabela 4 – Resultados dos ensaios de sequência negativa	51
Tabela 5 – Resultados dos ensaios do motor sob carga	55
Tabela 6 – Parâmetros série do circuito equivalente	60
Tabela 7 – Parâmetros mútuos do circuito equivalente	62
Tabela 8 – Parâmetros do circuito equivalente em relação a temperatura de operação	64
Tabela 9 – Ensaio de carga teórico	64
Tabela 10 – Escolha do melhor capacitor na partida em tensão reduzida	67
Tabela 11 – Escolha do melhor capacitor na partida em tensão nominal	68
Tabela 12 – Desbalanço entre correntes em carga mínima	70
Tabela 13 – Desbalanço entre correntes em carga nominal	71
Tabela 14 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 40,7 μF	73
Tabela 15 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 40,7 μF	73
Tabela 16 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 30 μF	74
Tabela 17 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 30 μF	74
Tabela 18 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 20 μF	75
Tabela 19 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 20 μF	75
Tabela 20 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 17 μF	76
Tabela 21 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 17 μF	76
Tabela 22 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 15 μF	77
Tabela 23 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 15 μF	77
Tabela 24 – Torques e tempos para partida em carga mínima	81
Tabela 25 – Torques e tempos para partida do motor em carga nominal	83

FIGURAS

	Página
Figura 1 – Esquema do sistema de ensaio.....	15
Figura 2 – Conjunto motor cc – torquímetro - motor trifásico.....	16
Figura 3 – Sistema completo de ensaio.....	16
Figura 4 – Dados elétricos do motor.....	17
Figura 5 – Curvas de rendimento, fator de potência, escorregamento e corrente pela potência fornecida.....	18
Figura 6 – Motor trifásico ensaiado.....	18
Figura 7 – Rotor e estator do motor trifásico ensaiado.....	19
Figura 8 – Estator do motor trifásico ensaiado.....	19
Figura 9 – Contactora eletromagnética.....	20
Figura 10 – Variador de tensão trifásico 0-240 V 22 A.....	20
Figura 11 – Junta torquimétrica Ono Sokki.....	21
Figura 12 – Motor de corrente contínua.....	21
Figura 13 – Fonte de corrente contínua 100 V 10 A.....	22
Figura 14 – Fonte de corrente contínua 200 V 6 A.....	22
Figura 15 – Capacitores utilizados nos ensaios.....	23
Figura 16 – Par de décadas de capacitores.....	23
Figura 17 – Analisador de potência trifásico.....	24
Figura 18 – Sensor de corrente.....	24
Figura 19 – Analisador digital de torque e rotação.....	25
Figura 20 – Osciloscópio Digital.....	25
Figura 21 – Termômetro digital.....	26
Figura 22 – LapTop Dell.....	26
Figura 23 – Conversor Serial para USB.....	26
Figura 24 – Capacímetro digital.....	27
Figura 25 – Verificação das tensões e potência de três lâmpadas.....	28
Figura 26 – Verificação das correntes nos alicates.....	28
Figura 27 – Esquema de verificação do torquímetro.....	29
Figura 28 – Componentes de sequência.....	32
Figura 29 – Esquema steinmetz de ligação.....	35
Figura 30 – Circuito equivalente do motor trifásico para um escorregamento s qualquer.....	39
Figura 31 – Circuito equivalente para rotor bloqueado.....	41
Figura 32 – Circuito equivalente para o ensaio em vazio.....	42
Figura 33 – Tensões e correntes no ensaio em curto na corrente nominal.....	45
Figura 34 – Tensões no ensaio em curto na corrente nominal.....	45
Figura 35 – Correntes no ensaio em curto na corrente nominal.....	46
Figura 36 – Diagrama fasorial no ensaio em curto na corrente nominal.....	46
Figura 37 – Harmônicos de tensão no ensaio em curto na corrente nominal.....	47
Figura 38 – Harmônicos de corrente no ensaio em curto na corrente nominal.....	47
Figura 39 – Tensões e correntes no ensaio em vazio na tensão nominal.....	48
Figura 40 – Tensões no ensaio em vazio na tensão nominal.....	49
Figura 41 – Correntes no ensaio em vazio na tensão nominal.....	49
Figura 42 – Diagrama fasorial no ensaio em vazio na tensão nominal.....	50
Figura 43 – Harmônicos de tensão no ensaio em vazio na tensão nominal.....	50
Figura 44 – Harmônicos de corrente no ensaio em vazio na tensão nominal.....	51
Figura 45 – Tensões e correntes no ensaio de sequência negativa na corrente nominal.....	52
Figura 46 – Tensões no ensaio de sequência negativa na corrente nominal.....	52
Figura 47 – Correntes no ensaio de sequência negativa na corrente nominal.....	53
Figura 48 – Diagrama fasorial no ensaio de sequência negativa na corrente nominal.....	53
Figura 49 – Harmônicos de tensão no ensaio de sequência negativa na corrente nominal.....	54
Figura 50 – Harmônicos de corrente no ensaio de sequência negativa na corrente nominal.....	54

Figura 51 – Tensões e correntes no ensaio sob carga nominal	55
Figura 52 – Tensões no ensaio sob carga nominal	55
Figura 53 – Correntes no ensaio sob carga nominal	56
Figura 54 – Diagrama fasorial no ensaio sob carga nominal	56
Figura 55 – Harmônicos de tensão no ensaio sob carga nominal.....	57
Figura 56 – Harmônicos de corrente no ensaio sob carga nominal.....	57
Figura 57 – Rotação e torque sob carga mínima	58
Figura 58 – Rotação e torque na partida sob carga nominal	58
Figura 59 – Rotação e torque na aplicação da carga nominal	59
Figura 60 – Circuito equivalente do motor trifásico para um escorregamento s qualquer.....	59
Figura 61 – Circuito equivalente para rotor bloqueado.....	61
Figura 62 – Circuito equivalente para o ensaio em vazio	61
Figura 63 – Estimativa da reatância em relação a corrente	62
Figura 64 – Circuito equivalente do motor trifásico na condição nominal de operação	63
Figura 65 – Curvas de torque e rendimento teóricos e práticos	65
Figura 66 – Esquema steinmetz de ligação	66
Figura 67 – Partida do motor em carga mínima com capacitor de 47,7 μF	68
Figura 68 – Partida do motor em carga mínima com capacitor de 40,7 μF	69
Figura 69 – Partida do motor em carga mínima com capacitor de 17,94 μF	70
Figura 70 – Partida do motor em carga nominal com capacitor de 47,7 μF	72
Figura 71 – Partida do motor em carga nominal com capacitor de 17,94 μF	72
Figura 72 – Rotação e torque na aplicação da carga nominal	73
Figura 73 – Comportamento do motor sob carga em rede trifásica	78
Figura 74 – Desbalanço de correntes com a capacitância para rotor bloqueado na corrente nominal	79
Figura 75 – Desbalanço de correntes com a capacitância para rotor bloqueado na tensão nominal.....	80
Figura 76 – Desbalanço entre correntes com a capacitância sob carga mínima.....	81
Figura 77 – Desbalanço entre correntes com a capacitância sob carga nominal.....	82
Figura 78 – Ensaio de carga com capacitor de 40,7 μF	84
Figura 79 – Ensaio de carga com capacitor de 30 μF	84
Figura 80 – Ensaio de carga com capacitor de 20 μF	84
Figura 81 – Ensaio de carga com capacitor de 17 μF	85
Figura 82 – Ensaio de carga com capacitor de 15 μF	85
Figura 83 – Parâmetros em relação à capacitância.....	86
Figura 84 – Fluxograma para cálculo do capacitor ideal	87
Figura 85 – Capacitor ideal pelo ensaio de 40,7 μF	88
Figura 86 – Capacitor ideal pelo ensaio de 30 μF	89
Figura 87 – Capacitor ideal pelo ensaio de 20 μF	89
Figura 88 – Capacitor ideal pelo ensaio de 17 μF	90
Figura 89 – Capacitor ideal pelo ensaio de 15 μF	90
Figura 90 – Desbalanço de correntes pelo escorregamento	91
Figura 91 – Simulação do motor trifásico sob carga.....	93
Figura 92 – Esquema de simulação computacional do motor	94
Figura 93 – Grau de desbalanço das correntes de fase.....	95
Figura 94 - Determinação do grau de desbalanço das correntes de fase	95

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Muitas vezes, em operações mais simples que requerem menor potência e robustez de um motor, prefere-se a opção de um motor monofásico. Isso se deve em grande parte ao fato de que não é possível operar um motor trifásico alimentando-o com uma fase só. Tal solução traz consigo uma série de inconvenientes, sendo o primeiro deles o preço: um motor de 1cv, 220V, dois pólos, e IP21 (carcaça de chapa, resistente a corpos estranhos maiores que 12mm e pingos d'água na vertical) é 20% mais caro que um equivalente trifásico IP55 (carcaça de ferro fundido, protegido contra qualquer poeira prejudicial e jatos d'água de todas as direções)!

O segundo fator é que, para partir um motor monofásico usa-se um capacitor de partida cujo tempo de descarga não é rápido o suficiente de modo a permitir partidas sucessivas em curto intervalo de tempo. Assim sendo, aplicações que exigem muitas partidas (como máquinas de sorvete expresso, que chegam a exigir 6 partidas por minuto) acabam por danificar o motor monofásico.

A solução encontrada portando vem do uso de conversores elétricos monotrifásicos para acionamento de motores trifásicos em redes monofásicas. As vantagens do uso de motores trifásicos podem ser resumidas nos seguintes tópicos:

- a) para uma mesma potência, o motor trifásico possui menor dimensão, além de ser mais leve e mais barato que o monofásico, proporcionando economia tanto na aquisição, quanto no espaço necessário à sua instalação;
- b) os motores trifásicos são mais robustos que os monofásicos e exigem menor manutenção, permitindo operação mais confiável, principalmente em sistemas automatizados;
- c) os motores trifásicos estão disponíveis em uma faixa de potência mais ampla que os monofásicos, evitando-se, com isso, acoplamento de motores em série para o acionamento de grandes cargas, tornando a instalação mais econômica, compacta e confiável.

Apesar dessas vantagens, o uso desses motores diretamente em redes trifásicas apresenta limitações, pelo maior custo de implantação. Com isso, o uso de conversores de fase pode associar as vantagens econômicas das linhas monofásicas com as dos motores trifásicos.

Países desenvolvidos de dimensões continentais, como Estados Unidos, Canadá, Rússia e Austrália, empregam amplamente esses equipamentos na agropecuária há mais de 40 anos com bons resultados técnicos e econômicos. No Brasil, embora as pesquisas para o desenvolvimento e aperfeiçoamento desses equipamentos sejam realizadas desde a década de 1970, apresentando soluções pioneiras em nível mundial, seu uso é bastante restrito, consequência do desconhecimento por parte dos técnicos e produtores e da existência de poucos fabricantes, os quais são de pequeno porte e, muitas vezes, produzem aparelhos somente com finalidades industriais. Entretanto, algumas concessionárias de energia elétrica já preveem seu uso e fornecem orientações gerais para isso (ENERSUL, 2001)^[4].

Os conversores de fase podem ser classificados basicamente em dois grandes grupos, a saber: estáticos (não possuem partes móveis) e rotativos (possuem algum tipo de motor como parte integrante do equipamento para a geração da terceira fase).

Os conversores estáticos, por sua vez, podem ser dos tipos:

- a) simples a capacitor;
- b) capacitor-transformador
- c) com transformador de distribuição abaixador;
- d) eletrônico.

Atualmente no Brasil os tipos mais comuns de conversores de fase empregados na irrigação são o estático a capacitor-transformador e o rotativo com motor trifásico. Pelo custo reduzido e pela boa qualidade de conversão, os conversores eletrônicos estão sendo cada vez mais utilizados industrialmente, apresentando grande potencial de uso na agricultura irrigada.

Os conversores de fase são uma opção economicamente viável para o acionamento de grandes cargas motrizes em redes monofásicas longas, como acontece geralmente em sistemas de irrigação. De forma geral, quando a distância do transformador ao motor é superior a 300 m, o custo da rede monofásica com conversor de fase para o acionamento de motores trifásicos é inferior ao da rede trifásica de potência equivalente.

1.2 *Objetivos*

Este trabalho é baseado na verificação experimental do comportamento de um motor elétrico de indução trifásico, tipo rotor em gaiola, ligado a um conversor de fase do tipo estático, ou seja, operando monofasicamente com uma das fases ligadas a um capacitor simples.

Os objetivos a serem cumpridos são listados a seguir:

- Através de ensaios experimentais, levantar as características dinâmicas de um pequeno motor de indução trifásico;
- Verificar experimentalmente, em uma série de ensaios com diferentes valores de capacitores, aquele que proporciona melhor operação do motor em uma rede monofásica;
- Verificar teoricamente se o capacitor encontrado experimentalmente pode ser encontrado pela análise de componentes simétricas, utilizando-se como dados de entrada os resultados experimentais de um único ensaio do motor operando monofasicamente por um capacitor qualquer;
- Comparar o comportamento do motor, obtido experimentalmente, com o teórico, obtido através dos parâmetros do circuito equivalente, tanto para operação trifásica normal, quanto em monofásico com o uso do capacitor.

A idéia principal a ser analisada é a avaliação do grau de desbalanço das tensões e correntes de alimentação do motor quando conectado a diferentes capacitores, em distintos escorregamentos impostos pela carga no eixo do mesmo.

Trata-se de uma investigação experimental de laboratório visando o estudo da aplicabilidade de antigas idéias já propostas por Carl August Rudolph Steinmetz (1865-1923), onde é possível descobrir que valor de capacitância irá balancear o sistema e em que situação isso ocorre.

Para os estudos foi utilizado um pequeno motor trifásico de tensão de 220 V e potência de $\frac{1}{4}$ de cv (185 W), comercialmente disponível, de fabricação WEG.

CAPÍTULO 2 SISTEMA SOB ENSAIO

O sistema de ensaio está esquematizado na **Figura 1**, onde o motor trifásico está acoplado a um motor de corrente contínua através de um torquímetro. A alimentação do motor é feita através de um variac trifásico, onde há também um analisador de potência trifásico para registro dos módulos e ângulos de fase das tensões e correntes, assim como suas formas de onda, diagramas fasoriais e harmônicos.

O torquímetro usado fornece o torque, a rotação e a potência mecânica gerada pelo sistema, onde o motor de corrente contínua atua como carga, sendo acionado por uma fonte de corrente contínua.

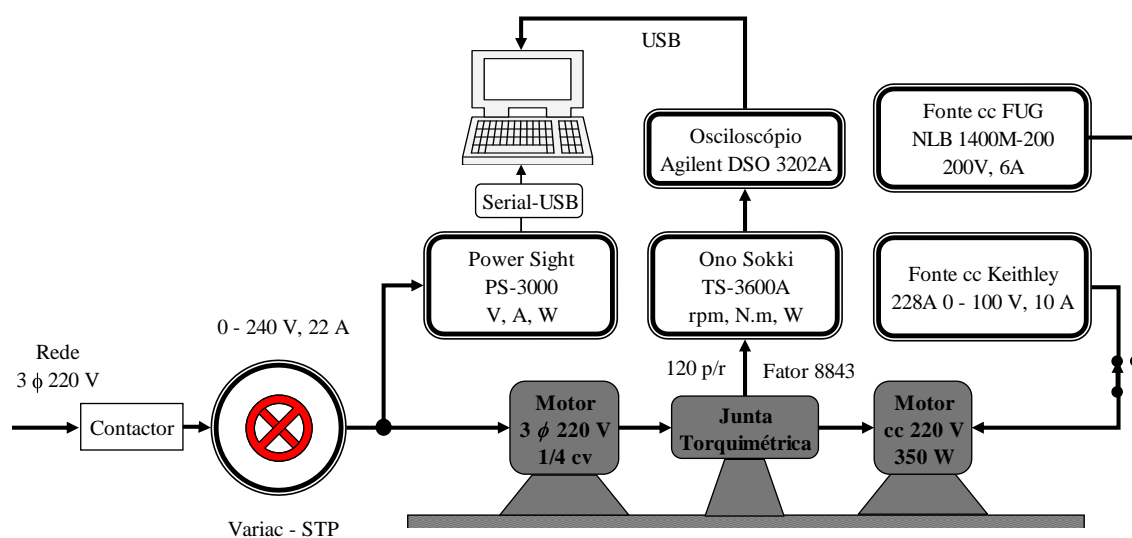


Figura 1 – Esquema do sistema de ensaio

A bancada de ensaio é mostrada na **Figura 2**, onde o motor trifásico está acoplado ao motor de corrente contínua através de uma junta torquimétrica. Os ensaios foram realizados no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, situada na Ilha do Fundão, RJ.

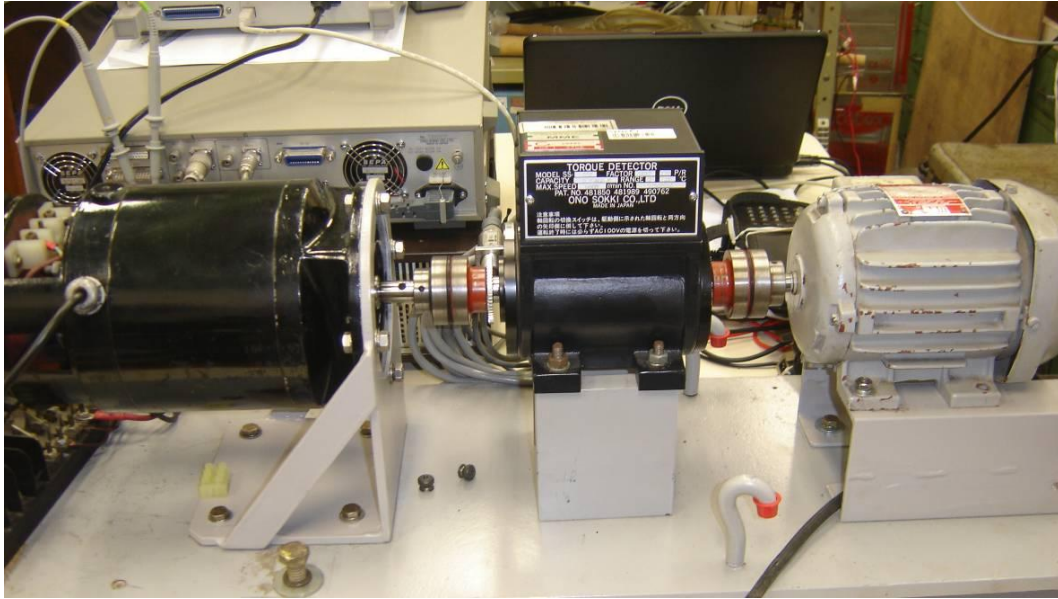


Figura 2 – Conjunto motor cc – torquímetro - motor trifásico

O conjunto completo do sistema de ensaio é mostrado na **Figura 3**.

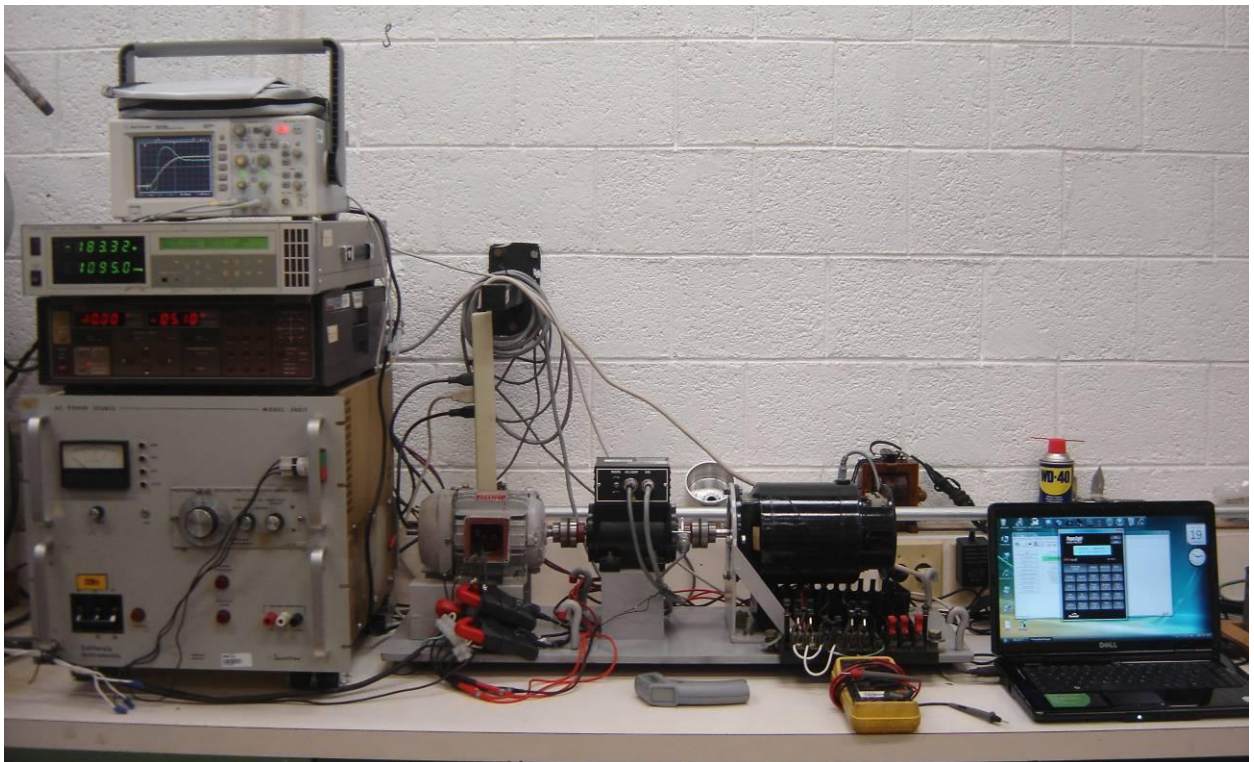


Figura 3 – Sistema completo de ensaio

2.1 Equipamentos

2.1.1 Amostra ensaiada

Motor de indução trifásico, de fabricação WEG, modelo 71-985 de 220 V $\frac{1}{4}$ cv, conforme **Tabela 1** e ilustração da **Figura 6**.

Tabela 1 – Dados de placa e dimensionais do motor

Potência Nominal	¼ cv = 185 W	Rotação Nominal	1090
Tensão Nominal	220 V - Δ	Corrente Nominal	1,4 A - Δ
Diâmetro do Rotor	62 mm	Diâmetro do Estator	63 mm
Ranuras do Rotor	56	Ranuras do Estator	24

As características elétricas, assim como as curvas de rendimento, fator de potência, escorregamento e corrente pela potência fornecida foram retiradas do site da WEG^[5], **Figura 4** e **Figura 5**.

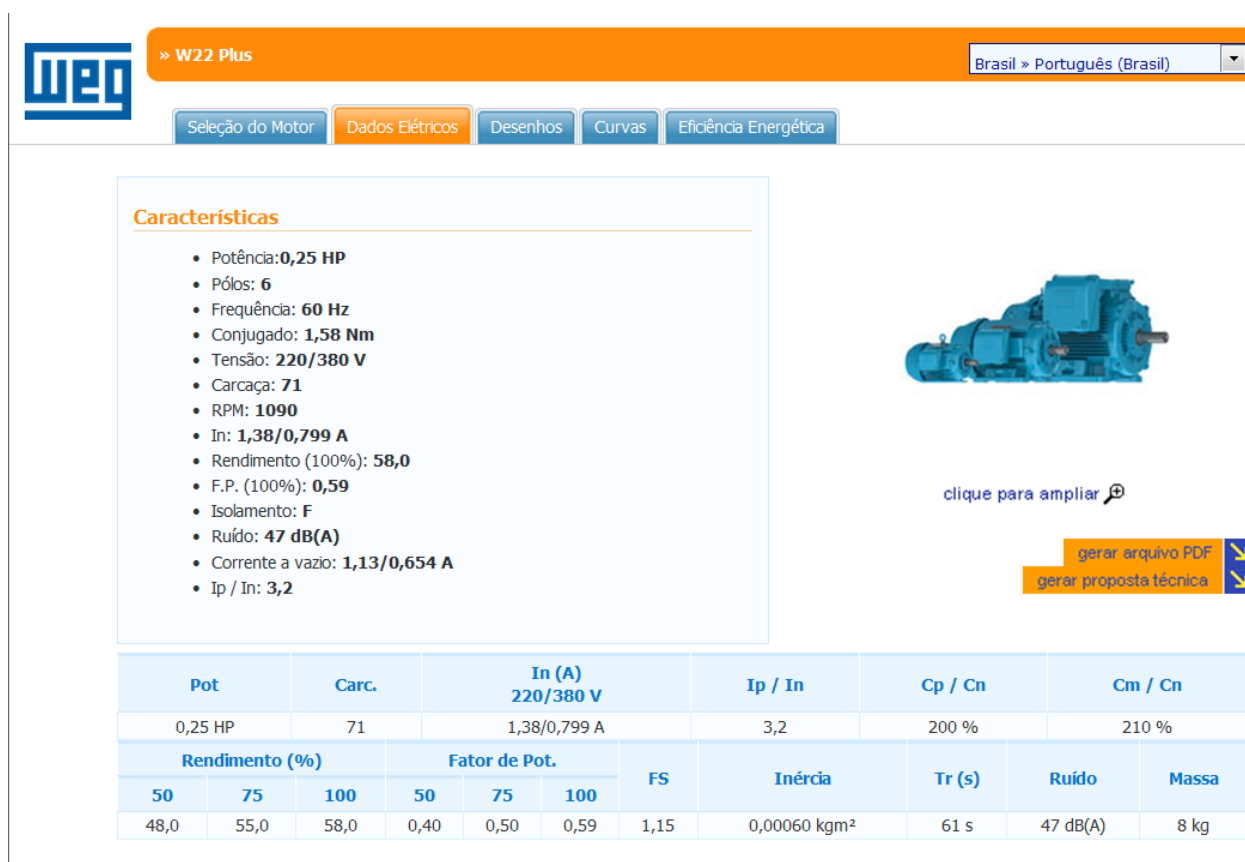


Figura 4 – Dados elétricos do motor

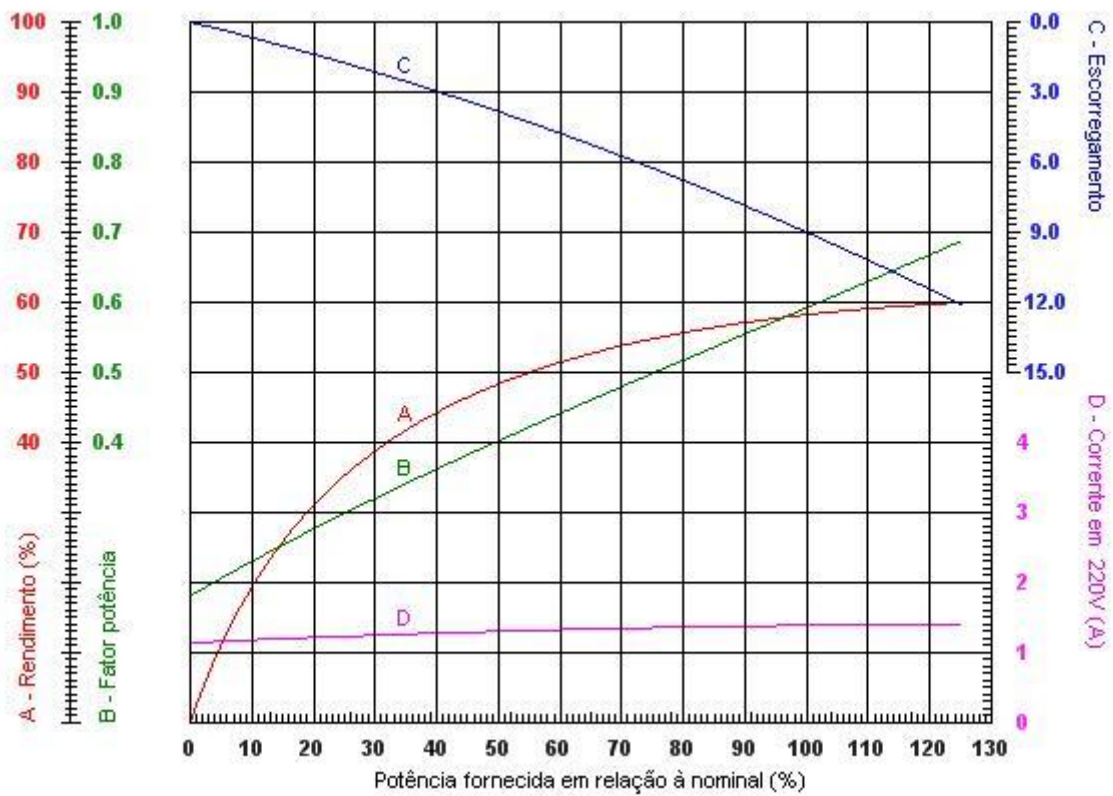


Figura 5 – Curvas de rendimento, fator de potência, escorregamento e corrente pela potência fornecida



Motor trifásico WEG



Dados de placa

Figura 6 – Motor trifásico ensaiado

A **Figura 7**, mostra o motor de indução aberto e com o rotor extraído.

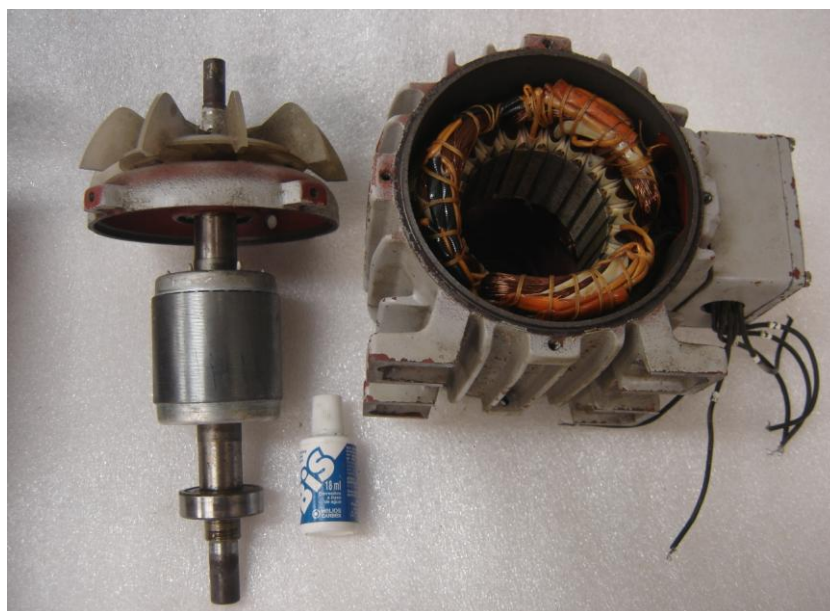


Figura 7 – Rotor e estator do motor trifásico ensaiado

A **Figura 8**, mostra o bonina do estator do motor de indução.

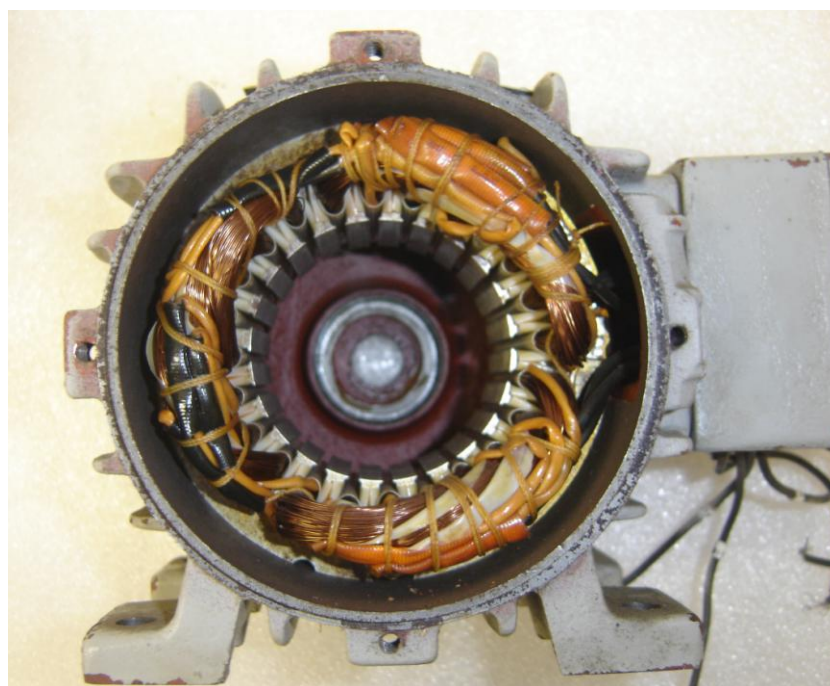


Figura 8 – Estator do motor trifásico ensaiado

2.1.2 Contactor eletromagnético 127 V

A **Figura 9**, mostra o contactor eletromagnético.

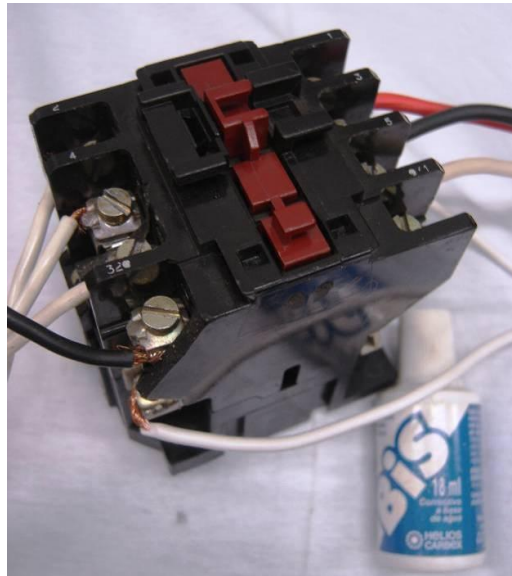


Figura 9 – Contactor eletromagnético

2.1.3 Variador de tensão trifásico 0-240 V 22 A;

A **Figura 10**, mostra o variac com seus dados de placa e suas ligações.



Variac trifásico



Dados de placa

Figura 10 – Variador de tensão trifásico 0-240 V 22 A

2.1.4 Junta torquimétrica Ono Sokki 2Nm, alimentação 100 V

A **Figura 11**, mostra a junto torquimétrica utilizado para medição do torque e velocidade.



Figura 11 – Junta torquimétrica Ono Sokki

2.1.5 Motor de corrente contínua – CEN – 350 W

A **Figura 12** mostra o motor de corrente contínua utilizado como carga de frenagem ao motor de indução, ou como elevação da velocidade para síncrona.

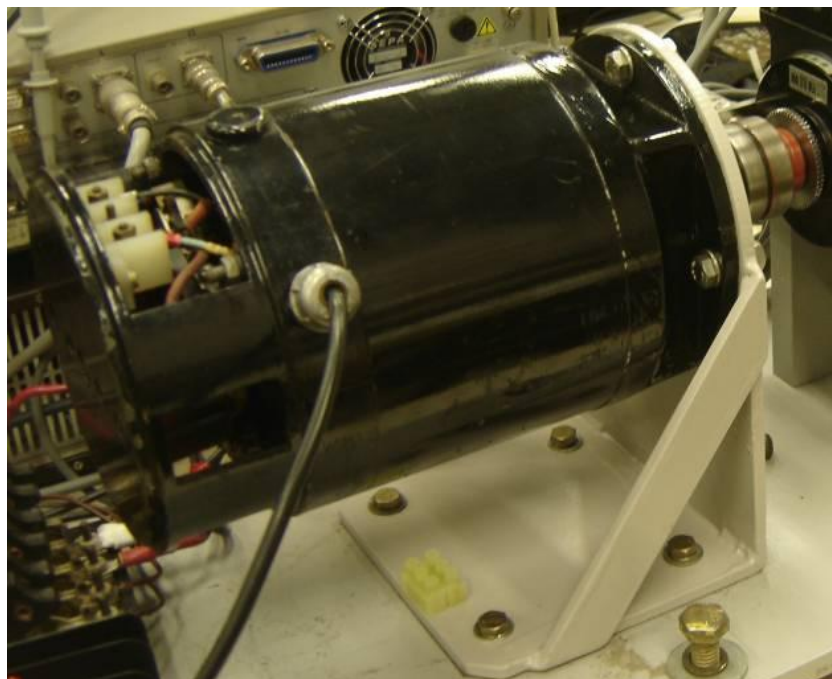


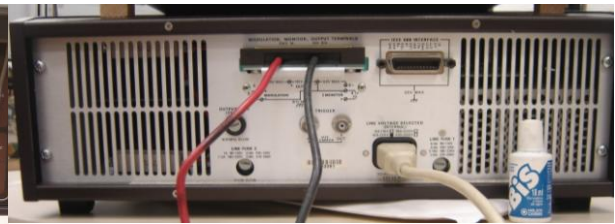
Figura 12 – Motor de corrente contínua

2.1.6 Fonte de corrente contínua bipolar estabilizada de 100 V 10 A

O motor de corrente contínua mostrado na **Figura 12** foi acionado por uma fonte de corrente contínua bipolar, mostrado na **Figura 13** e na **Figura 14**.



Vista Frontal



Vista Traseira

Figura 13 – Fonte de corrente contínua 100 V 10 A

2.1.7 Fonte de corrente contínua bipolar estabilizada de 200 V 6 A

Em algumas situações foi necessário a utilização de uma fonte de maior potência para que o motor de corrente contínua gerasse um maior torque resistente.



Fonte de Corrente



Dados de placa

Figura 14 – Fonte de corrente contínua 200 V 6 A

2.1.8 Capacitores

Os capacitores utilizados foram em filme de poliéster com impregnação a óleo, para tensões iguais ou superiores a 250 V, na frequência de 60 Hz. O conjunto de capacitores em associação série e paralelo permite configurações na faixa de 4 a 70 μF , conforme mostrado na [Figura 15](#).

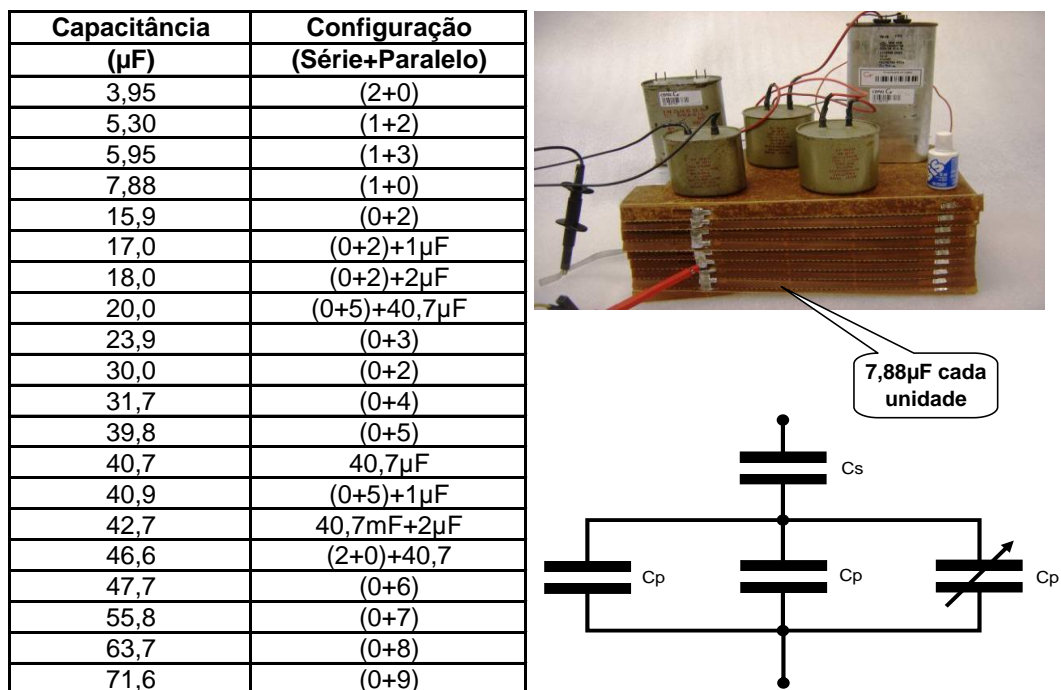


Figura 15 – Capacitores utilizados nos ensaios

2.1.9 Década de capacitores – 1419-K-Mica GenRad

Para o ajuste fino da capacitância, foi utilizado um par de décadas capacitivas, conforme mostrado na [Figura 16](#).



Figura 16 – Par de décadas de capacitores

2.2 Instrumentação

2.2.1 Analisador de potência trifásico – Power Sight PS3000

Todas as medições de tensão, correntes e potência elétrica, e parâmetros derivados, foram obtidos através do analisador de potência PS3000 mostrado na [Figura 17](#). O mesmo instrumento foi utilizado para medição de harmônicos, ângulos de fase, desbalanços e digitalização dos sinais.



Figura 17 – Analisador de potência trifásico

2.2.2 Sensores de corrente tipo alicate – HA5 0,02 – 5 A

O único acessório utilizado pelo analisador de potência PS3000 foi o sensor de corrente tipo alicate para 5 A, mostrado na [Figura 18](#).



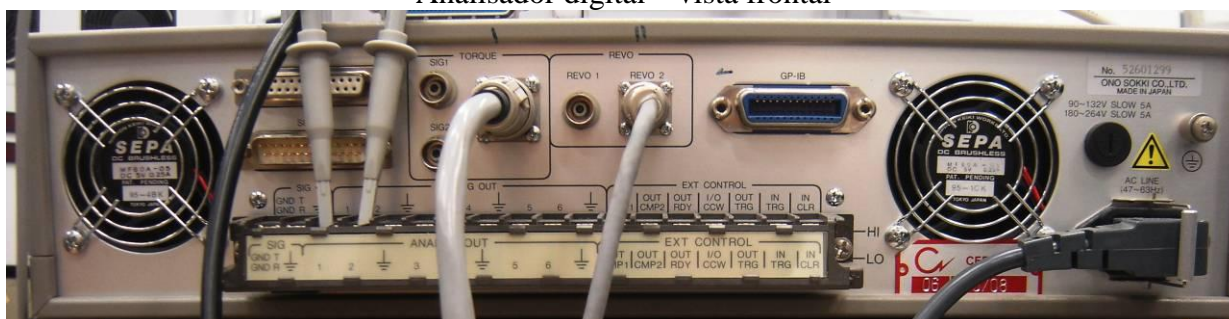
Figura 18 – Sensor de corrente

2.2.3 Analisador digital de torque e rotação Ono Sokki TS-3600 A

Todas as medições de parâmetros mecânicos, estáticos e dinâmicos de torque e rotação, foram obtidos pelo instrumento Ono Sokki mostrado na [Figura 19](#).



Analizador digital – vista frontal



Analizador digital – vista traseira

Figura 19 – Analizador digital de torque e rotação

2.2.4 Osciloscópio digital Agilent DSO3202 A

Para medições dinâmicas de torque e rotação, foi utilizado o osciloscópio mostrado na [Figura 20](#), acoplado ao analisador Ono Sokki já descrito.



Osciloscópio



Dados de placa

Figura 20 – Osciloscópio Digital

2.2.5 Termômetro digital infravermelho – Raytek Minitemp

As temperaturas obtidas do motor foram medidas através do termômetro digital infravermelho, sem contato, mostrado na [Figura 21](#).



Figura 21 – Termômetro digital

2.2.6 LapTop DELL Inspiron1545

O Laptop mostrado na **Figura 22** foi utilizado no controle e aquisição de dados tanto do analisador de potência PS3000, quanto do osciloscópio.

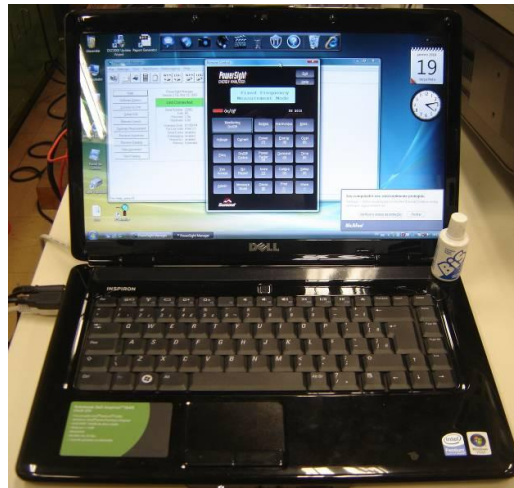


Figura 22 – LapTop Dell

2.2.7 Conversor serial para USB

O conversor mostrado na **Figura 23** foi utilizado para interface entre o Laptop e o analisador de potência PS3000.



Figura 23 – Conversor Serial para USB

2.2.8 Capacímetro digital

Para medição das capacitâncias foi utilizado um capacímetro digital portátil, mostrado na **Figura 24**.



Figura 24 – Capacímetro digital

2.3 Aplicativos

2.3.1 PowerSight manager version 2.1G

Aplicativo utilizado para obtenção das formas de ondas das tensões e correntes, assim como seus diagramas fasoriais e harmônicos. Também fornece os valores de desbalanço, ângulos entre fases e potências.

2.3.2 Agilent 3000 series scope connect software V. 1.1.18

Aplicativo de interface entre o osciloscópio e o Laptop, utilizado para captura digital da tela do osciloscópio.

2.4 Verificação da Instrumentação

2.4.1 Verificação do analisador de potência

A verificação feita no aparelho Power Sight foi realizada com dois tipos de ensaios. O primeiro foi com a medição da potência de três lâmpadas de 100 W-220 V, conforme mostrado na **Figura 17** e o segundo com a medição de uma única corrente através dos três alicates de corrente.

Verificou-se que para as lâmpadas, a potência consumida foi próxima de 300W, como esperado, assim como seu fator de potência próximo de 1. Para o ensaio das correntes, observou-se a mesma medição nos três alicates.

A forma de onda das tensões é mostrada na **Figura 25** e das correntes na **Figura 26**.

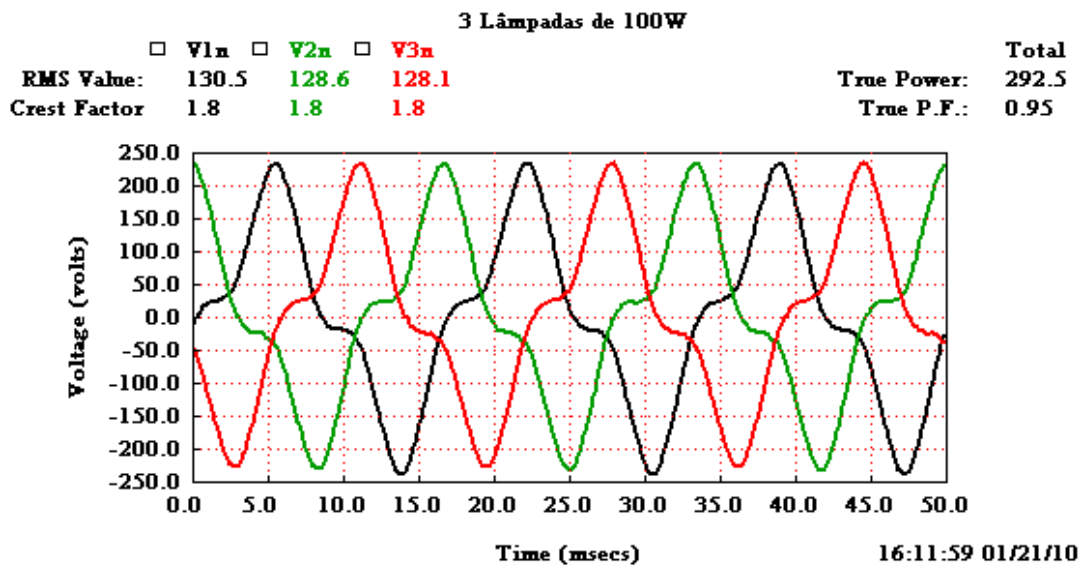


Figura 25 – Verificação das tensões e potência de três lâmpadas

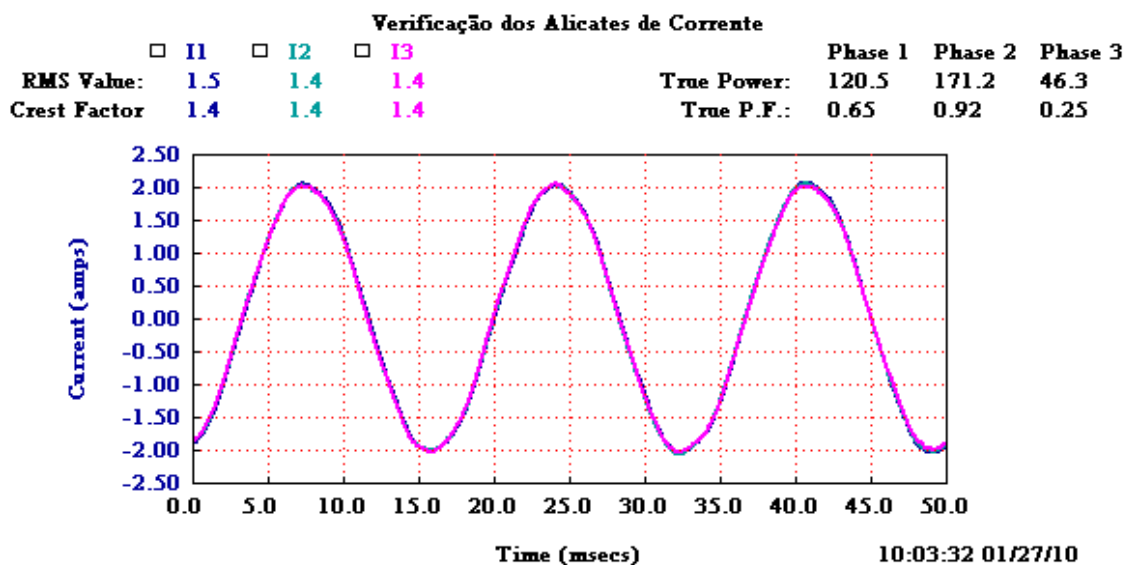


Figura 26 – Verificação das correntes nos alicates

2.4.2 Verificação do torquímetro

Para a verificação do torquímetro foi utilizado um braço de alavanca com contrapeso e um peso em sua extremidade para gerar um torque conhecido, conforme mostrado na [Figura 27](#). A distância do braço até o centro do peso foi de 123 mm e a massa do cilindro metálico foi de 1304,2g (12,79N). O torque esperado seria de 1,57 Nm, enquanto a leitura obtida no torquímetro foi de 1,560 Nm. Ou seja, o instrumento está operando perfeitamente. A [Figura 19](#) ilustra o instrumento utilizado para leitura do torque.

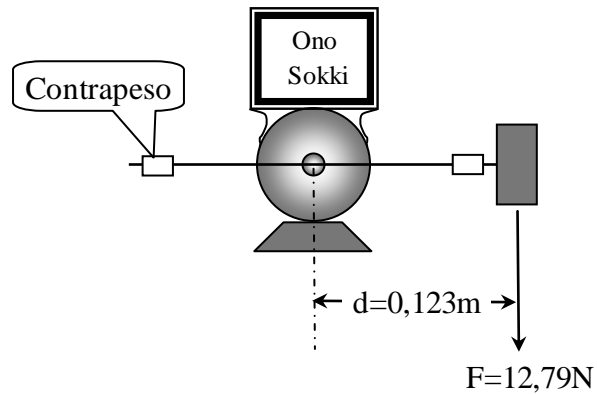


Figura 27 – Esquema de verificação do torquímetro

2.4.3 Verificação do tacômetro

O tacômetro presente junto ao torquímetro foi aferido contra dois outros instrumentos digitais portáteis, de fabricação J.G.Biddle-USA. A [Figura 19](#) ilustra o instrumento utilizado para leitura da rotação.

2.4.4 Verificação do capacímetro

A indicação do capacímetro foi confrontada com capacitores padrões, de referência, mostrados na [Figura 16](#).

CAPÍTULO 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 *Fator de desequilíbrio de um sistema trifásico*

Neste item são apresentadas as causas, os efeitos e os métodos de cálculo do desequilíbrio nas tensões e correntes de um sistema elétrico trifásico.

3.1.1 Causas do desequilíbrio em um sistema trifásico

As causas de desequilíbrio podem ser citadas conforme os seguintes aspectos:

- Distribuição irregular de cargas monofásicas entre fases;
- Linhas de distribuição extensas, principalmente na área de distribuição rural;
- Numerosos conjuntos de usuários urbanos, com extenso volume de cargas monofásicas;
- Impedâncias assimétricas de transformadores e de linhas de transmissão;
- Transposição incompleta de linhas de transmissão;
- Banco de capacitores deteriorado e (ou) com fusíveis de proteção rompidos;
- Motores elétricos em impedâncias desequilibradas;
- Níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistema elétrico; e
- Presença de interrupções, afundamentos, subtensões, sobretensões, transitórios elétricos, etc.

De fato, as principais fontes de desequilíbrio são as cargas monofásicas e bifásicas, uma vez que as correntes absorvidas nas três fases não são simétricas em módulo nem exibem defasagem angular de 120° . Contudo, devido às suas características elétricas não uniformes, as linhas de transmissão inadequadamente transpostas também caracterizam-se como elementos que geram desequilíbrio (ANEEL)^[6].

3.1.2 Efeitos do desequilíbrio

Em relação às máquinas elétricas seus efeitos estabelecem-se como nocivos, tendo em vista que um pequeno desequilíbrio nas tensões de alimentação resulta num elevado nível de desequilíbrio nas correntes absorvidas e, conseqüentemente, motiva o sobreaquecimento.

Os mais comuns efeitos presentes em equipamentos do sistema elétrico submetido a desequilíbrio de tensão (ANEEL)^[6] são:

- Surgimento de correntes de sequência negativa: tratam-se dos principais causadores de conjugados amortecedores e sobreaquecimento adicional nas máquinas rotativas em corrente alternada (CA) síncronas e assíncrona;
- Manifestação de harmônicos não característicos devido a disparos desiguais nas válvulas retificadoras controladoras de equipamentos e cargas;
- Funcionamento inadequado, sobreaquecimento e falhas dos dispositivos de proteção com redução da vida útil;
- Sobreaquecimento nos condutores acarretando uma maior solitação do isolante. Implica na diminuição da vida útil e no aumento de perdas.

3.2 Métodos de cálculo do desequilíbrio

3.2.1 Método 1: Componentes simétricas

Um sistema trifásico na sequência abc desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados. Para isso é utilizada a transformação em componentes simétricas, obtendo três sequências: positiva, negativa e zero. Essa transformação pode ser aplicada tanto para tensões quanto para correntes.

A **Figura 28** esquematiza as três sequências para as correntes de um sistema trifásico desequilibrado.

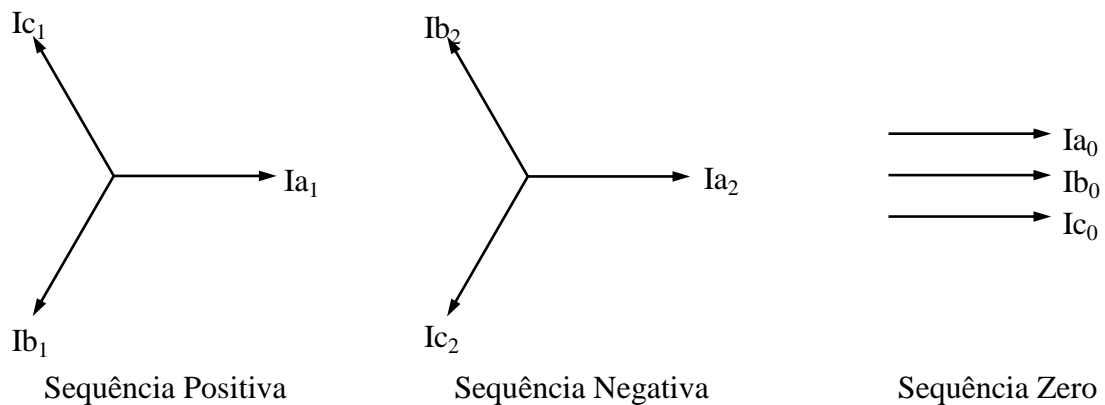


Figura 28 – Componentes de sequência

Na sequência positiva os fasores apresentam o mesmo módulo, estão defasados de 120° entre si e se sucedem na sequência **abc**, com velocidade angular ω .

Na sequência negativa os fasores apresentam o mesmo módulo, estão defasados de 120° entre si e se sucedem na sequência **acb**, com velocidade angular ω .

Na sequência zero os fasores são iguais em módulo e ângulo nas fases a, b e c, com velocidade ω .

As componentes simétricas são definidas matematicamente como:

$$I^+ = \frac{1}{3}(I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c) \quad (1)$$

$$I^- = \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c) \quad (2)$$

$$I^0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (3)$$

onde $\alpha = 1\angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$, ou seja, multiplicar um fasor por α corresponde a um giro de 120° .

De forma similar, os valores de fase das correntes, em termos das componentes simétricas, são dados matematicamente por:

$$I_a = (I^0 + I^+ + I^-) \quad (4)$$

$$I_b = (I^0 + \alpha^2 I^+ + \alpha I^-) \quad (5)$$

$$I_c = (I^0 + \alpha I^+ + \alpha^2 I^-) \quad (6)$$

Para um sistema equilibrado, somente a componente de sequência positiva é presente, caso contrário percebe-se o aparecimento das componentes de sequência negativa e zero. A componente de sequência zero só aparecerá em sistemas trifásicos a quatro fios, em que a soma das correntes I_a , I_b e I_c podem ser diferentes de zero.

O fator de desequilíbrio de um sistema, como definido pela ANEEL^[6], é caracterizado percentualmente pela relação entre a componente de sequência negativa e a componente de sequência positiva.

$$FD\% = \frac{Seq.Negativa}{Seq.Positiva} \quad (7)$$

Segundo a ANEEL^[6], dentre os métodos de quantificação, este é o que melhor representa o grau de desequilíbrio devido à abordagem simultânea das amplitudes e dos ângulos das tensões e correntes. Ademais, a presença da componente de sequência negativa esta intimamente ligada aos efeitos de mau funcionamento e interferências em diversos equipamentos conectados ao sistema.

3.2.2 Método 2: CIGRÉ

Recomendado pelo *International Council on Large Electric Systems* (CIGRÉ)^[8], este procedimento emprega uma expressão para o fator de desequilíbrio com base em uma grandeza adimensional que correlaciona as tensões de linha (corrente de linha) (ANEEL)^[6], conforme apresentado na equação (8).

$$D\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \quad (8)$$

Onde,

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (9)$$

Sendo:

V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} as tensões trifásicas.

Para se encontrar o desequilíbrio nas correntes basta usar os módulos das correntes de linha I_a , I_b e I_c .

3.2.3 Método 3: NEMA

Uma outra forma de definir o desequilíbrio, definido pela norma NEMA-MG-14.34^[8], é pela relação entre o máximo desvio das tensões de linha (correntes de linha) em relação ao valor médio dos módulos, expresso em percentual.

$$D\% = \frac{\text{Desvio Máximo}}{\text{Valor Médio}} \times 100 \quad (10)$$

3.2.4 Método 4: IEEE

Para a apreciação do nível do desequilíbrio de um sistema, o IEEE^[9] recomenda a relação expressa pela maior diferença entre as tensões de linhas (correntes de linha) medidas e o somatório das mesmas, conforme apresentado na equação (11).

$$D\% = \frac{3(V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}})}{|V_{ab}| + |V_{bc}| + |V_{ca}|} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

$V_{\text{máx}}$ é o maior valor entre os módulos das tensões trifásicas

$V_{\text{mín}}$ é o menor valor entre os módulos das tensões trifásicas

V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} são as tensões trifásicas

3.3 Fator de desequilíbrio de motor trifásico alimentado monofasicamente

A **Figura 29**, mostra o esquema de ligação Steinmetz, na qual é possível reduzir o grau de desequilíbrio de um motor trifásico alimentado monofasicamente. A impedância capacitiva $Z_{cap} = -j X_{cap}$ está em paralelo com o enrolamento da fase C, conectado entre os terminais A e C.

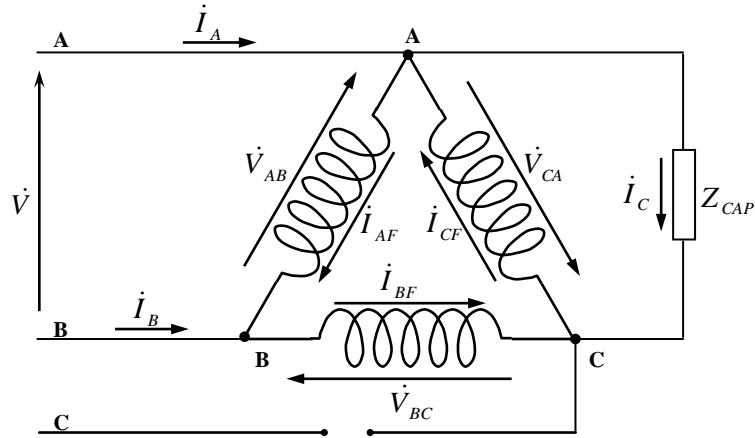


Figura 29 – Esquema steinmetz de ligação

As seguintes relações de tensões e correntes são assim escritas:

$$\dot{V} = \dot{V}_{AB} \quad (12)$$

$$0 = \dot{V}_{AB} + \dot{V}_{BC} + \dot{V}_{CA} \quad (13)$$

$$\dot{V}_{CA} = -\dot{I}_C \cdot Z_{CAP} \quad (14)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CF} - \dot{I}_{BF} \quad (15)$$

As relações das tensões de fase e suas componentes de sequência são definidas:

$$\dot{V}_{AB} = (\dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2) \quad (16) \quad \dot{V}_0 = \frac{1}{3}(\dot{V}_{AB} + \dot{V}_{BC} + \dot{V}_{CA}) \quad (17)$$

$$\dot{V}_{BC} = (\dot{V}_0 + \alpha^2 \dot{V}_1 + \alpha \dot{V}_2) \quad (18) \quad \dot{V}_1 = \frac{1}{3}(\dot{V}_{AB} + \alpha \dot{V}_{BC} + \alpha^2 \dot{V}_{CA}) \quad (19)$$

$$\dot{V}_{CA} = (\dot{V}_0 + \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2) \quad (20) \quad \dot{V}_2 = \frac{1}{3}(\dot{V}_{AB} + \alpha^2 \dot{V}_{BC} + \alpha \dot{V}_{CA}) \quad (21)$$

As relações das correntes de fase e suas componentes de sequência são definidas:

$$\dot{I}_{AF} = (\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2) \quad (22) \quad \dot{I}_0 = \frac{1}{3}(\dot{I}_{AB} + \dot{I}_{BC} + \dot{I}_{CA}) \quad (23)$$

$$\dot{I}_{BF} = (\dot{I}_0 + \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2) \quad (24) \quad \dot{I}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_{AB} + \alpha \dot{I}_{BC} + \alpha^2 \dot{I}_{CA}) \quad (25)$$

$$\dot{I}_{CF} = (\dot{I}_0 + \alpha \dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2) \quad (26) \quad \dot{I}_2 = \frac{1}{3}(\dot{V}_{AB} + \alpha^2 \dot{V}_{BC} + \alpha \dot{V}_{CA}) \quad (27)$$

Representam-se as impedâncias dos enrolamentos de fase do motor na sequência zero, positiva e negativa por $\dot{Z}_0(s), \dot{Z}_1(s), \dot{Z}_2(s)$, respectivamente podemos escrever:

$$\dot{I}_0 = \dot{V}_0 / Z_0(s) \quad (28)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{V}_1 / Z_1(s) \quad (29)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{V}_2 / Z_2(s) \quad (30)$$

sendo s o escorregamento do rotor em relação ao campo girante na rotação síncrona.

Com as equações (13), (17) e (28), podemos escrever:

$$\dot{V}_0 = 0 \quad (31)$$

$$\dot{I}_0 = 0 \quad (32)$$

Reescrevendo-se (22), (24) e (26) considerando-se (28) ao (31), temos:

$$\dot{I}_{AF} = \left(\frac{\dot{V}_1}{Z_1(s)} + \frac{\dot{V}_2}{Z_2(s)} \right) \quad (33)$$

$$\dot{I}_{BF} = \left(\alpha^2 \frac{\dot{V}_1}{Z_1(s)} + \alpha \frac{\dot{V}_2}{Z_2(s)} \right) \quad (34)$$

$$\dot{I}_{CF} = \left(\alpha \frac{\dot{V}_1}{Z_1(s)} + \alpha^2 \frac{\dot{V}_2}{Z_2(s)} \right) \quad (35)$$

De (14) e (15), temos:

$$\dot{V}_{CA} = (\dot{I}_{BF} - \dot{I}_{CF}) \cdot Z_{CAP} \quad (36)$$

Reescrevendo-se (36) e considerando-se (20), (24), (26) e (31):

$$\dot{V}_{CA} = (\alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2) = (\alpha - \alpha^2) \cdot (\dot{I}_1 - \dot{I}_2) \cdot Z_{CAP} \quad (37)$$

Substituindo-se (29) e (30) em (37), temos:

$$\begin{aligned} \alpha \dot{V}_1 + \alpha^2 \dot{V}_2 &= (\alpha^2 - \alpha) \cdot \left(\frac{\dot{V}_1}{Z_1(s)} - \frac{\dot{V}_2}{Z_2(s)} \right) \cdot Z_{CAP} \\ \left((\alpha^2 - \alpha) \cdot \frac{Z_{CAP}}{Z_1(s)} - \alpha \right) \cdot \dot{V}_1 &= \left((\alpha^2 - \alpha) \cdot \frac{Z_{CAP}}{Z_2(s)} + \alpha^2 \right) \cdot \dot{V}_2 \end{aligned} \quad (38)$$

De (16) e (12) temos:

$$\dot{V}_1 = \dot{V} - \dot{V}_2 \quad (39)$$

Usando-se (39) para expressar a equação (38) em termos de \dot{V} e \dot{V}_2 , pode-se escrever:

$$\dot{V}_2 = \frac{\left((\alpha^2 - \alpha) \cdot \frac{Z_{CAP}}{Z_1(s)} - \alpha \right) \cdot \dot{V}}{(\alpha^2 - \alpha) \cdot \left(Z_{CAP} \cdot \left(\frac{1}{Z_1(s)} + \frac{1}{Z_2(s)} \right) + 1 \right)} \quad (40)$$

Ou

$$\dot{V}_2 = k_2 \cdot \dot{V} \quad (41)$$

Onde

$$\dot{k}_2 = \frac{\left(\frac{Z_{CAP}}{Z_1} - \frac{1}{\sqrt{3}} \angle -150 \right)}{\left(\frac{Z_{CAP}}{Z_1} + \frac{Z_{CAP}}{Z_2} + 1 \right)} \quad (42)$$

De (39) e (41), escrevemos em relação a \dot{V}_1 :

$$\dot{V}_1 = (1 - \dot{k}_2) \cdot \dot{V} \quad (43)$$

O fator de desequilíbrio de tensão é obtido substituindo-se (41) e (43) em (7):

$$\dot{k}_V = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{\dot{k}_2}{(1 - \dot{k}_2)} \quad (44)$$

O fator de desequilíbrio de corrente é obtido aplicando-se (29), (30) e (44) em (7):

$$\dot{k}_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right) \cdot \dot{k}_V \quad (45)$$

3.4 Operação equilibrada do motor trifásico alimentado monofasicamente

A operação equilibrada de um motor de indução trifásico é atingida quando o esquema da **Figura 29** é adotado com alimentação monofásica, se a componente de sequência negativa da tensão do enrolamento de fase é anulada. Isso significa $\dot{k}_2 = 0$ em (41) e $\dot{k}_V = 0$ em (44).

Para $\dot{k}_2 = 0$ na expressão (42), temos:

$$Z_{CAP} = \frac{Z_1}{\sqrt{3}} \angle -150 \quad (46)$$

As condições necessárias para a eliminação da componente de sequência negativa das tensões e correntes nos enrolamentos do estator são:

$$Z_{CAP} = \frac{Z_1}{\sqrt{3}} \quad (47)$$

$$\angle Z_1 = \angle Z_{CAP} + 150^\circ = -90^\circ + 150^\circ = +60^\circ \quad (48)$$

A impedância $Z_1(s)$ do motor na aplicação de tensão de sequência positiva nos seus enrolamentos é mais resistiva na condição normal de escorregamento e preponderantemente indutiva exatamente na velocidade síncrona.

Então, a condição descrita por (48) geralmente ocorre num ponto particular da operação normal, na faixa de escorregamento $0 < s < s_{max}$. A especificação do capacitor baseado na expressão (47), para um escorregamento s e com $\angle Z_1(s)$ igual a 60° resulta num perfeito balanceamento.

3.5 Determinação do circuito equivalente

O objetivo do cálculo do circuito equivalente é para se estimar a curva completa de torque do motor, ou seja, entre os escorregamentos $s=0$ e $s=1$.

Para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente é necessária a realização dos ensaios de rotor bloqueado e a vazio. O circuito equivalente por fase de um motor de indução trifásico é mostrado na **Figura 30**.

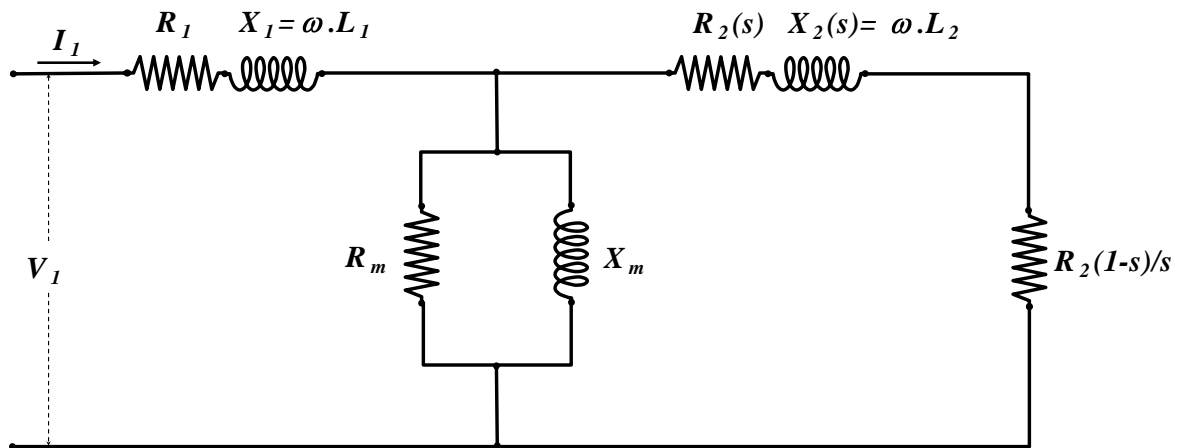


Figura 30 – Circuito equivalente do motor trifásico para um escorregamento s qualquer

Onde,

V_1 – Tensão aplicada por fase (V)

I_1 – Corrente do estator (A)

R_1 – Resistência do enrolamento do estator/fase (Ω)

X_1 – Reatância do enrolamento do estator por fase (Ω)

R_m – Resistência para representação das perdas no ferro por fase (Ω)

X_m – Reatância para representação do fluxo magnético principal por fase (Ω)

$R_2(s)$ – Resistência do enrolamento do rotor em função do escorregamento, referida ao estator por fase (Ω)

$X_2(s)$ – Reatância do enrolamento do rotor para frequência correspondente a rotor bloqueado, com indutância em função do escorregamento, valor referido ao estator por fase (Ω)

s – Escorregamento

3.5.1 Ensaio de rotor bloqueado

Neste ensaio bloqueia-se o rotor, impedindo-o de girar. Aplica-se uma tensão reduzida aos terminais do estator (geralmente entre 10% e 20% da tensão nominal) de modo a se ter no máximo a corrente nominal. Este baixo valor de tensão é justificado, pois como o rotor está travado, a velocidade do fluxo vista do rotor é igual a velocidade deste fluxo vista do estator. Portanto, as forças eletromotrizes efetivas do rotor e do estator são iguais, ou seja, o escorregamento é igual a 1 ($s = 1$). Com esse escorregamento, a impedância de entrada do circuito equivalente é muito baixa.

À tensão induzida, as perdas no ramo magnetizante tornam-se muito pequenas. Além disso, como o motor está parado, as perdas por atrito e ventilação são nulas. A potência de entrada estará suprindo então as perdas Joule nos enrolamentos do estator e do rotor. Desta forma, o circuito equivalente pode ser aproximado para aquele mostrado na **Figura 31**.

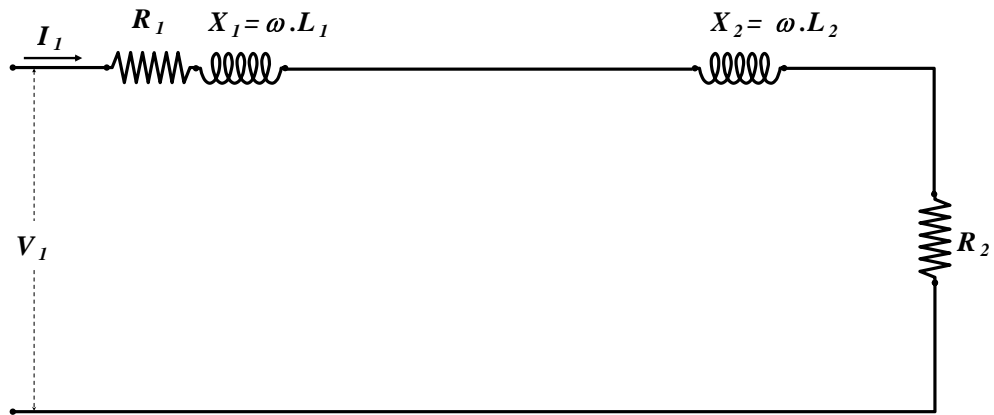


Figura 31 – Circuito equivalente para rotor bloqueado

Para o cálculo dos parâmetros série, as correntes, tensões e potências em curto da fase, subíndice (fc), devem ser conhecidas. A seguir são mostradas as equações utilizadas para os cálculos dos parâmetros série.

$$I_{fc} = \left(\frac{I_a + I_b + I_c}{3} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (49)$$

$$V_{fc} = \left(\frac{V_a + V_b + V_c}{3} \right) \cdot \sqrt{3} \quad (50)$$

$$P_{fc} = \frac{Pe}{3} \quad (51)$$

$$S_{fc} = V_{fc} \cdot I_{fc} \quad (52)$$

$$Q_{fc} = \sqrt{S_{fc}^2 - P_{fc}^2} \quad (53)$$

$$RT = \frac{P_{fc}}{I_{fc}^2} \quad (54)$$

$$R1 = R_{cc} \cdot \frac{(234,5 + T_{op})}{(234,5 + T_a)} \quad (55)$$

$$R2 = RT - R1 \quad (56)$$

$$XT = \frac{Q_{fs}}{I_{fc}^2} \quad (57)$$

$$X1 = X2 = XT/2 \quad (58)$$

$$L1 = \frac{XT/2}{2 \cdot \pi \cdot 60} \quad (59)$$

$$L2 = L1 \quad (60)$$

3.5.2 Ensaio em vazio

O teste em vazio busca informações a respeito do ramo de magnetização. Deixando o rotor livre, dá-se partida ao motor com tensão reduzida. Quando o motor está em regime, aplica-se a tensão nominal no estator (ou até 125% da tensão nominal) de modo a obter um escorregamento muito pequeno (aproximadamente zero). Desta maneira, o circuito equivalente é simplificado como mostrado na **Figura 32**.

Nestas condições, a potência consumida pelo motor está suprindo as perdas Joule no estator, as perdas no ferro e as perdas rotacionais (atrito, ventilação e suplementares). Tomam-se leituras de tensão e corrente, se possível nas três fases, e de potência trifásica. Deve-se transformar os valores lidos em valores por fase: V_{fv} , I_{fv} , P_{fv} .

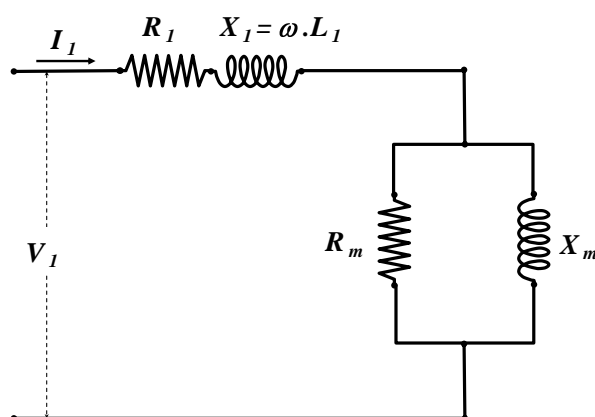


Figura 32 – Circuito equivalente para o ensaio em vazio

Para o cálculo dos parâmetros mútuos, a tensão mútua deve ser conhecida, assim como as potências mútuas relacionadas. A seguir são mostradas as equações utilizadas para os cálculos das correntes, tensões e potências por fase do circuito em vazio, subíndice (fv), e a tensão e potências mútuas por fase, subíndice (muf).

$$I_{fv} = \left(\frac{I_a + I_b + I_c}{3} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (61)$$

$$V_{fv} = \left(\frac{V_a + V_b + V_c}{3} \right) \cdot \sqrt{3} \quad (62)$$

$$P_{fv} = \frac{Pe}{3} \quad (63)$$

$$S_{fv} = V_{fv} \cdot I_{fv} \quad (64)$$

$$Q_{fv} = \sqrt{S_{fv}^2 - P_{fv}^2} \quad (65)$$

$$P_{muf} = P_{fv} - I_{fv}^2 \cdot R_{cc} \quad (66)$$

$$Q_{muf} = Q_{fv} - I_{fv}^2 \cdot X1 \quad (67)$$

$$S_{muf} = \sqrt{P_{muf}^2 + Q_{muf}^2} \quad (68)$$

$$V_{muf} = \frac{S_{muf}}{I_{fv}} \quad (69)$$

$$X_m = \frac{V_{muf}^2}{Q_{muf}} \quad (70)$$

$$R_m = \frac{V_{muf}^2}{P_{muf}} \quad (71)$$

$$Z_m = \frac{V_{muf}^2}{S_{muf}} \quad (72)$$

Para a validação do circuito equivalente encontrado, é então calculado o torque e rendimento teóricos para diferentes valores de escorregamento, comparando-se com os valores reais encontrados pelo ensaio de carga.

CAPÍTULO 4 ENSAIO DO MOTOR EM ALIMENTAÇÃO TRIFÁSICA

Este capítulo apresenta os ensaios necessários para obtenção das características elétricas e mecânicas do motor de indução trifásico, a fim de ser feita uma avaliação comparativa com o mesmo quando operando monofasicamente, utilizando-se da ligação Steinmetz.

Os ensaios foram realizados em laboratório, sob temperatura ambiente (23 ± 2) °C, utilizando a rede de alimentação trifásica ajustada por um variac trifásico manual. O sistema de ensaio para todas as modalidades neste trabalho foi o mesmo descrito no **CAPÍTULO 2**, página **15**. A amostra do motor trifásico está descrita em **2.1.1**, página **16**.

4.1 Ensaio de rotor bloqueado do motor trifásico

Este ensaio objetiva o levantamento de dados para a obtenção do circuito equivalente do motor trifásico, particularmente para obtenção das resistências e reatâncias dos enrolamentos. O motor foi travado em seu eixo, ou seja, rotação zero.

Os dados obtidos para este ensaio estão apresentados na **Tabela 2**, onde a linha hachurada corresponde à situação de corrente nominal aplicada e a segunda coluna informa em porcentagem a média das correntes medidas em relação a corrente nominal do motor.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios em motor bloqueado

Motor Indução	I	Parâmetros Elétricos									Parâmetros Mecânicos		
		Tensões (V)			Correntes (A)			Potências			Torque	Rotação	Potência
WEG 1/4 cv	(%)	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	T (N.m)	(rpm)	Pm(W)
1	14,8	20	19	19	0,210	0,210	0,200	3,10	6,19	6,92	0,005	0,0	0,0
2	29,0	32	32	32	0,410	0,400	0,410	11,7	19,3	22,5	0,022	0,0	0,0
3	42,4	44	42	43	0,600	0,590	0,590	24,6	36,7	44,2	0,050	0,0	0,0
4	57,4	56	55	55	0,800	0,800	0,810	45,7	62,0	77,0	0,097	0,0	0,0
5	71,9	68	66	65	1,00	1,01	1,01	71,5	90,9	115,6	0,157	0,0	0,0
6	85,7	79	77	77	1,20	1,20	1,20	102	125	161,4	0,230	0,0	0,0
7	101,0(*)	91	90	88	1,40	1,41	1,43	143	166	219,5	0,330	0,0	0,0
8	115,5	102	101	102	1,60	1,62	1,63	188	214	284,7	0,446	0,0	0,0
Observações	(*) Desbalanço em V = 1,57%; Desbalanço em I = 0,84%						Temperatura ambiente: 23 ± 2 °C				Ensaio em 07/06/2010 12:15		

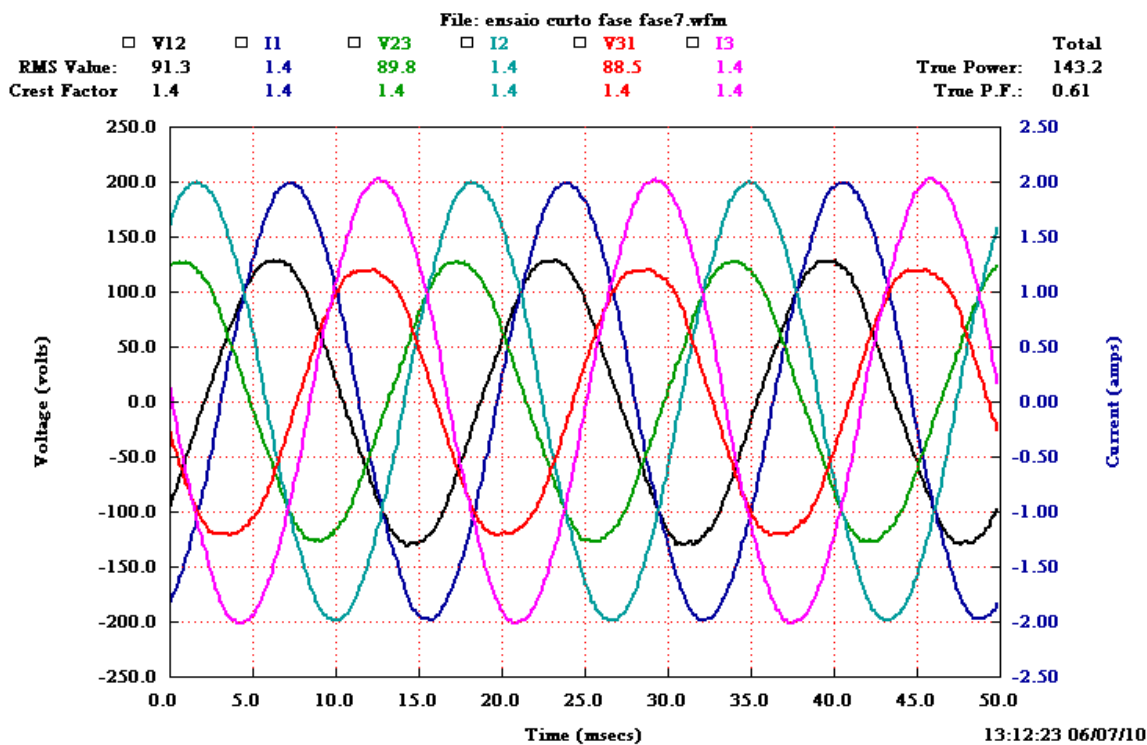


Figura 33 – Tensões e correntes no ensaio em curto na corrente nominal

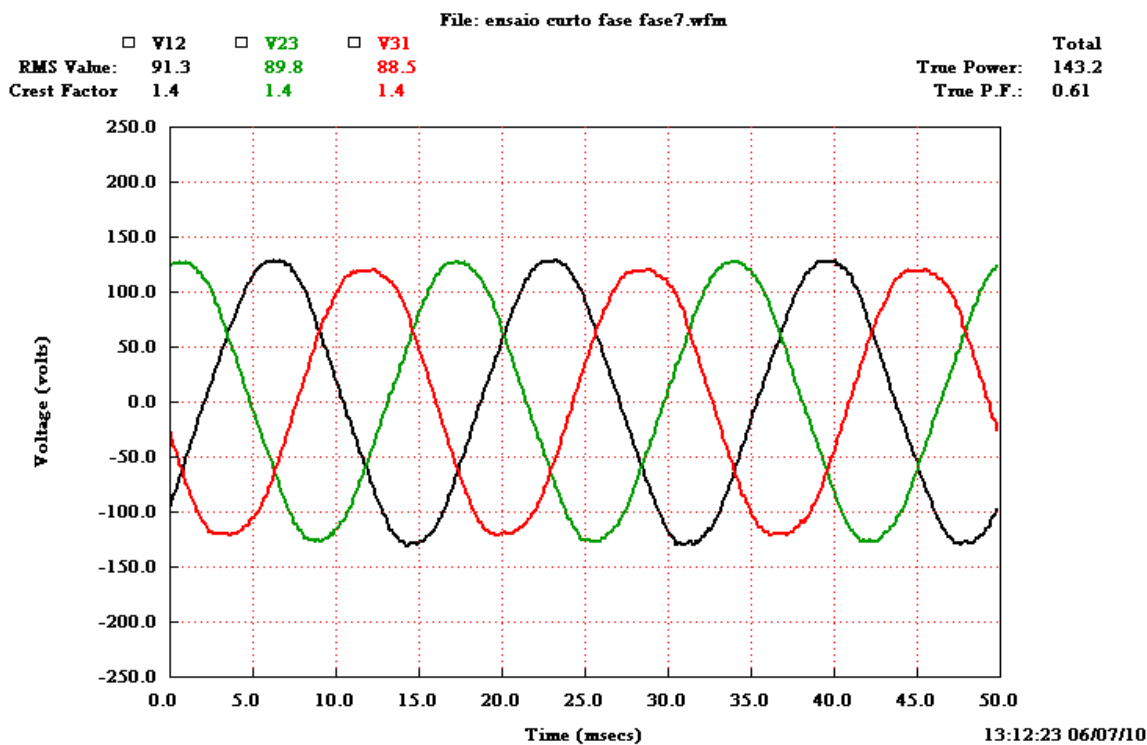


Figura 34 – Tensões no ensaio em curto na corrente nominal

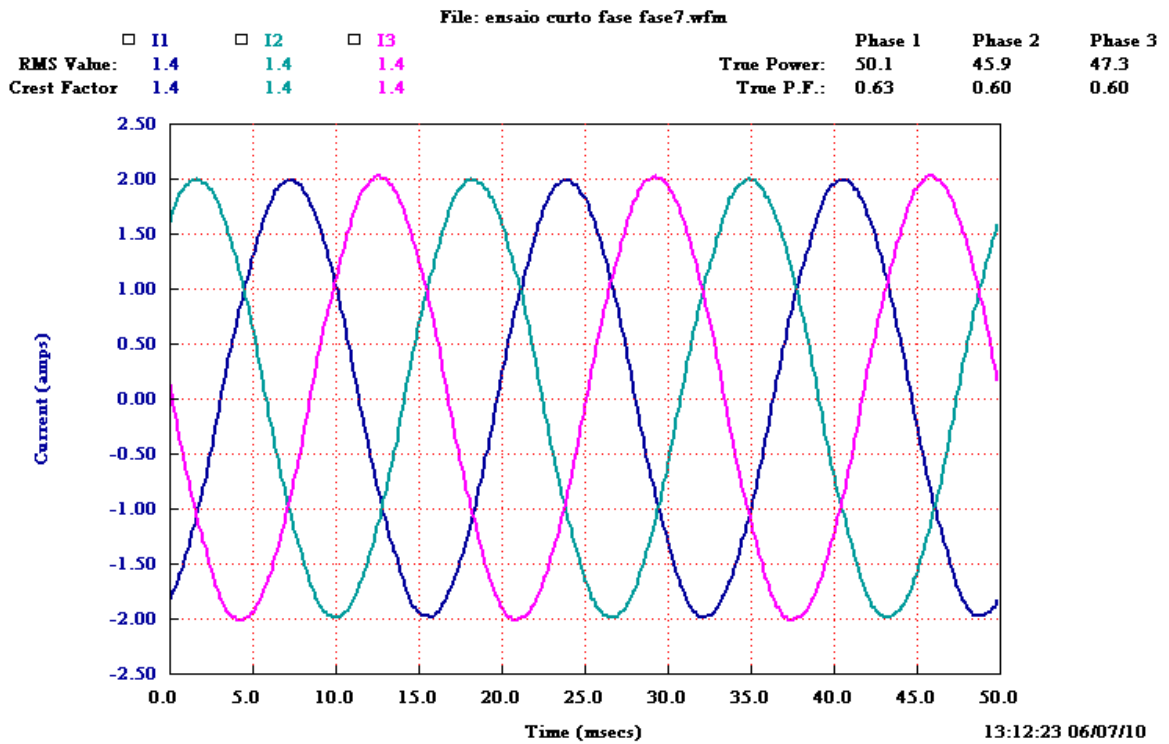


Figura 35 – Correntes no ensaio em curto na corrente nominal

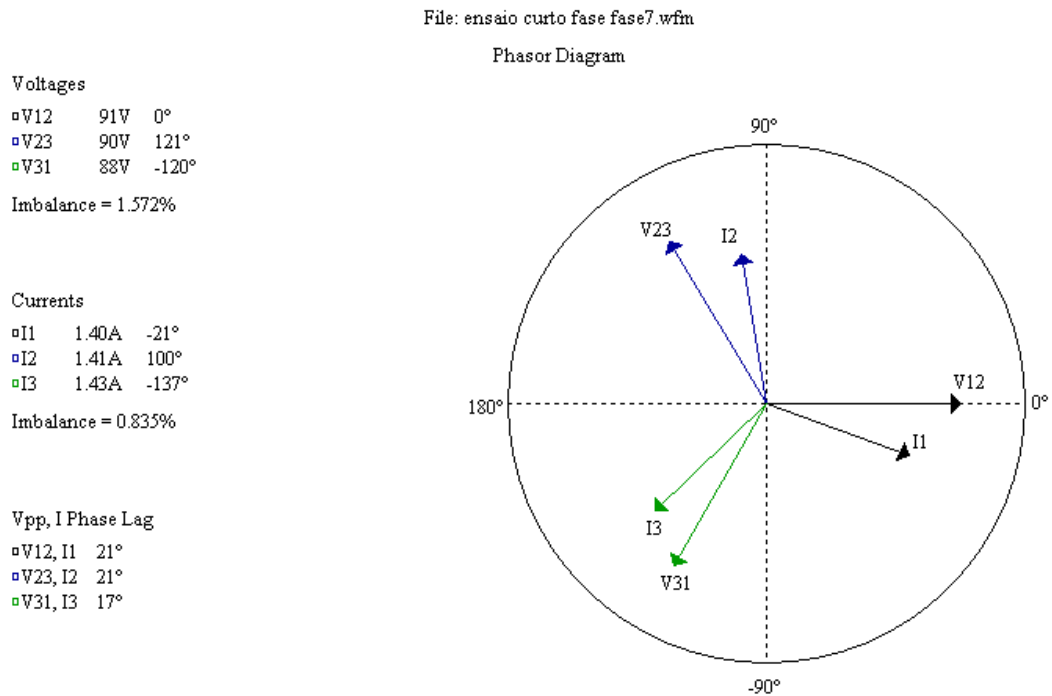


Figura 36 – Diagrama fasorial no ensaio em curto na corrente nominal

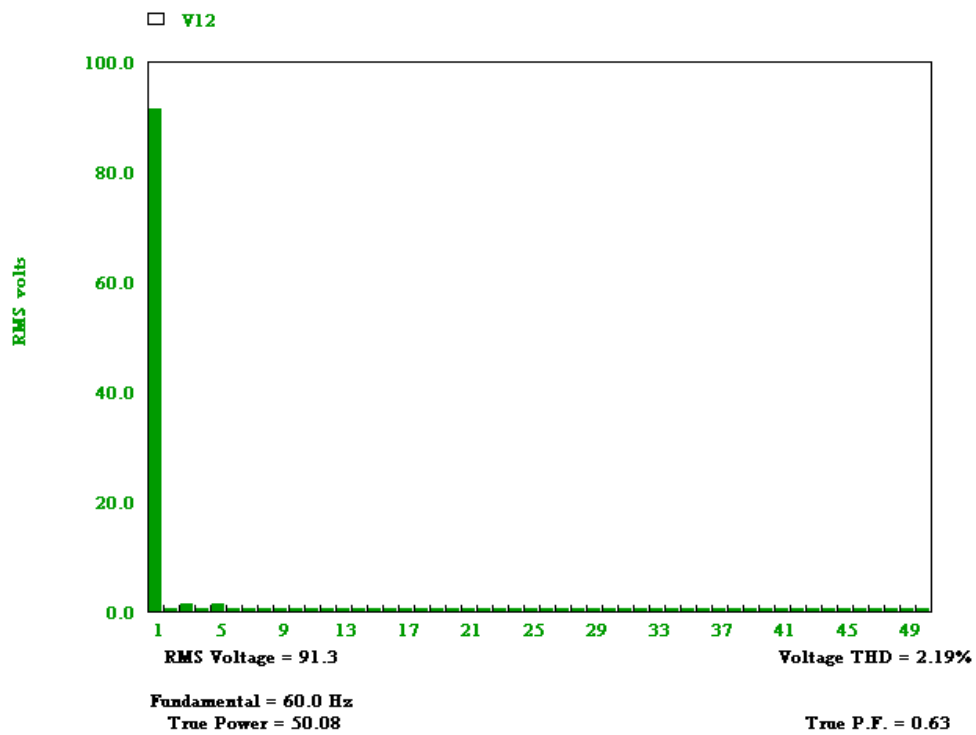


Figura 37 – Harmônicos de tensão no ensaio em curto na corrente nominal

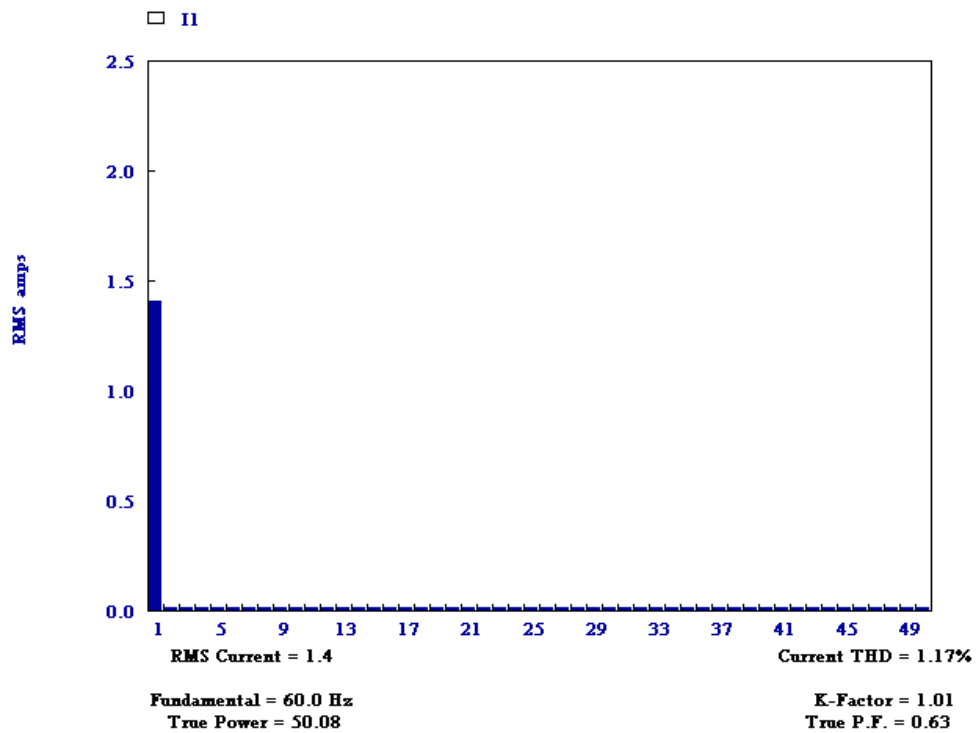


Figura 38 – Harmônicos de corrente no ensaio em curto na corrente nominal

4.2 Ensaio em vazio do motor trifásico

Este ensaio objetiva o levantamento de dados para a obtenção do circuito equivalente do motor trifásico, particularmente para obtenção das perdas no núcleo de ferro. O motor foi acionado por um motor de corrente contínua auxiliar na rotação síncrona de 1200 rpm. A rotação foi mantida constante durante o ensaio.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios em vazio

Motor Indução WEG 1/4 cv	Tensão V	Parâmetros Elétricos									Parâmetros Mecânicos		
		Tensões (V)			Correntes de Fase (A)			Potências			Torque	Rotação	Potência
N	(%)	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	T (N.m)	(rpm)	Pm (W)
1	100,07(*)	219	218	224	0,802	0,836	0,692	129	496	512	0,0	1200	0,0
2	91,30	200	200	203	0,693	0,717	0,607	103,9	391	405	0,0	1200	0,0
3	82,24	180	180	183	0,602	0,618	0,53	77,6	307	317	0,0	1200	0,0
4	72,96	159	159	163	0,522	0,530	0,465	59,9	236	243	0,0	1200	0,0
5	64,06	139,9	140,6	142,3	0,450	0,455	0,402	45,4	178	184	0,0	1200	0,0
6	54,76	121	121	120	0,373	0,395	0,349	33,1	130	135	0,0	1200	0,0
7	45,72	100	101	101	0,311	0,326	0,293	23,7	90,6	094	0,0	1200	0,0
8	36,76	81	81	81	0,253	0,260	0,241	16,6	58,7	061	0,0	1200	0,0
9	27,30	60	60	60	0,189	0,191	0,187	9,70	32,6	034	0,0	1200	0,0
10	17,90	40	39	39	0,121	0,131	0,121	4,00	14,1	015	0,0	1200	0,0
11	8,86	19	19	20	0,069	0,074	0,069	1,16	3,97	004	0,0	1200	0,0
12	4,43	10	10	10	0,037	0,039	0,037	0,320	1,04	001	0,0	1200	0,0
13	0,51	01	01	01	0,003	0,003	0,003	0,001	0,01	000	0,0	1200	0,0
Observações	(*) Desbalanço em V = 0,96%; Desbalanço em I = 5,12%						Temperatura ambiente: 23 ± 2 °C				Ensaio em 30/06/2010 16:15		

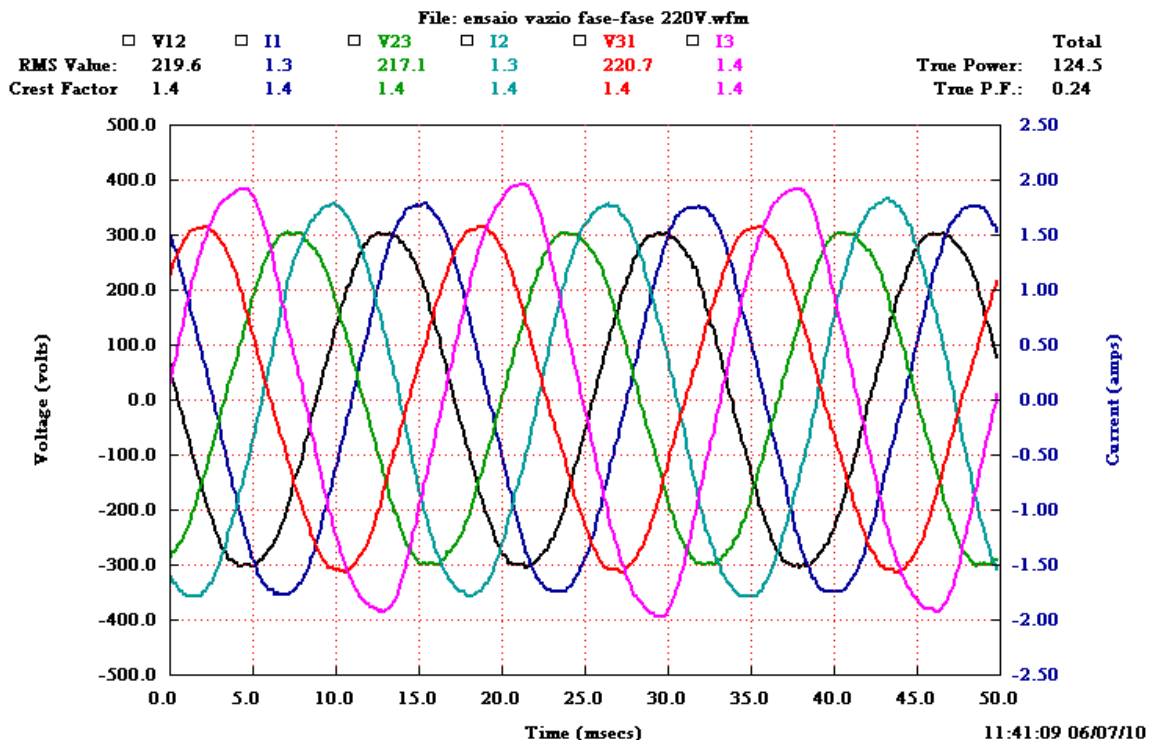


Figura 39 – Tensões e correntes no ensaio em vazio na tensão nominal

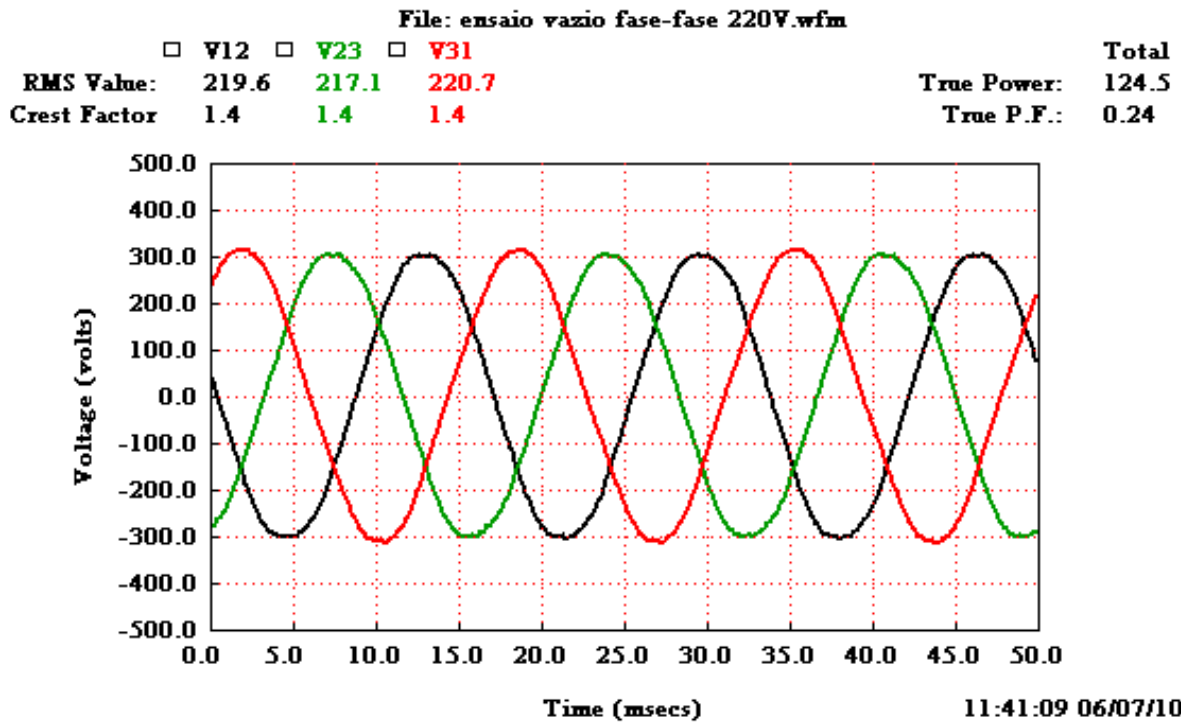


Figura 40 – Tensões no ensaio em vazio na tensão nominal

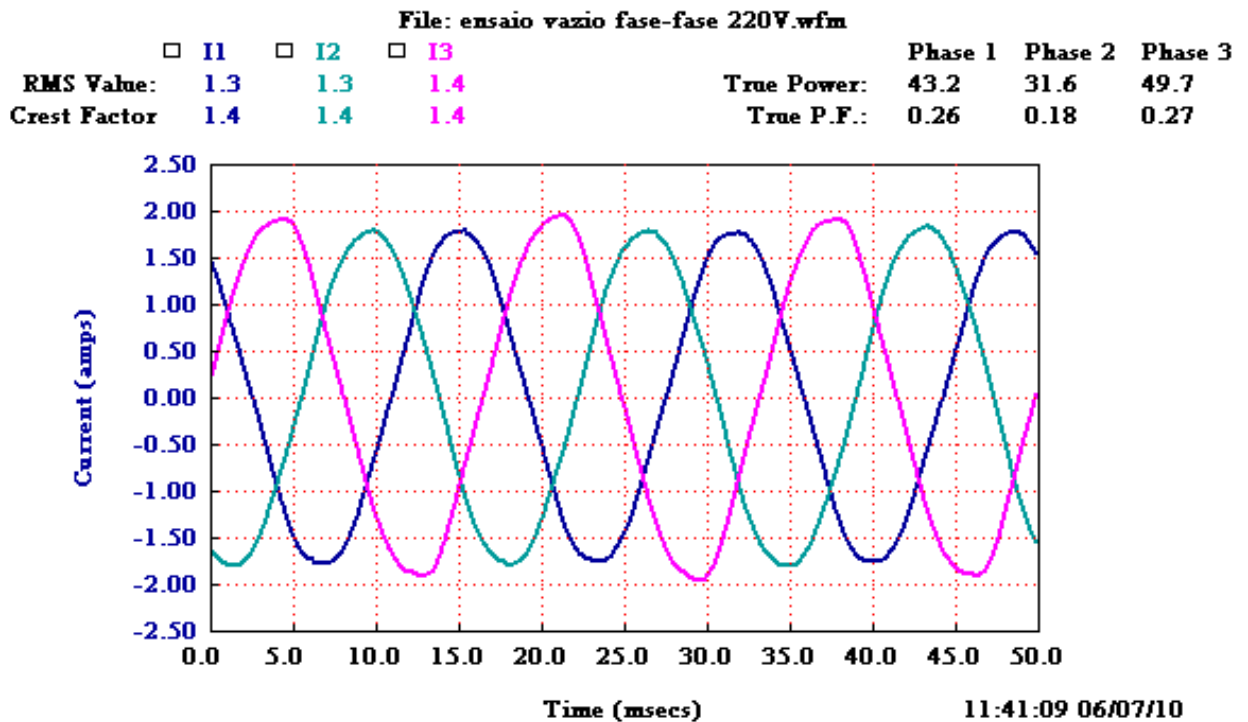


Figura 41 – Correntes no ensaio em vazio na tensão nominal

File: ensaio vazio fase-fase 220V.wfm

Phasor Diagram

Voltages
 □ V12 220V 0°
 □ V23 217V 119°
 □ V31 221V -121°

Imbalance = 0.956%

Currents
 □ I1 1.27A -44°
 □ I2 1.28A 72°
 □ I3 1.37A -166°

Imbalance = 5.120%

Vpp, I Phase Lag
 □ V12, I1 44°
 □ V23, I2 47°
 □ V31, I3 45°

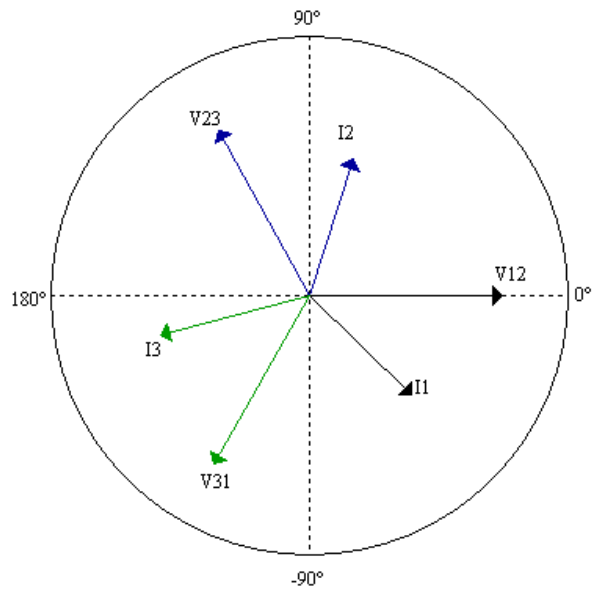


Figura 42 – Diagrama fasorial no ensaio em vazio na tensão nominal

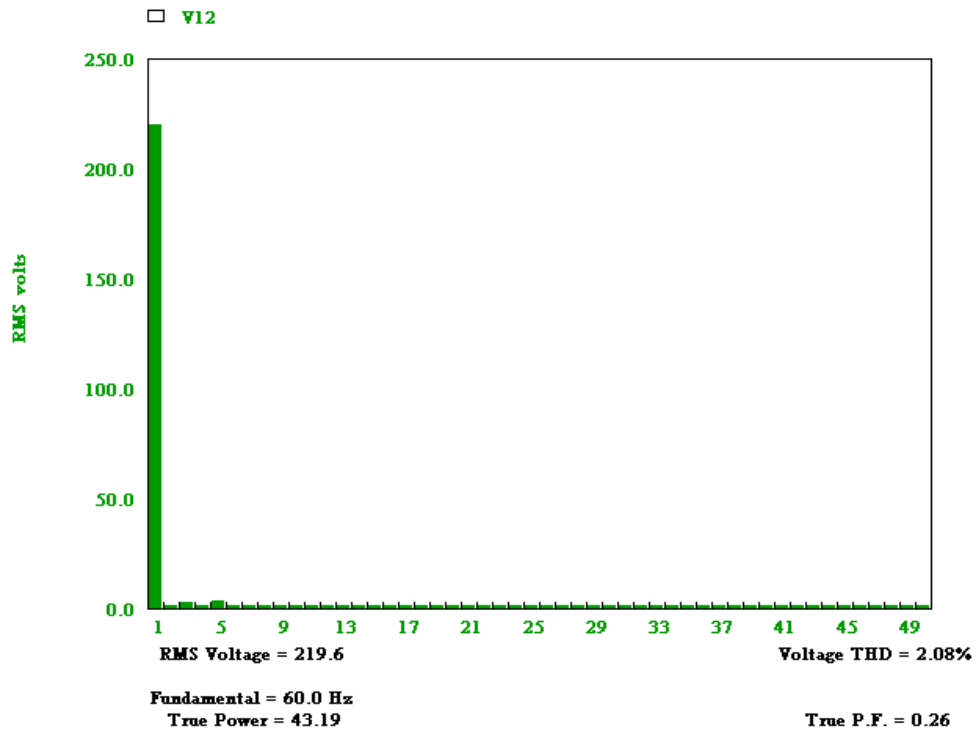


Figura 43 – Harmônicos de tensão no ensaio em vazio na tensão nominal

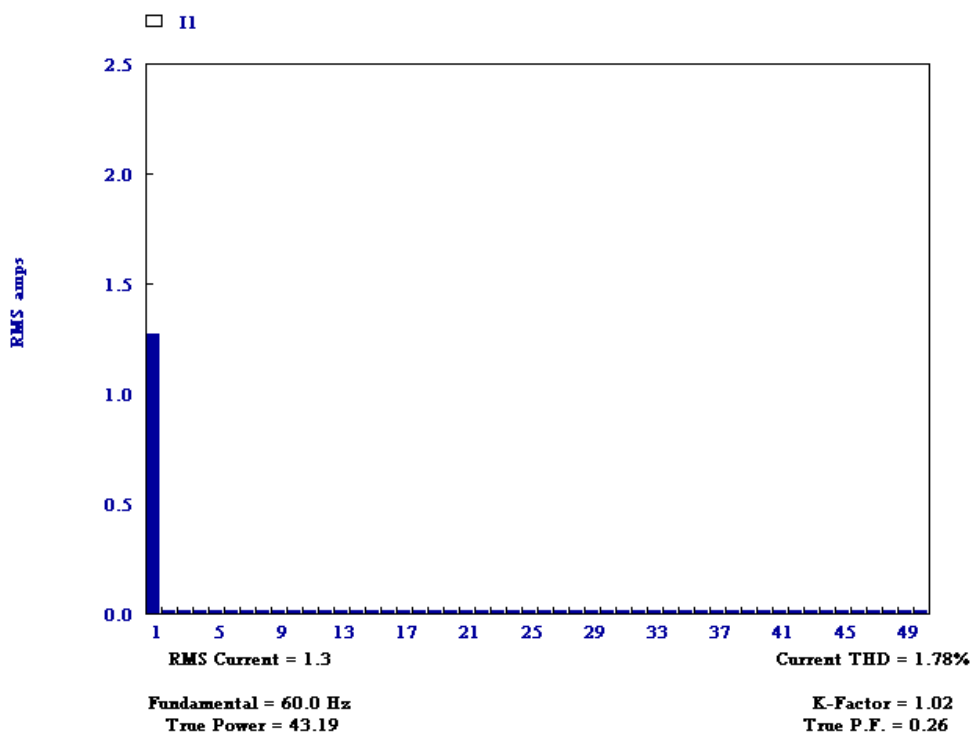


Figura 44 – Harmônicos de corrente no ensaio em vazio na tensão nominal

4.3 Ensaio de sequência negativa

Este ensaio objetiva o levantamento de dados para a obtenção do circuito equivalente do motor trifásico, particularmente para obtenção das resistências e reatâncias da gaiola. O motor foi acionado por um motor de corrente contínua auxiliar na rotação síncrona de 1200 rpm, na direção ABC e o motor sob ensaio foi acionado na direção inversa, ou seja, ACB. A rotação foi mantida constante durante o ensaio.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de sequência negativa

Motor Indução	Corrente	Parâmetros Elétricos									Parâmetros Mecânicos		
		Tensões (V)			Correntes (A)			Potências			Torque	Rotação	Potência
WEG 1/4 cv	I	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	T (N.m)	(rpm)	Pm (W)
N	(%)												
1	0,07	0,7	0,8	0,8	0,001	0,001	0,001	0,00	0,00	0,00	0,00	1200	0,00
2	7,33	12	11,8	11,7	0,103	0,103	0,102	0,900	1,90	2,10	0,00	1200	0,00
3	14,5	19,0	19,0	19,0	0,210	0,200	0,200	2,90	6,03	6,69	0,005	1200	0,628
4	29,5	31,0	31,0	31,0	0,410	0,410	0,420	10,7	19,4	22,2	0,023	1200	2,89
5	44,0	42,0	42,0	42,0	0,610	0,610	0,630	23,5	38,2	44,9	0,056	1200	7,04
6	57,4	52,0	52,0	52,0	0,800	0,790	0,820	39,8	60,4	72,4	0,100	1200	12,6
7	71,9	62,0	62,0	64,0	1,00	0,990	1,03	62,8	89,4	109	0,162	1200	20,4
8	86,9	75,0	74,0	73,0	1,21	1,20	1,24	93,4	125	156	0,246	1200	30,9
9	101 (*)	85,0	84,0	84,0	1,40	1,39	1,44	128	162	206	0,340	1200	42,7
10	115	95,0	95,0	96,0	1,59	1,58	1,64	167	205	265	0,449	1200	56,4
Observações	(*) Desbalanço em V = 0,73%; Desbalanço em I =						Temperatura ambiente: 23 ± 2 °C			Ensaio em 15/06/2010 09:3			

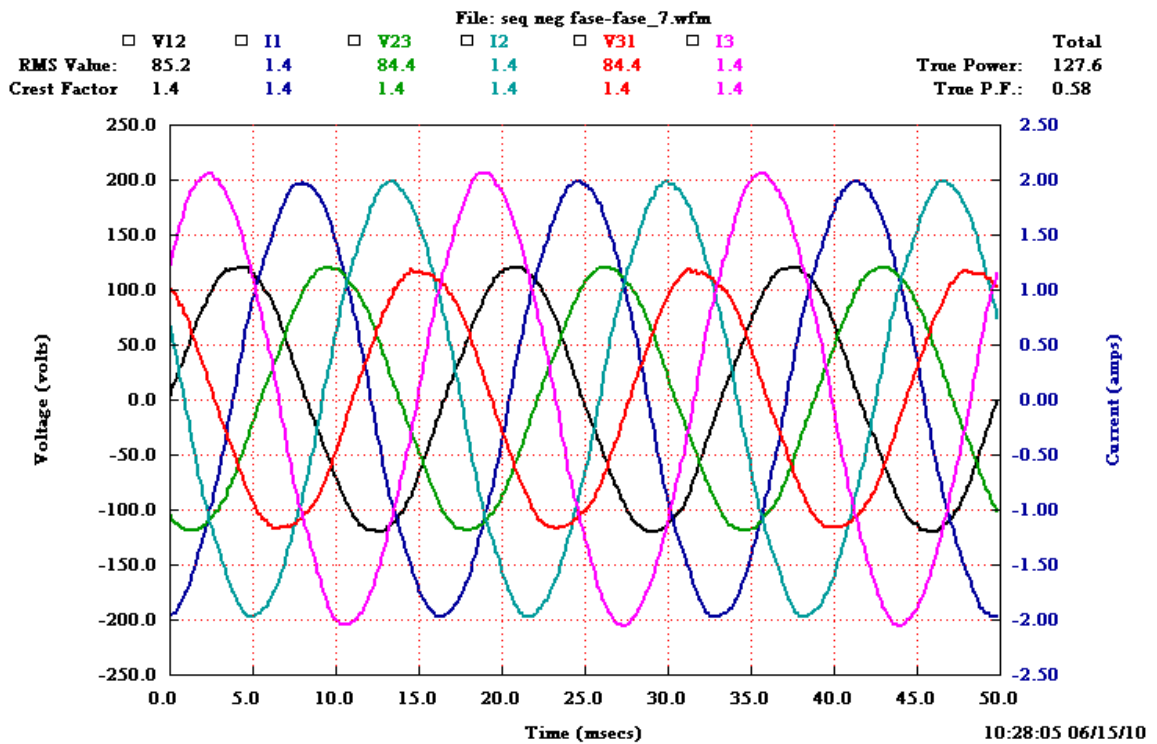


Figura 45 – Tensões e correntes no ensaio de sequência negativa na corrente nominal

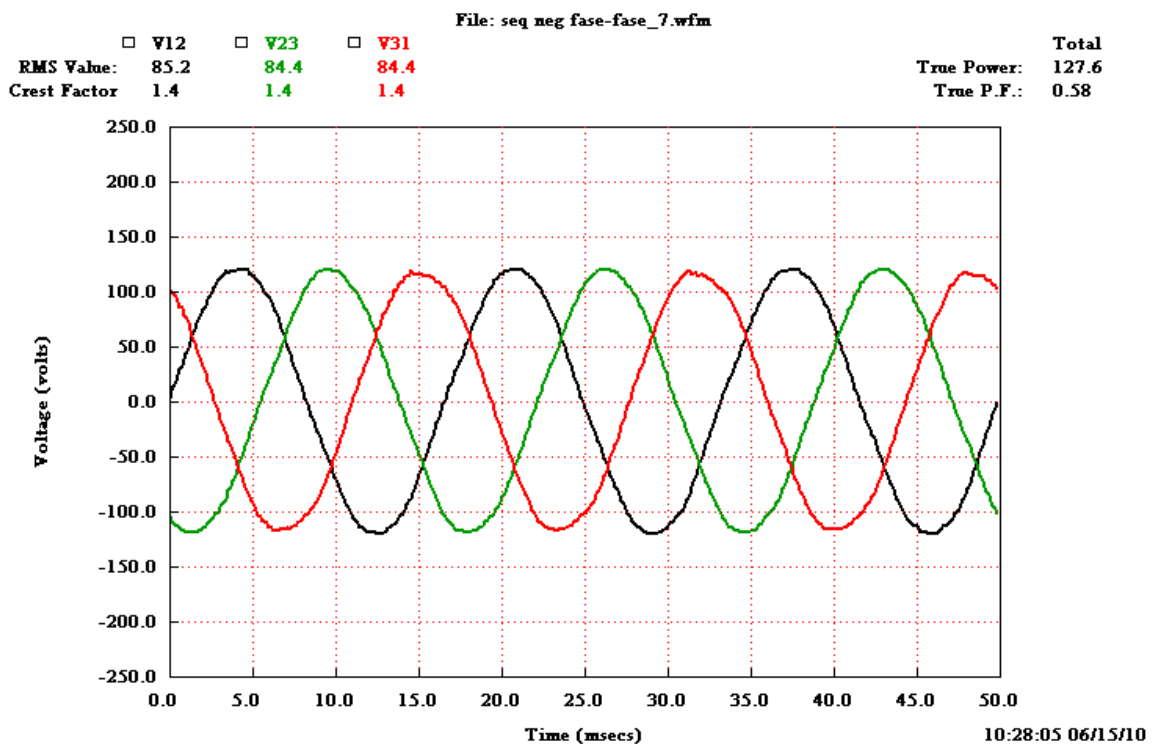


Figura 46 – Tensões no ensaio de sequência negativa na corrente nominal

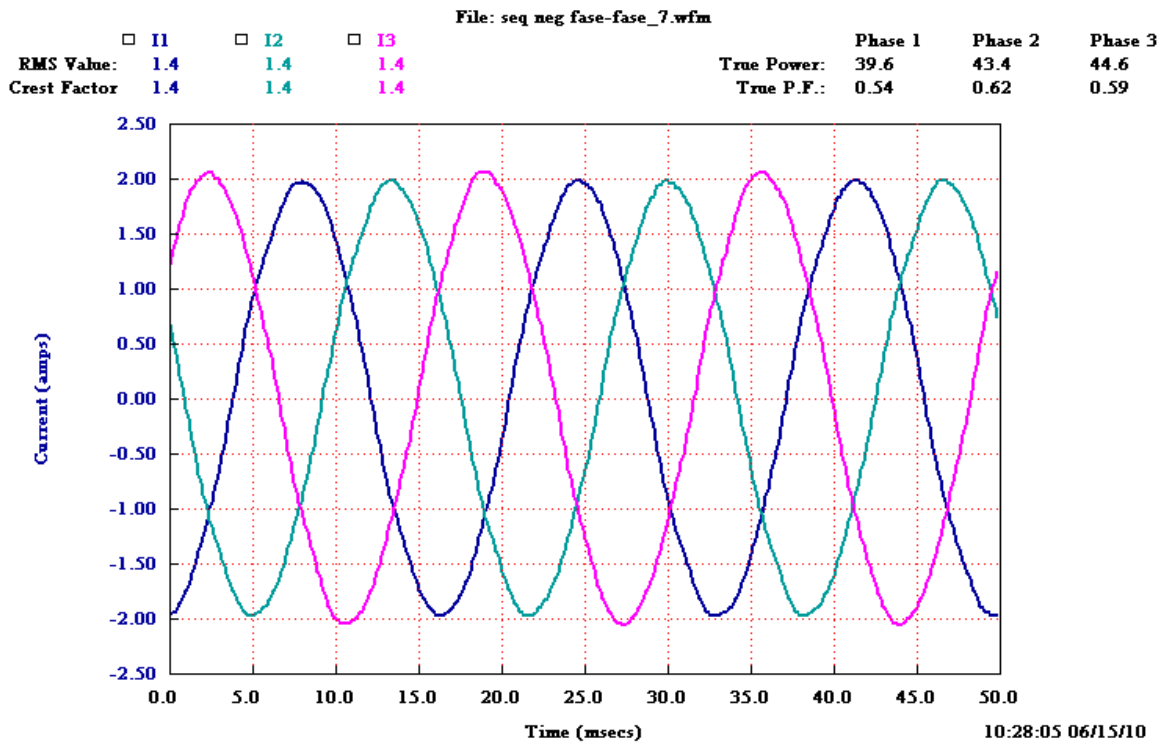


Figura 47 – Correntes no ensaio de sequência negativa na corrente nominal

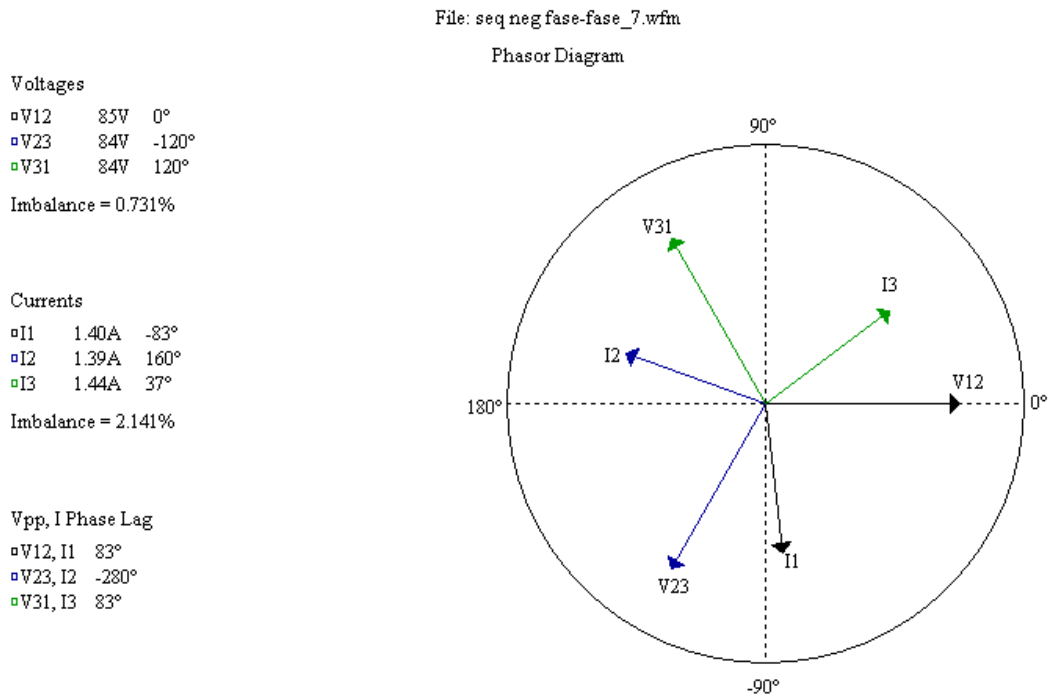


Figura 48 – Diagrama fasorial no ensaio de sequência negativa na corrente nominal

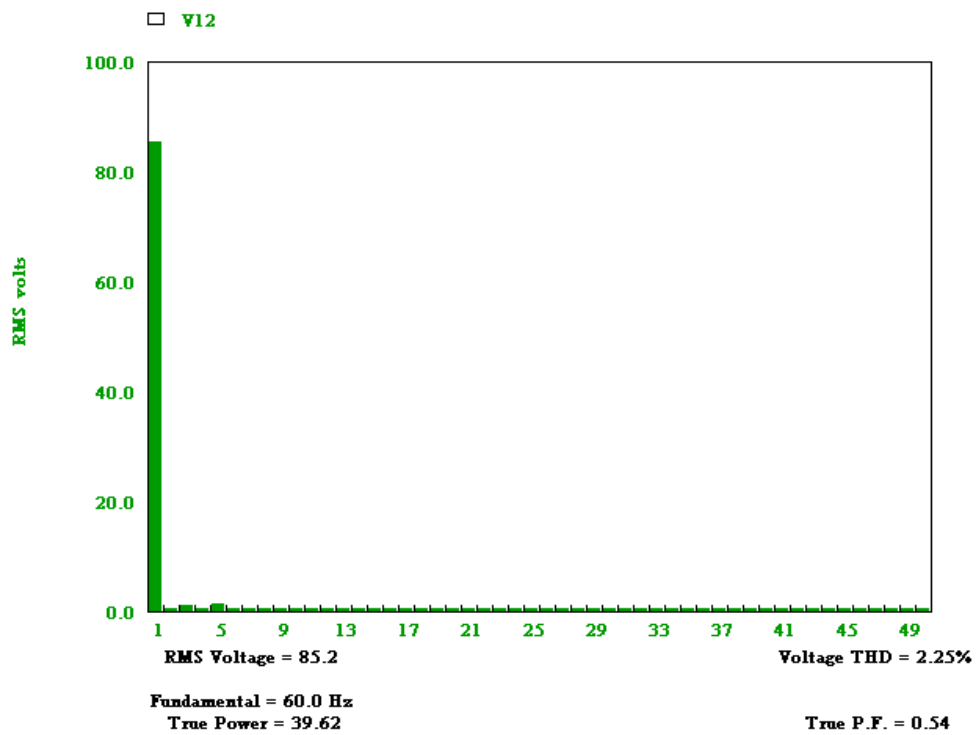


Figura 49 – Harmônicos de tensão no ensaio de sequência negativa na corrente nominal

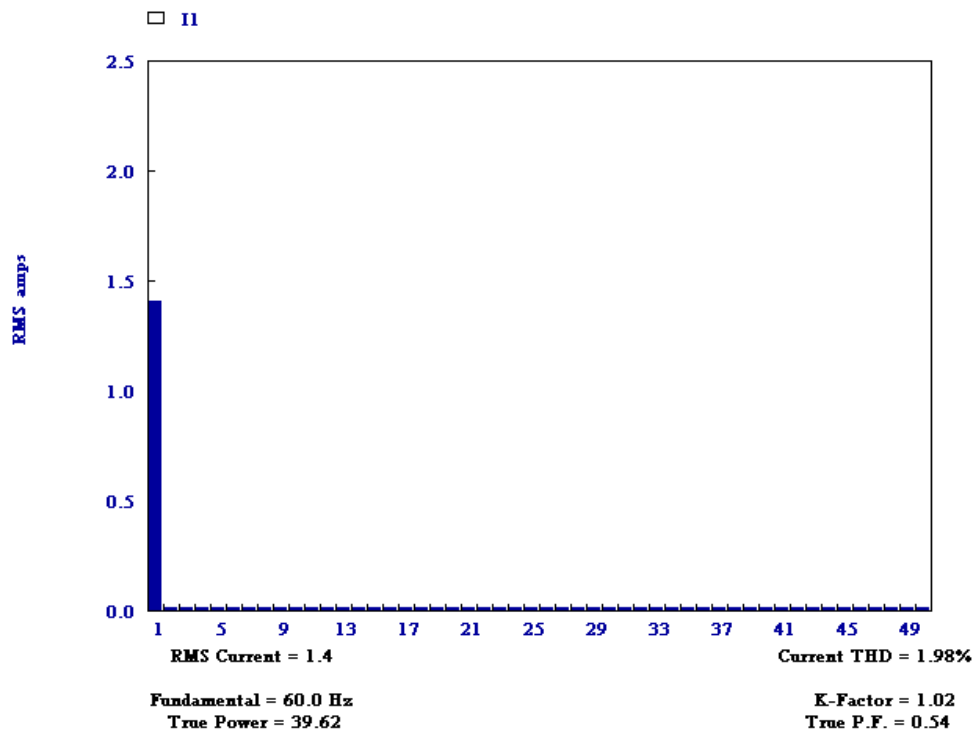


Figura 50 – Harmônicos de corrente no ensaio de sequência negativa na corrente nominal

4.4 Ensaio sob carga do motor com alimentação trifásica

Este ensaio objetiva a caracterização do objeto ensaiado nas condições normais de operação, ou seja, com alimentação trifásica em 60 Hz.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios do motor sob carga

Motor Indução	Corrente	Parâmetros Elétricos											Parâmetros Mecânicos			Rendimento	Temperatura do motor
		Tensões (V)			Correntes (A)			Potências					Torque	Rotação	Potência		
WEG 1/4 cv	I	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}	I _a	I _b	I _c	P _e (W)	Q (var)	S _{cal} (VA)	S (VA)	T (N.m)	(rpm)	P _m (W)	η(%)	T (°C)	
N	(%)	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}	I _a	I _b	I _c	P _e (W)	Q (var)	S _{cal} (VA)	S (VA)	T (N.m)	(rpm)	P _m (W)	η(%)	T (°C)	
1	90,0	220,0	217,0	220,0	1,22	1,25	1,31	126,2	461,0	478,0	478,0	20E-03	1200	2,513	1,99	68,0	
2	89,3	219,0	217,0	221,0	1,22	1,22	1,31	169,9	442,8	474,3	474,3	0,401	1180	49,55	29,16	68,0	
3	90,7	220,0	217,0	219,0	1,25	1,23	1,33	218,3	428,7	481,0	481,0	0,753	1160	91,47	41,90	68,0	
4	96,9	219,0	215,0	221,0	1,34	1,31	1,42	298,8	417,3	513,2	513,2	1,294	1120	151,8	50,79	68,4	
5	105,5 (*)	218,0	215,0	221,0	1,46	1,43	1,54	373,8	414,0	557,8	557,8	1,705	1080	192,8	51,59	68,0	
6	116	218,0	215,0	221,0	1,62	1,57	1,68	444,3	422,5	613,1	613,1	2,042	1040	222,4	50,05	67,8	
7	124	217,0	216,0	219,0	1,73	1,68	1,79	485,8	435,7	652,6	652,6	2,220	1013	235,5	48,48	67,8	
8	239,0	219,0	215,0	218,0	3,32	3,36	3,36	991,1	777,6	1259,8	1259,8	2,550	0	0,000	0,00	67,8	
Observações	(*) Desbalanço em V = 1,38%; Desbalanço em I = 4,29%							Temperatura ambiente: 23 ± 2 °C					Ensaio em 17/06/2010 09:00				

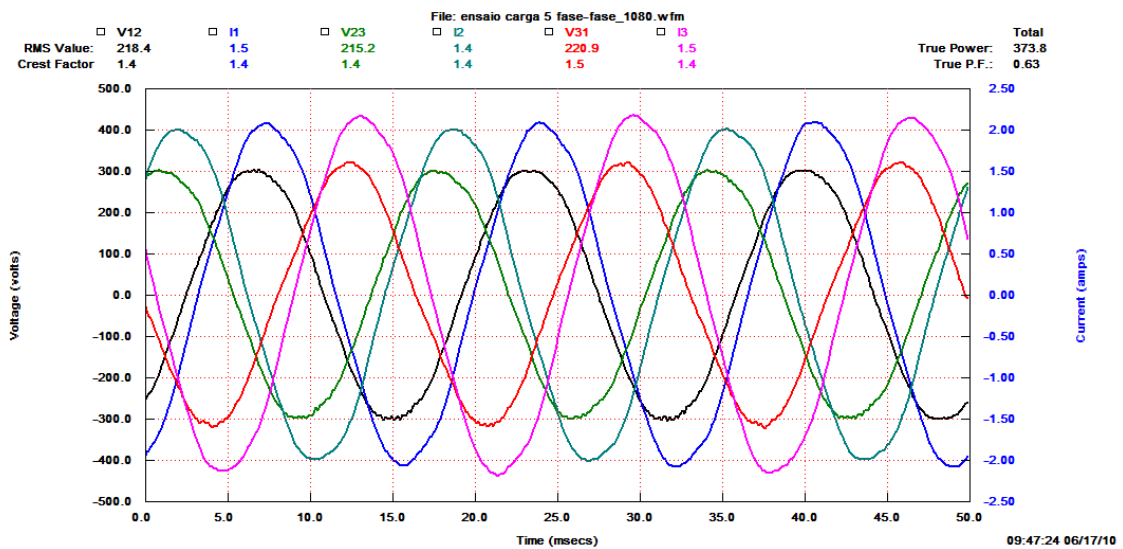


Figura 51 – Tensões e correntes no ensaio sob carga nominal

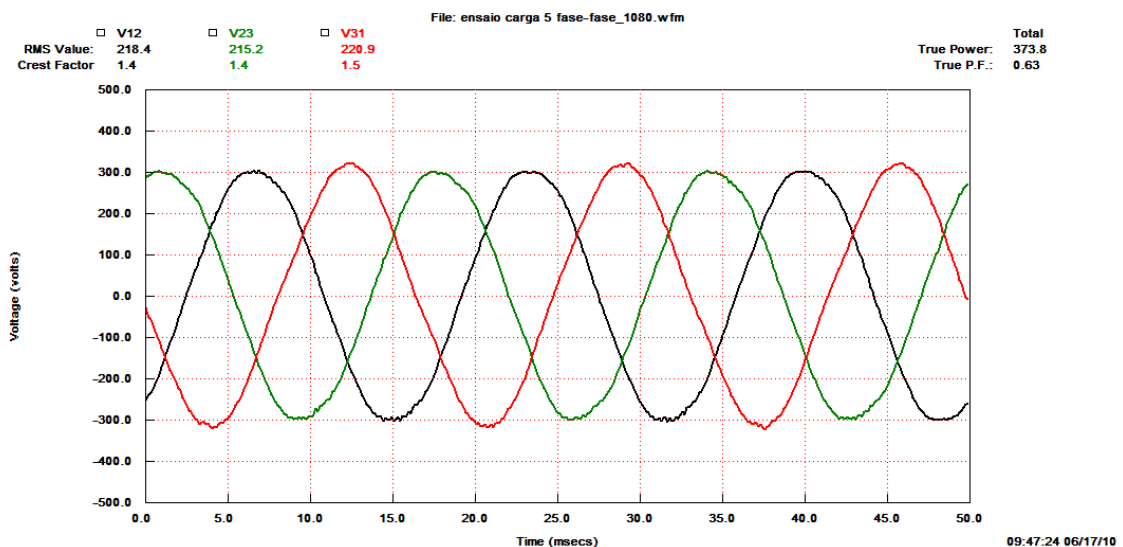


Figura 52 – Tensões no ensaio sob carga nominal

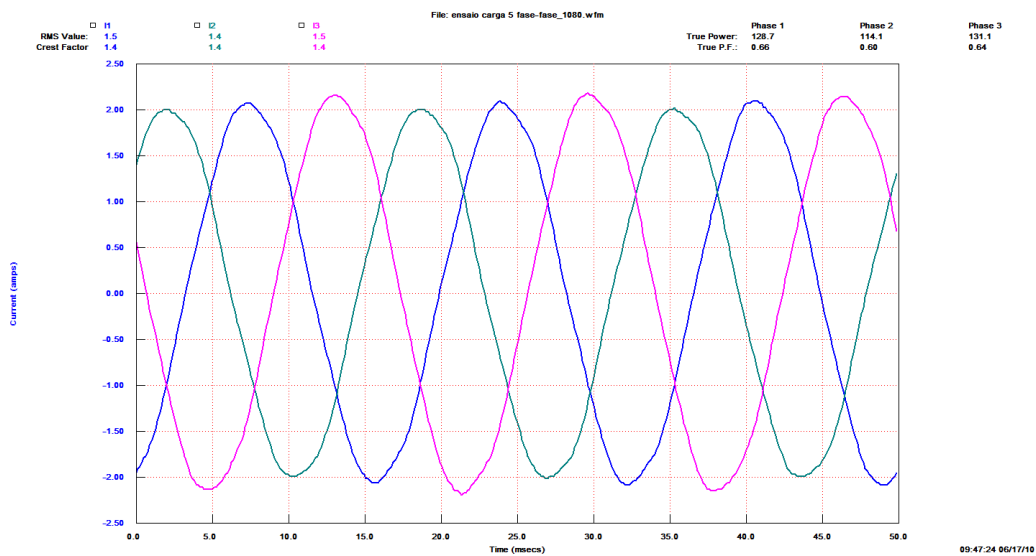


Figura 53 – Correntes no ensaio sob carga nominal

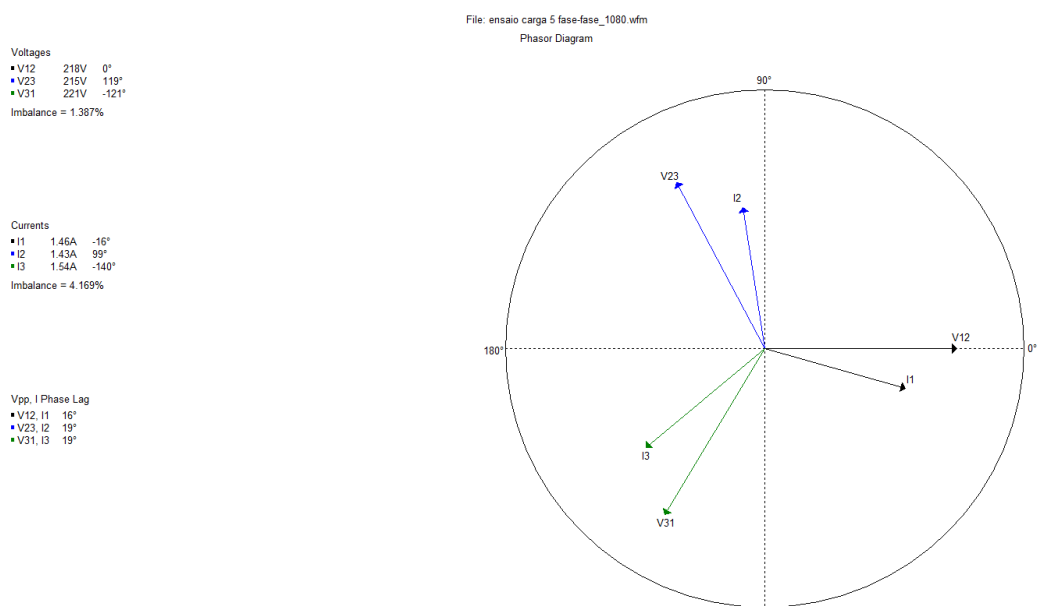


Figura 54 – Diagrama fasorial no ensaio sob carga nominal

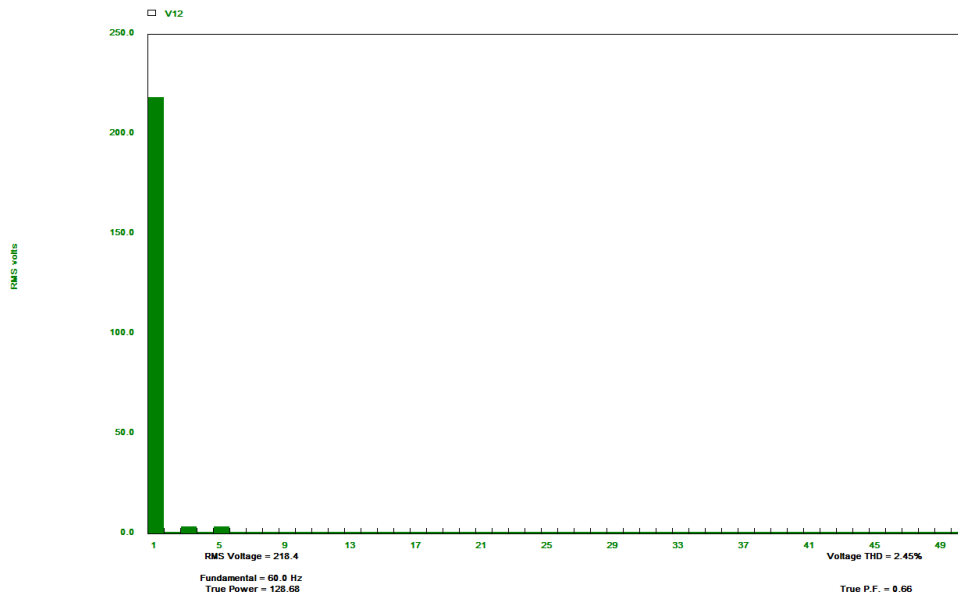


Figura 55 – Harmônicos de tensão no ensaio sob carga nominal

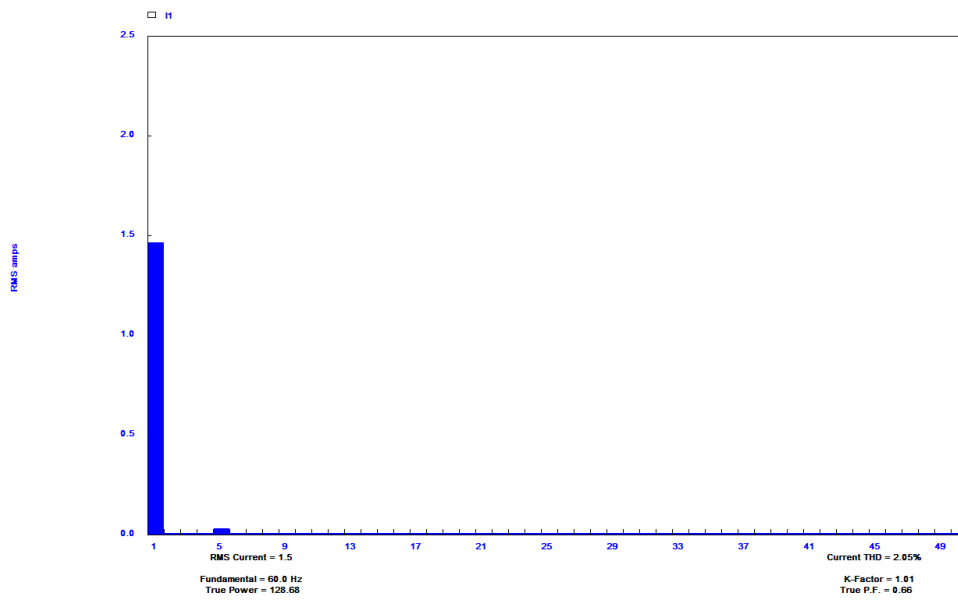


Figura 56 – Harmônicos de corrente no ensaio sob carga nominal

4.5 Ensaio sob carga mínima do motor nas condições normais

Este ensaio objetiva o levantamento das características de rotação e torque com o tempo na partida do motor com carga mínima, ou seja, apenas acoplado ao motor de corrente contínua e ao ventilador.

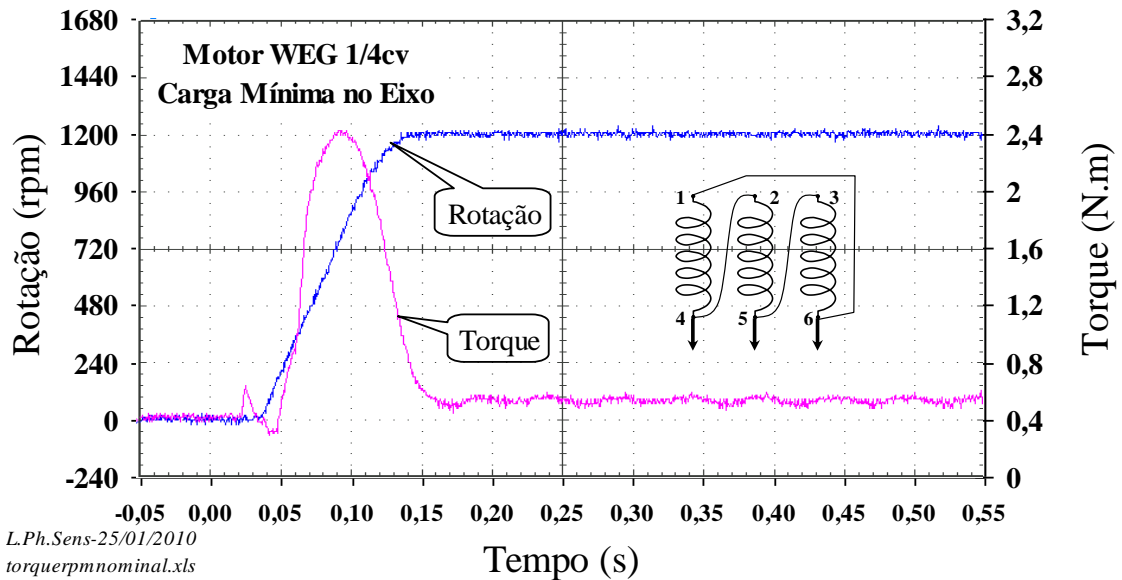


Figura 57 – Rotação e torque sob carga mínima

4.6 Ensaio sob carga nominal do motor nas condições normais

Este ensaio objetiva o levantamento das características de rotação e torque com o tempo na partida do motor sob carga nominal, ou seja, para a potência mecânica de saída igual a $\frac{1}{4}$ de cavalo, ou 185 W.

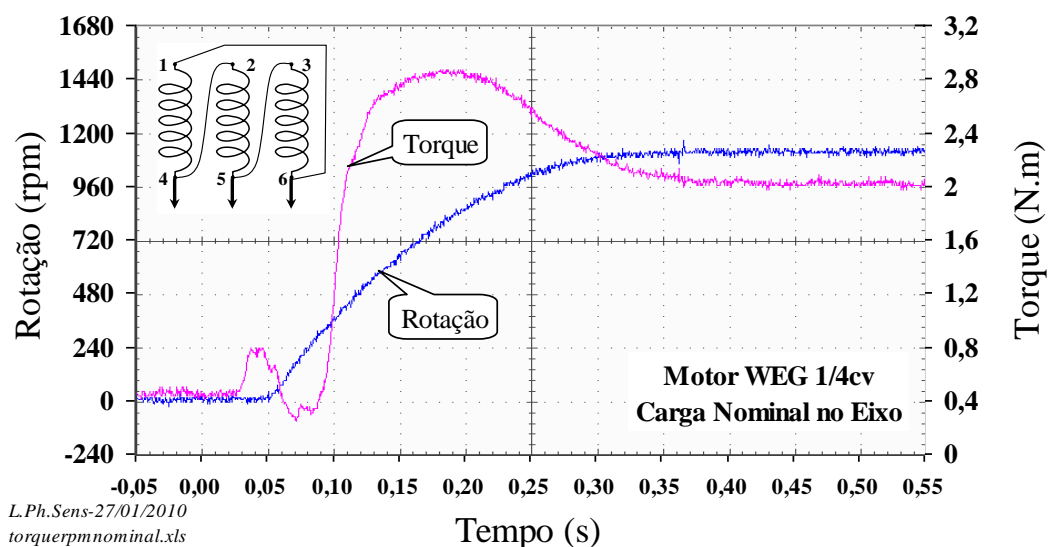


Figura 58 – Rotação e torque na partida sob carga nominal

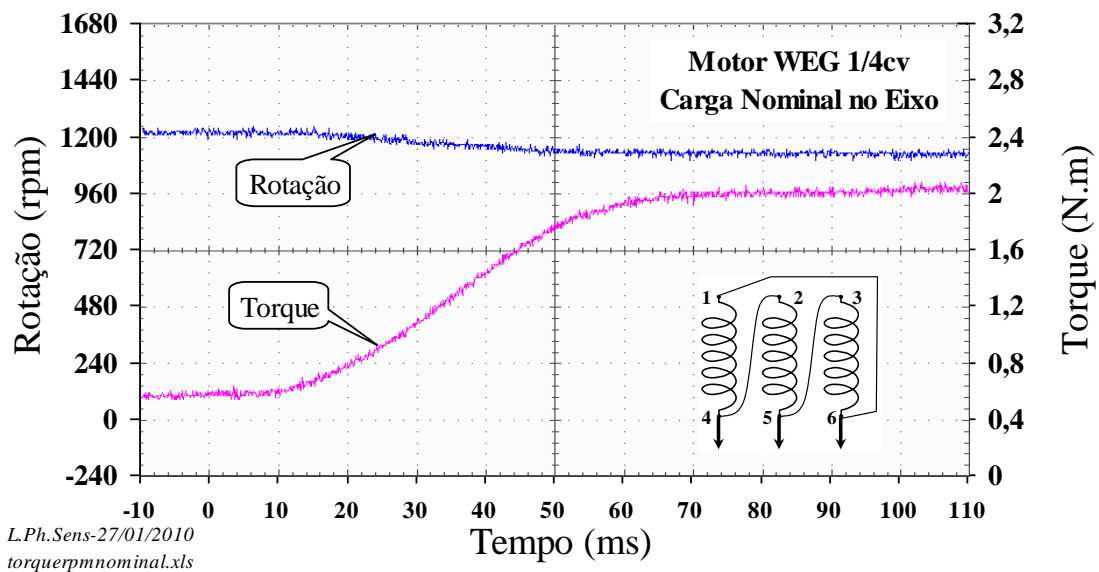


Figura 59 – Rotação e torque na aplicação da carga nominal

4.7 Determinação do circuito equivalente

O objetivo do cálculo do circuito equivalente é para se estimar a curva completa de torque do motor, ou seja, entre os escorregamentos $s=0$ e $s=1$, já que experimentalmente só foi possível obter os dados até $s=0,2$.

Para determinação dos parâmetros do circuito equivalente, foi necessária a realização dos ensaios de rotor bloqueado e a vazio, conforme mostrado em 3.5.1 e 3.5.2. O circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico é mostrado na Figura 60.

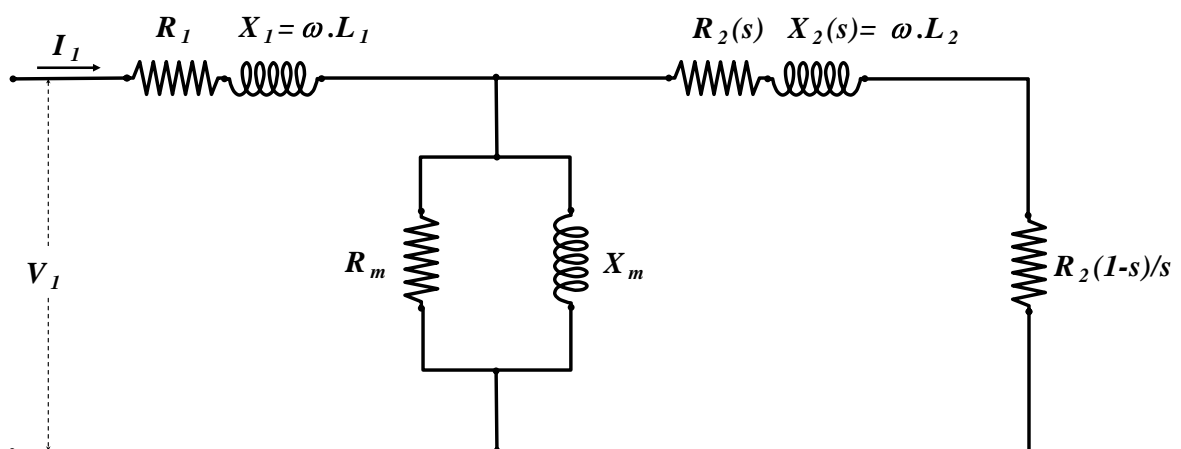


Figura 60 – Circuito equivalente do motor trifásico para um escorregamento s qualquer

Onde,

V_1 - Tensão aplicada por fase (V)

I_1 – Corrente do estator (A)

R_1 - Resistência do enrolamento do estator/fase (Ω)

X_1 – Reatância do enrolamento do estator (Ω)

R_m – Resistência para representação das perdas no ferro (Ω)

X_m – Reatância para representação do fluxo magnético principal (Ω)

$R_2(s)$ – Resistência do enrolamento do rotor variável com o escorregamento, referida ao estator (Ω)

$X_2(s)$ – Reatância do enrolamento do rotor para frequência correspondente a rotor bloqueado, com indutância variando com o escorregamento, valor referido ao estator (Ω)

S – Escorregamento

4.7.1 Parâmetros série obtidos pelo ensaio de rotor bloqueado

Os dados obtidos para este ensaio estão apresentados na **Tabela 2**. As correntes, tensões e potências foram então calculadas por fase, assim como seus parâmetros mostrados na **Tabela 6**. A linha hachurada na tabela corresponde à situação de operação nominal do motor.

Como o motor é de classe A, as reatâncias X_1 e X_2 foram consideradas de mesmo valor, ou seja, iguais à metade da reatância total. [Erro! Fonte de referência não encontrada.](#)

Tabela 6 – Parâmetros série do circuito equivalente

	Média por fase					Parâmetros Série								
	Corrente	Tensão	Potências			Resistências (Ω)			Reatâncias (Ω)		Indutâncias (H)		Impedância (Ω)	
Rcc (Ω)	I_{fc} (A)	V_{fc} (V)	P_{fc} (W)	Q_{fc} (var)	S_{fc} (VA)	RT	R1	R2	XT	X1	X2	L1	L2	Z _{curto}
39,4	0,101	17,35	0,76	1,58	1,75	84,02	47,43	36,59	155,18	77,59	77,59	0,206	0,206	172,19
39,4	0,201	28,32	2,88	4,91	5,70	80,30	47,43	32,87	121,39	60,70	60,70	0,161	0,161	140,77
39,4	0,303	38,96	6,56	9,83	11,82	80,52	47,43	33,09	106,82	53,41	53,41	0,142	0,142	128,43
39,4	0,406	49,52	11,90	16,18	20,09	81,67	47,43	34,24	98,38	49,19	49,19	0,130	0,130	122,11
39,4	0,498	58,82	18,00	23,08	29,27	82,16	47,43	34,73	93,23	46,61	46,61	0,124	0,124	118,23
39,4	0,601	69,20	26,45	32,13	41,62	82,69	47,43	35,26	88,84	44,42	44,42	0,118	0,118	115,07
39,4	0,699	79,13	35,98	42,05	55,34	83,12	47,43	35,69	85,96	42,98	42,98	0,114	0,114	113,14
39,4	0,793	88,70	46,81	52,56	70,38	84,01	47,43	36,58	83,47	41,73	41,73	0,111	0,111	111,78
39,4	0,800	89,12	47,19	53,50	71,34	83,22	47,43	35,79	83,50	41,75	41,75	0,111	0,111	111,34
39,4	0,843	93,51	52,66	58,64	78,81	83,71	47,43	36,28	82,54	41,27	41,27	0,109	0,109	110,95

Obs.: Rcc medido na temperatura ambiente (Ta) de 22,6 °C e RT calculado para temperatura de operação (Top), 75 °C.

A partir dos dados mostrados na **Tabela 6** é possível montar o circuito equivalente série identificado na **Figura 61**.

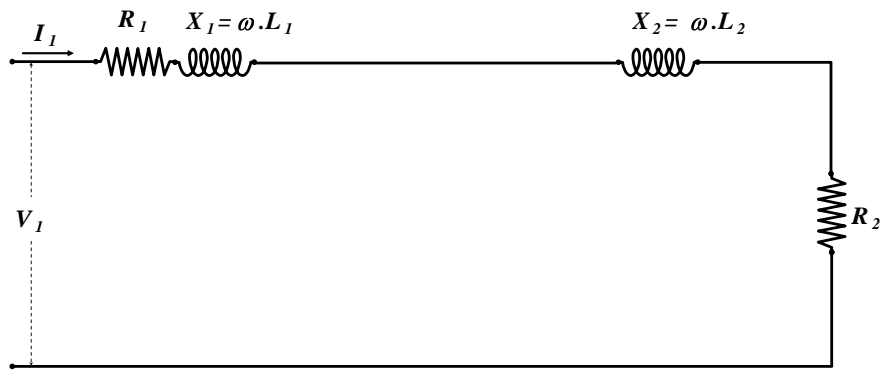


Figura 61 – Circuito equivalente para rotor bloqueado

4.7.2 Parâmetros mútuos pelo ensaio a vazio

Os dados obtidos para este ensaio estão apresentados na **Tabela 3**. As correntes, tensões e potências foram então calculadas por fase, assim como seus parâmetros mostrados na **Tabela 6**. A linha hachurada na tabela corresponde à situação de operação nominal do motor.

Nestas condições, a potência consumida pelo motor está suprindo as perdas Joule no estator, as perdas no ferro e as perdas rotacionais (atrito, ventilação e suplementares). Tomam-se leituras de tensão e corrente, se possível nas três fases, e de potência trifásica. Deve-se transformar os valores lidos em valores por fase: V_{fv} , I_{fv} , P_{fv} .

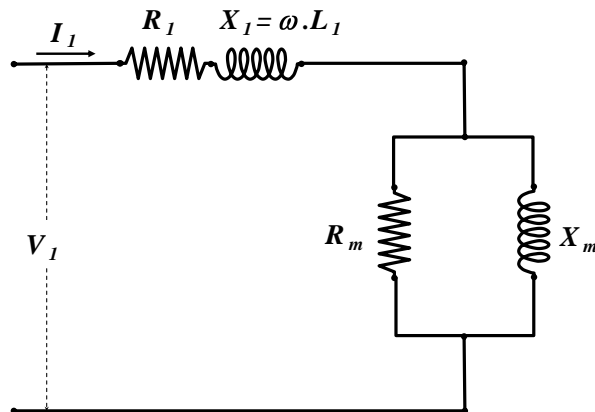


Figura 62 – Circuito equivalente para o ensaio em vazio

Os dados obtidos para este ensaio estão apresentados na **Tabela 3**. As correntes, tensões e potências foram então calculadas por fase, assim como seus parâmetros mostrados na **Tabela 7**. A linha hachurada da tabela corresponde à situação de operação nominal.

Foi necessário obter uma estimativa da reatância primária em relação a corrente, através do ensaio de curto, para que fosse possível efetuar um cálculo mais preciso da potência reativa mútua. A **Figura 63** mostra a equação para estimativa da reatância.

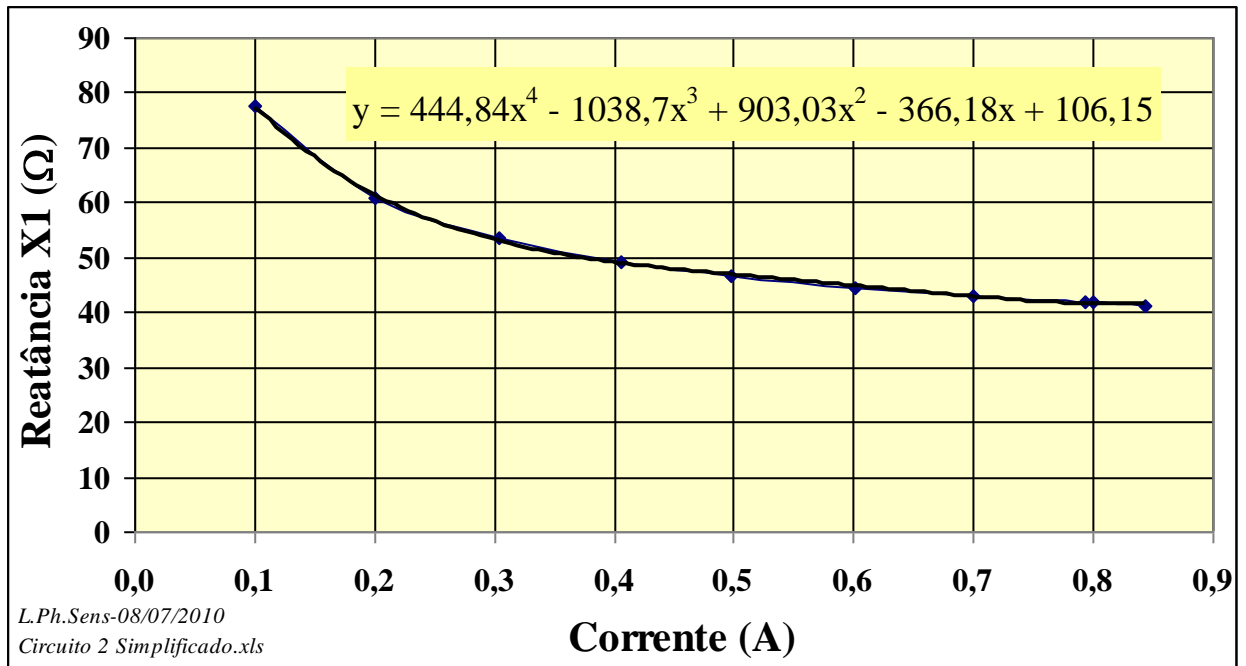


Figura 63 – Estimativa da reatância em relação a corrente

Tabela 7 – Parâmetros mútuos do circuito equivalente

Operação		Média por fase					Tensão mútua	Potências mútuas por fase			Parâmetros Mútuos				Reatância Estimada
T (°C)	R (Ω)	I _{fv} (A)	V _{fv} (V)	P _{fv} (Ω)	Q _{fv} (var)	S _{fv} (VA)	V _{muf} (V)	P _{muf} (Ω)	Q _{muf} (var)	S _{muf} (VA)	R _m (Ω)	X _m (Ω)	Z _m (Ω)	L _m (H)	X1 (Ω)
44,2	42,7	0,776	220	42,9	165	171	182	17,1	140	141	1933	236	234	0,627	41,71
44,2	42,7	0,672	201	34,6	130	135	167	15,3	111	112	1808	250	248	0,664	43,38
44,0	42,7	0,584	181	25,9	102	106	150	11,3	87,0	87,7	1995	260	258	0,689	45,15
44,0	42,7	0,506	161	20,0	78,7	81,2	133	9,05	66,7	67,3	1959	266	263	0,705	46,67
43,4	42,6	0,436	141	15,1	59,5	61,4	117	7,05	50,4	50,8	1932	271	268	0,718	48,15
44,2	42,7	0,372	120	11,0	43,5	44,8	99,1	5,12	36,5	36,9	1921	269	266	0,714	49,94
44,6	42,8	0,310	101	7,90	30,2	31,2	81,9	3,78	25,1	25,4	1774	267	264	0,708	52,57
44,4	42,7	0,251	80,9	5,53	19,6	20,3	64,6	2,83	16,0	16,2	1475	261	257	0,692	56,44
43,8	42,6	0,189	60,1	3,23	10,9	11,3	46,6	1,71	8,64	8,80	1269	251	247	0,667	62,76
42,2	42,4	0,124	39,4	1,33	4,71	4,89	29,4	0,679	3,58	3,65	1270	241	236	0,638	72,71
41,0	42,2	0,071	19,5	0,387	1,32	1,38	13,0	0,175	0,901	0,918	961	186	183	0,494	84,38
40,0	42,1	0,037	9,74	0,107	0,348	0,364	5,95	47,9E-03	0,217	0,222	739	163	159	0,432	93,67

Obs.: R_{cc}=39,4Ω medida na temperatura ambiente (Ta) de 22,6 °C. A resistência elétrica R, da bobina de cobre foi calculada para a temperatura de operação T.

Com todos os parâmetros calculados, conforme procedimentos descritos em 3.5, pode-se agora montar o circuito equivalente final para o motor de indução trifásico para condição nominal de operação, mostrado na Figura 64.

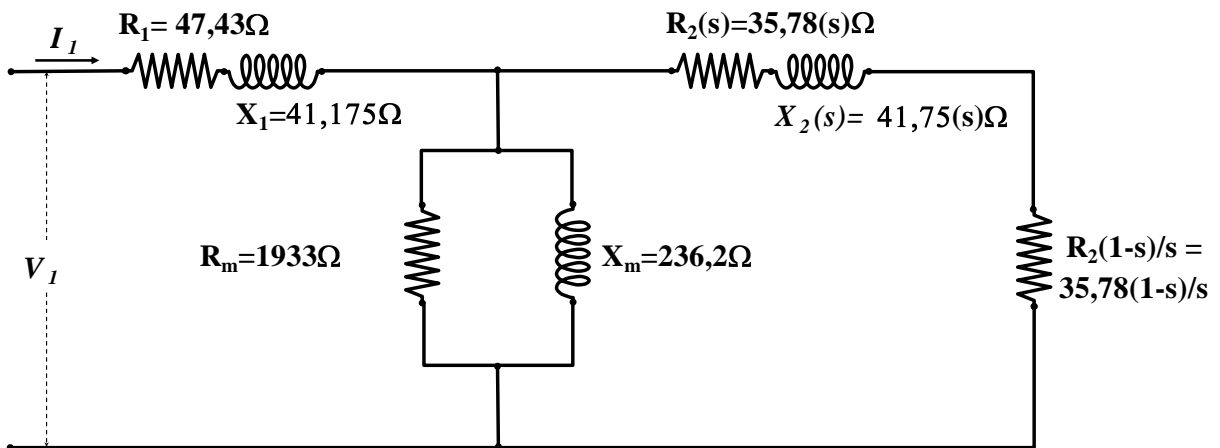


Figura 64 – Circuito equivalente do motor trifásico na condição nominal de operação

Para validação do circuito equivalente encontrado, é então feito um ensaio de carga teórico, utilizando-se para esta operação o software Excel, onde as funções utilizadas são mostradas no **ANEXO - PROGRAMAÇÃO AUXILIAR EM VBA**.

O torque e rendimento teóricos para diferentes valores de escorregamento são comparados graficamente com os valores reais encontrados pelo ensaio de carga prático, como mostrado na **Figura 65**.

O ensaio de carga prático foi realizado com a temperatura do motor em 68° C, assim os parâmetros do circuito equivalente foram recalculados para esta temperatura.

A **Tabela 8** mostra os parâmetros do circuito equivalente em relação à temperatura de 75 °C e a **Tabela 9** mostra o comportamento teórico trifásico do motor.

Tabela 8 – Parâmetros do circuito equivalente em relação a temperatura de operação

Ta(°C)	Top(°C)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	X1 (Ω)	X2 (Ω)	Rm (Ω)	Xm (Ω)
22,6	75	47,4302	35,78867	41,75	41,75	1933,12	236,22

Tabela 9 – Ensaio de carga teórico

rpm	s	Rcarga (Ω)	Req (Ω)	Pe (W)	Xeq (Ω)	Zeq (Ω)	I(A)	Rendimento η(%)	Torque (N.m)	Pm (W)
1200	0,00	35,79E+12	75,9	135,8	274,5	284,8	1,338	2,02E-09	20,0E-12	2,75E-09
1190	0,008	4258,85	88,0	157,7	270,7	284,6	1,339	14,2	0,163	22,4
1180	0,017	2111,53	99,3	179,4	265,5	283,4	1,345	24,3	0,319	43,6
1170	0,025	1395,76	109,5	201,0	259,1	281,3	1,355	31,7	0,467	63,8
1160	0,033	1037,87	118,6	222,3	251,8	278,4	1,369	37,3	0,609	82,9
1150	0,042	823,14	126,5	243,4	243,9	274,8	1,387	41,5	0,744	101
1140	0,050	679,98	133,2	264,1	235,6	270,6	1,408	44,6	0,873	118
1130	0,058	577,73	138,7	284,6	227,0	266,0	1,432	47,0	1,00	134
1120	0,067	501,04	143,1	304,6	218,4	261,1	1,459	48,8	1,11	149
1110	0,075	441,39	146,4	324,3	210,0	256,0	1,488	50,1	1,22	162
1100	0,083	393,68	148,9	343,6	201,8	250,8	1,519	51,0	1,33	175
1090	0,092	354,63	150,5	362,5	194,0	245,5	1,552	51,7	1,43	187
1080	0,100	322,10	151,5	381,0	186,5	240,3	1,586	52,1	1,53	198
1070	0,108	294,57	151,9	399,0	179,4	235,1	1,621	52,2	1,62	208
1060	0,117	270,97	151,8	416,6	172,8	230,0	1,657	52,3	1,70	218
1050	0,125	250,52	151,3	433,7	166,6	225,1	1,693	52,2	1,79	226
1040	0,133	232,63	150,5	450,4	160,8	220,3	1,730	52,0	1,86	234
1030	0,142	216,84	149,5	466,6	155,5	215,7	1,767	51,7	1,94	241
1020	0,150	202,80	148,3	482,3	150,5	211,3	1,804	51,3	2,01	247
1010	0,158	190,25	146,9	497,6	145,9	207,0	1,841	50,8	2,07	253
1000	0,167	178,94	145,3	512,4	141,6	202,9	1,878	50,3	2,14	258
950	0,208	136,00	136,9	579,9	124,6	185,2	2,058	47,3	2,40	274
900	0,250	107,37	128,6	637,0	113,0	171,2	2,226	43,8	2,59	279
850	0,292	86,92	121,0	684,8	104,9	160,2	2,379	40,2	2,73	275
800	0,333	71,58	114,4	724,8	99,2	151,4	2,517	36,7	2,83	266
750	0,375	59,65	108,7	758,0	94,9	144,3	2,641	33,3	2,89	252
700	0,417	50,10	103,8	785,6	91,7	138,5	2,751	30,0	2,92	236
650	0,458	42,30	99,5	808,5	89,3	133,7	2,850	27,0	2,93	218
600	0,500	35,79	95,8	827,5	87,4	129,7	2,939	24,1	2,92	199
550	0,542	30,28	92,6	843,2	85,9	126,3	3,018	21,3	2,89	180
500	0,583	25,56	89,7	856,3	84,6	123,4	3,089	18,8	2,86	161
450	0,625	21,47	87,2	867,2	83,6	120,8	3,153	16,4	2,82	142
400	0,667	17,89	85,0	876,3	82,8	118,7	3,211	14,1	2,77	124
350	0,708	14,74	83,0	883,8	82,1	116,8	3,264	12,0	2,72	106
300	0,750	11,93	81,2	890,1	81,6	115,1	3,311	9,96	2,67	88,6
250	0,792	9,42	79,5	895,3	81,1	113,6	3,355	8,06	2,62	72,2
200	0,833	7,16	78,1	899,6	80,7	112,2	3,395	6,27	2,56	56,4
150	0,875	5,11	76,7	903,1	80,3	111,0	3,432	4,57	2,50	41,3
100	0,917	3,25	75,5	906,0	80,0	110,0	3,465	2,97	2,45	26,9
50	0,958	1,56	74,3	908,4	79,7	109,0	3,496	1,44	2,39	13,1
0	1,000	0,00	73,3	910,4	79,5	108,1	3,525	0,00	2,34	00,0

Observação: A linha hachurada destaca a situação de operação nominal do motor.

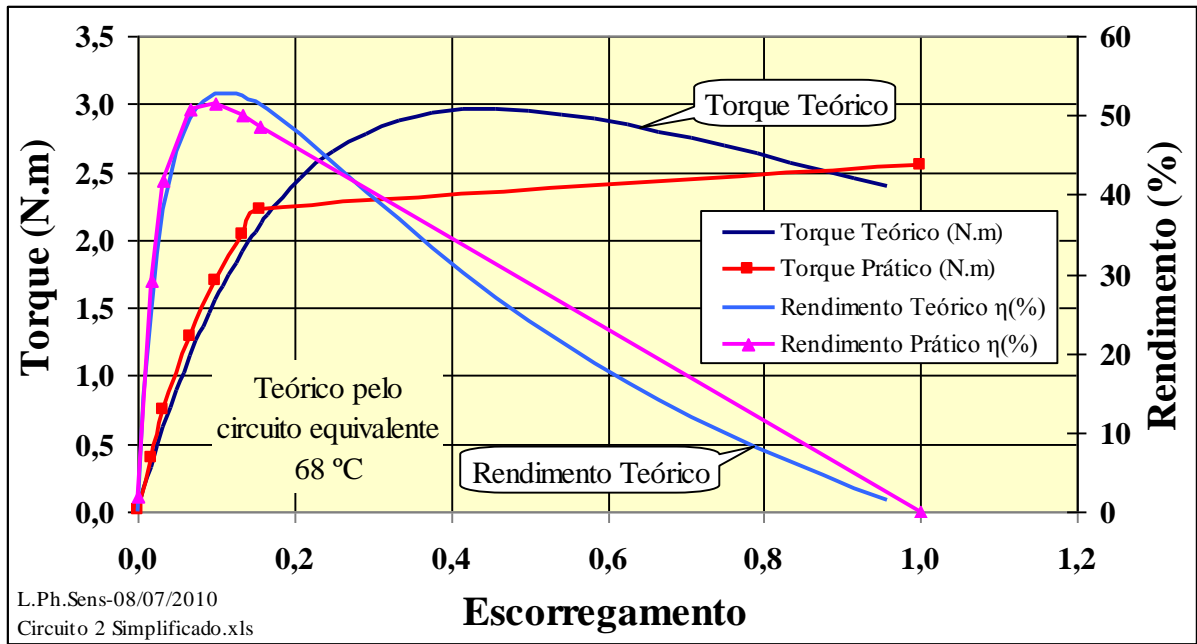


Figura 65 – Curvas de torque e rendimento teóricos e práticos

Para valores de escorregamento entre 0 e 0,20, as curvas teóricas e práticas são praticamente iguais. Após isso, devido à impossibilidade de obtenção de dados, a curva experimental foi extrapolada até $s=1$, valor no qual o torque pode ser medido. Comprova-se desta maneira que o circuito equivalente é válido para representar os enrolamentos do motor trifásico ensaiado.

CAPÍTULO 5 ENSAIO EM ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA COM CAPACITOR

Este capítulo apresenta os ensaios realizados no motor de indução trifásico utilizando-se da ligação Steinmetz, **Figura 66**, para identificação do capacitor que melhor balanceasse o sistema, apresentando assim condições para o seu funcionamento.

Os ensaios foram realizados em laboratório, sob temperatura ambiente (23 ± 2) °C, utilizando a rede de alimentação trifásica ajustada por um variac trifásico manual. O sistema de ensaio para todas as modalidades neste trabalho foi o mesmo descrito em **CAPÍTULO 2**, página **15**. A amostra do motor trifásico está descrita em **2.1.1**, página **16**. O banco de capacitores utilizados foi conforme **Figura 15**.

Os itens **5.1** e **5.2** são ensaios preliminares, tomando como base somente o desequilíbrio das correntes do motor em relação a sua partida e seu funcionamento em carga. O fator de desequilíbrio foi adquirido através do analisador de potência, descrito em **2.2.1**, página **23**, que neste caso usa o método NEMA para seu cálculo.

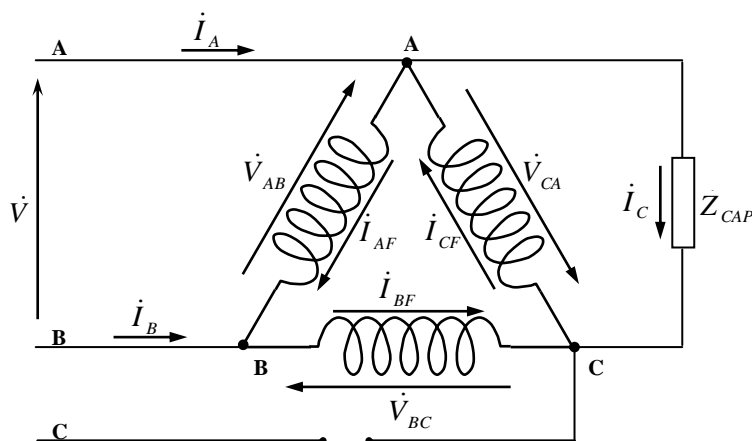


Figura 66 – Esquema steinmetz de ligação

5.1 Escolha do capacitor para partida do motor

5.1.1 Ensaio de rotor bloqueado na corrente nominal

O objetivo deste ensaio foi a identificação do capacitor que resultava em menor desbalanço entre as correntes e sem riscos de danos ao motor, limitando a corrente ao valor nominal. Os resultados são mostrados na **Tabela 10**, para capacitores de 4 a 70 μ F aproximadamente. Na mesma tabela são exibidos os torques medidos com o sistema Ono Sokki, descrito em **2.1.4** e **2.2.3**, nas páginas **20** e **24**.

Foram obtidos os desbalanços das tensões e das correntes, através do analisador de potência PS3000, descrito em **2.2.1**, na página **23**.

Tabela 10 – Escolha do melhor capacitor na partida em tensão reduzida

Rotor Bloqueado na corrente nominal			Desbalanço	
N	C(μ F)	Torque (N.m)	em V(%)	em I(%)
1	3,954	0,007	**	**
2	5,300	0,013	31,80	88,50
3	5,954	0,016	26,90	87,00
4	7,879	0,028	25,90	82,20
5	15,94	0,088	7,880	61,63
6	23,85	0,171	12,38	41,63
7	31,74	0,267	27,15	23,23
8	32,74	0,278	28,29	23,31
9	39,82	0,338	36,30	14,00
10	40,70	0,340	37,00	12,90
11(*)	40,70	1,831	28,49	21,81
12	40,90 (***)	0,344	37,50	12,67
13	42,70	0,352	38,44	13,42
14	46,62	0,362	40,64	16,79
15	47,70	0,366	41,15	17,47
16	55,77	0,351	43,22	24,45
17	63,71	0,322	43,17	30,80
18	71,60	0,279	39,18	35,68
Obs.:	(*) Ensaiado na tensão de 220V, em 14/01/2010. (**) Não foi possível a medição, correntes muito baixas. (***) Capacitor com menos desbalanço entre correntes.			

5.1.2 Ensaio de rotor bloqueado na tensão nominal

O objetivo deste ensaio foi a identificação do capacitor que resultava em menor desbalanço entre as correntes e, a avaliação do torque de partida na tensão nominal.

O ensaio anterior foi repetido na tensão nominal, entretanto as leituras foram feitas rapidamente, para evitar sobreaquecimento do motor, salvando-se as ondas de tensão e corrente para posterior análise do desbalanço. Com os resultados foi possível a identificação do melhor capacitor para a partida do motor na tensão nominal, conforme mostrados na **Tabela 11**, para capacitores de 4 a 70 μ F aproximadamente. Na mesma tabela são exibidos os torques medidos com o sistema Ono Sokki, descrito em **2.1.4** e **2.2.3**, nas páginas **20** e **24**.

Foram obtidos os desbalanços das tensões e das correntes, através do analisador de potência PS3000, descrito em **2.2.1**, na página **23**.

Tabela 11 – Escolha do melhor capacitor na partida em tensão nominal

Rotor Bloqueado com tensão de 220V			Desbalanço	
N	C(μF)	Torque (N.m)	em V (%)	em I (%)
1	3,954	0,056	37,17	92,30
2	5,300	0,072	33,43	89,50
3	5,954	0,107	31,26	88,02
4	7,879	0,165	24,84	83,74
5	15,94	0,445	11,87	65,80
6	23,85	0,929	5,660	48,27
7	31,74	1,366	18,57	33,52
8	39,82	1,705	27,66	22,60
9	47,70 (*)	1,951	32,70	18,69
10	55,77	1,948	35,34	24,12
11	63,71	1,936	35,29	28,72
12	71,60	1,778	36,36	33,18
Obs.:	(*) Capacitor de menos desbalanço entre correntes. Ensaiado em 15/01/2010.			

A **Figura 67** mostra o comportamento do motor na partida sob carga mínima com capacitor de 47,7μF, medidos com o sistema Ono Sokki, descrito em 2.1.4 e 2.2.3, nas páginas 20 e 24 e pelo osciloscópio descrito em 2.2.4, na página 25.

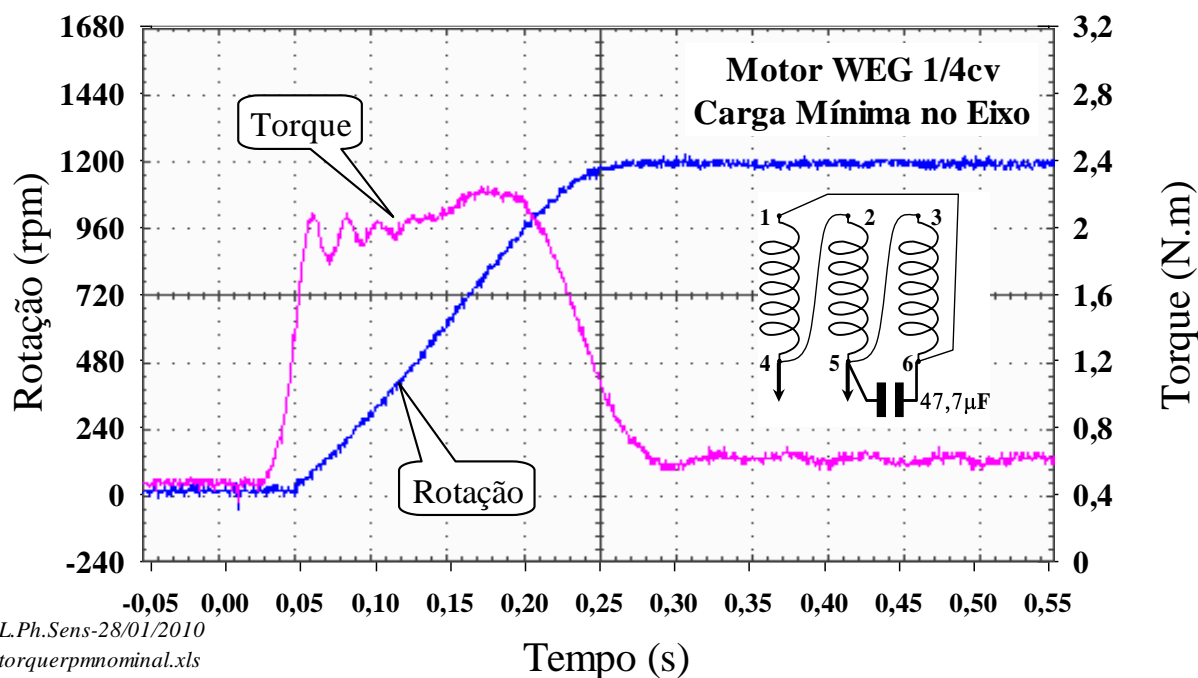


Figura 67 – Partida do motor em carga mínima com capacitor de 47,7 μF

A **Figura 68** mostra o comportamento do motor alimentado com uma das fases através de um capacitor de $40,7\mu\text{F}$ durante a partida em carga mínima.

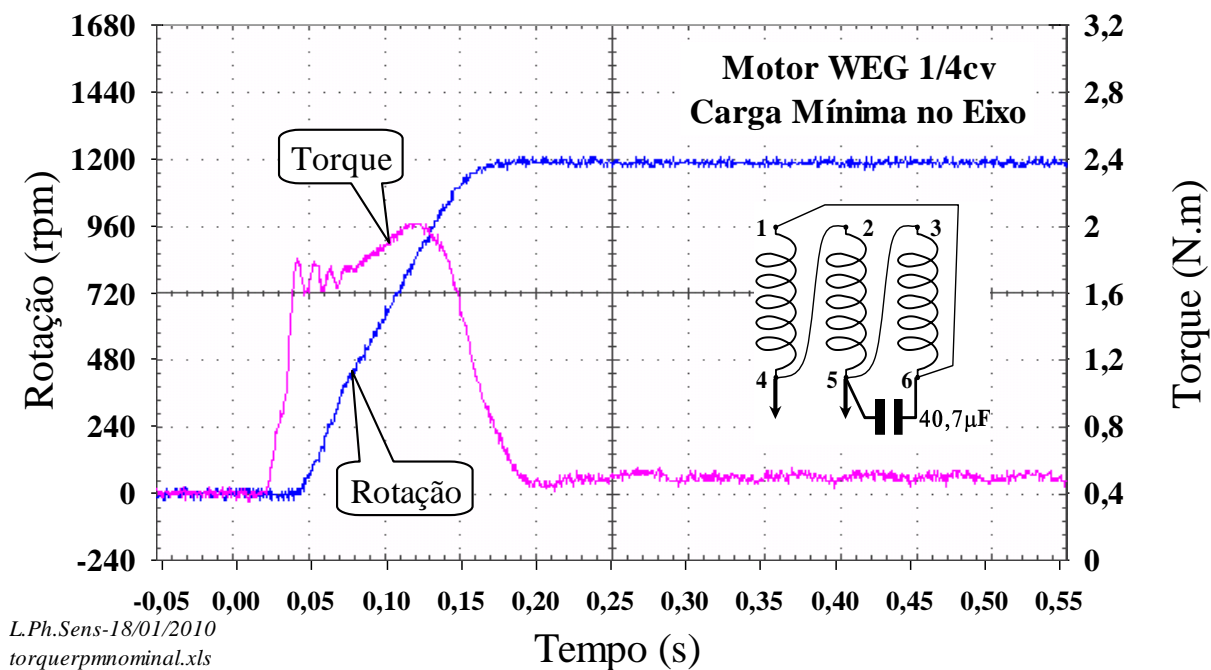


Figura 68 – Partida do motor em carga mínima com capacitor de $40,7\mu\text{F}$

5.2 Escolha do capacitor para operação do motor em carga

5.2.1 Escolha do capacitor para operação do motor em carga mínima

O objetivo deste ensaio foi a identificação do capacitor que resultava em menor desbalanço entre as correntes sob carga mínima, na tensão nominal. O motor foi acionado com carga mínima, ou seja, somente acoplado ao torquímetro e ao motor de corrente contínua desligado. O ensaio foi efetuado para diferentes valores de capacitância. Após a estabilização dos torques e rotações, os mesmos foram registrados pelo sistema Ono Sokki, descrito em 2.1.4 e 2.2.3, nas páginas 20 e 24, conforme Tabela 12.

Foram obtidos os desbalanços das tensões e das correntes, através do analisador de potência PS3000, descrito em 2.2.1, na página 23.

Tabela 12 – Desbalanço entre correntes em carga mínima

Capacitor (μF)	Rotação (rpm)	Torque (N.m)	Potência Pm (W)	Desbalanço	
				em I (%)	em V (%)
3,950	1180	0,282	34,85		
5,300	1183	0,282	34,94		
7,870	1187	0,282	35,05	47,14	36,33
15,94	1191	0,282	35,17	27,61 (*)	57,83
17,94	1192	0,282	35,20	31,30	61,82
23,85	1188	0,282	35,08	35,55	69,38
25,70	1188	0,221	27,49	38,79	70,85
26,70	1189	0,282	35,11	39,82	71,10
27,70	1188	0,282	35,08	41,20	72,10
31,74	1183	0,282	34,94		
32,74	1183	0,282	34,94	45,63	74,43
33,74	1182	0,282	34,91		
39,82	1173	0,282	34,64		
40,70	1172	0,282	34,61		
47,70	1155	0,282	34,11	71,36	70,43
55,70	1133	0,282	33,46		
63,70	1108	0,282	32,72		
71,60	1086	0,282	32,07		
Obs.: Motor em carga mínima. (*) Menor desbalanço entre correntes.			Ensaiado em 19/1/2010 12:30h		

A **Figura 69** mostra o comportamento do motor na partida sob carga mínima e com capacitor de $17,94\mu\text{F}$

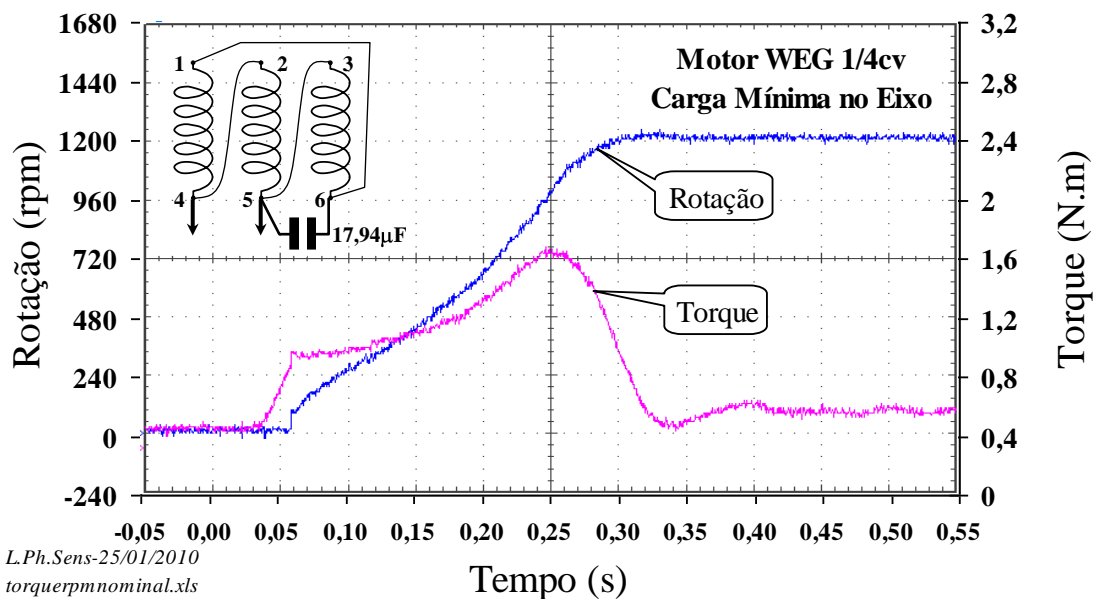


Figura 69 – Partida do motor em carga mínima com capacitor de $17,94\mu\text{F}$

5.2.2 Escolha do capacitor para operação do motor em carga nominal

O objetivo deste ensaio foi a identificação do capacitor que resultava em menor desbalanço entre as correntes sob carga nominal, na tensão nominal. O motor foi acionado com carga mínima e, após a estabilização da rotação, foi aplicada a carga nominal. A carga nominal foi aquela que resultaria na potência mecânica nominal de saída quando em alimentação trifásica. O ensaio foi efetuado para diferentes valores de capacitância. Após a estabilização dos torques e rotações, os mesmos foram registrados conforme **Tabela 13**.

Tabela 13 – Desbalanço entre correntes em carga nominal

Capacitor (μF)	Rotação (rpm)	Torque (N.m)	Potência Pm (W)	Desbalanço	
				em I (%)	em V (%)
3,950	0,000	0,2800	0,000		
5,300	0,000	0,3250	0,000		
7,870	0,000	0,4260	0,000	82,3	29,0
15,94	1020	1,793	191,5	40,4	32,0
17,94	1061	1,882	209,1	21,2 (*)	42,4
23,85	1095	1,910	219,0	37,1	56,5
25,70	1097	1,924	221,0	46,4	58,7
26,70	1096	1,920	220,4	50,8	59,3
27,70	1099	1,920	221,0	54,8	60,2
31,74	1075	1,884	212,1		
32,74	1065	1,862	207,7		
33,74	1065	1,822	203,2	72,1	62,66
39,82	1040	1,800	196,0		
40,70	1033	1,775	192,0		
47,70	880	1,759	162,1	64,27	52,2
55,70	280	1,555	45,59		
63,70	200	1,383	28,97		
71,60	145	1,250	18,98		
Observação: Motor em carga nominal, partindo em mínima. (*)Menor desbalanço entre correntes.			Ensaiado em 19/1/2010 12:30h		

O comportamento na partida do motor com o tempo sob carga nominal e com capacitor de 47,7 μF é mostrada na **Figura 70**.

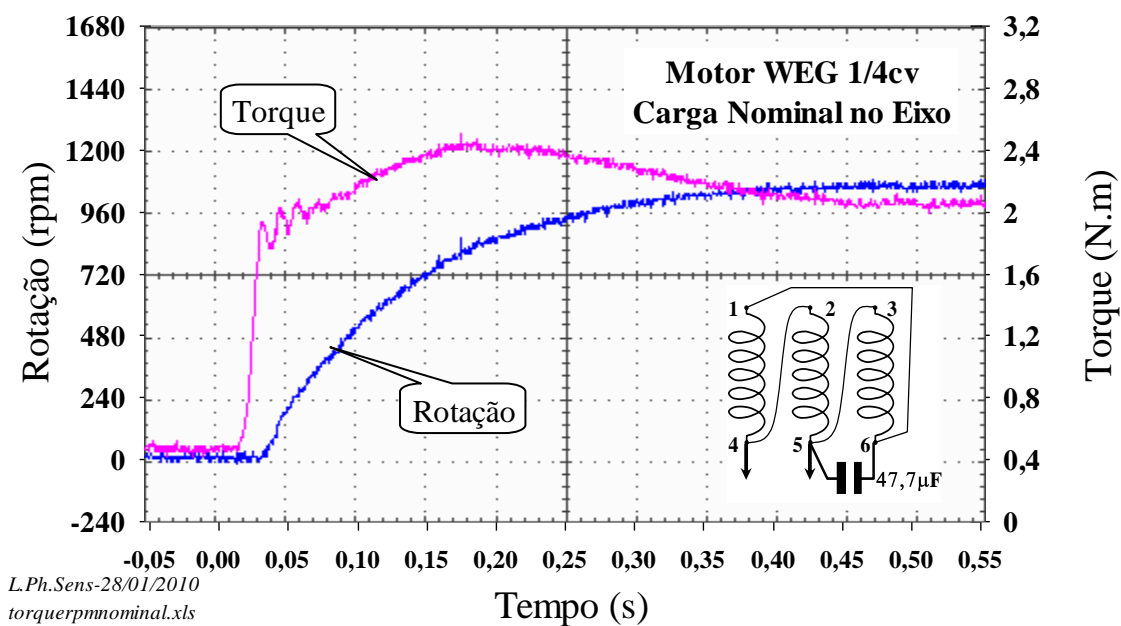


Figura 70 – Partida do motor em carga nominal com capacitor de 47,7 µF

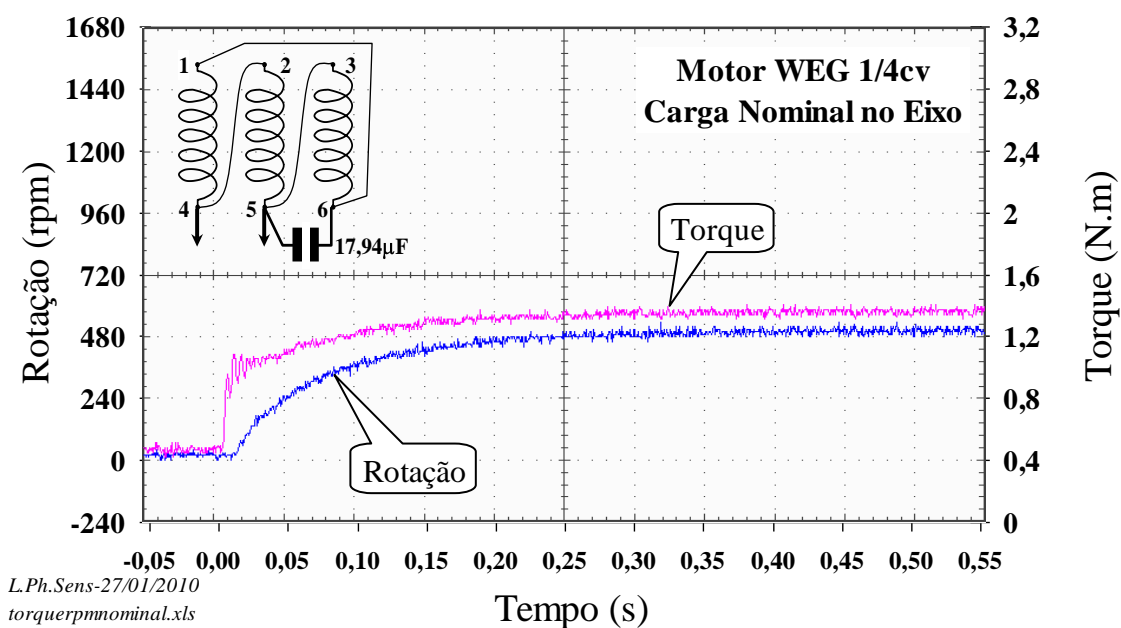


Figura 71 – Partida do motor em carga nominal com capacitor de 17,94 µF

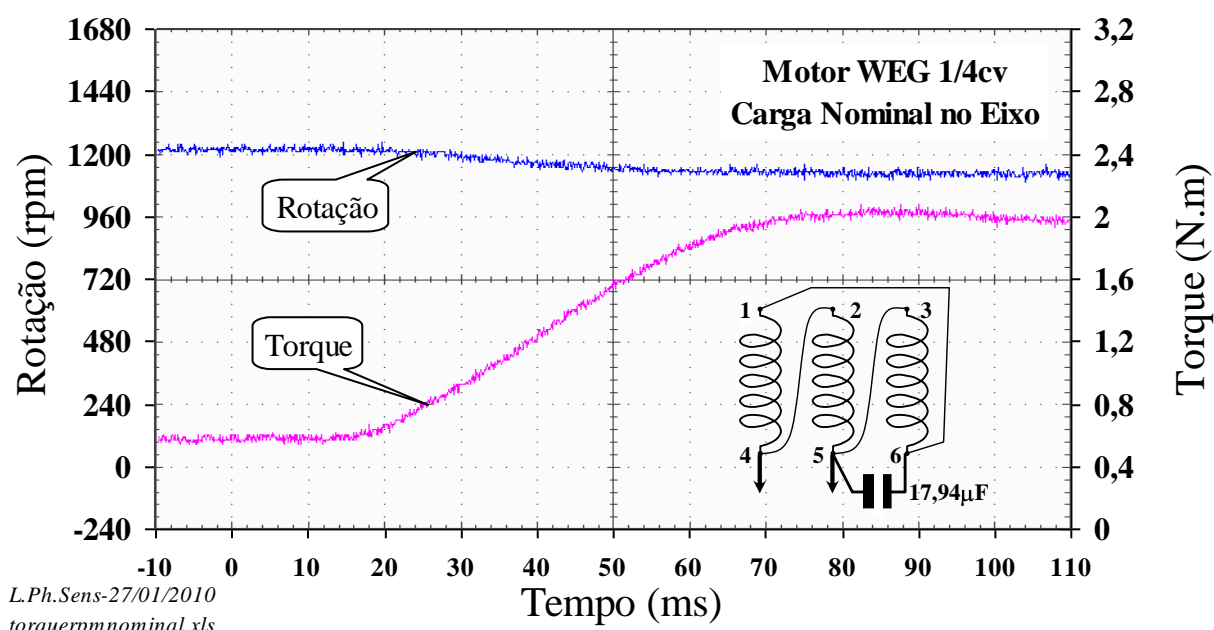


Figura 72 – Rotação e torque na aplicação da carga nominal

5.3 Ensaio sob carga do motor com capacitor

O objetivo deste ensaio é obter os parâmetros elétricos e mecânicos para servir como fonte de dados para os cálculos de balanceamento do motor através das componentes simétricas. Os capacitores usados foram de 40,7, 30, 20, 17 e 15 μF aproximadamente. As linhas hachuradas indicam a situação de menor desequilíbrio do sistema.

5.3.1 Motor com capacitor de 40,7 μF

Tabela 14 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 40,7 μF

Motor Indução	Corrente	Parâmetros Elétricos															
		Tensões (V)						Correntes de fase (A)						Potências			
WEG 1/4 cv	I	Vab	\angle Vab	Vbc	\angle Vbc	Vca	\angle Vca	Ia	\angle Ia	Ib	\angle Ib	Ic	\angle Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	f.p.
1	175,9	218,2	0	232,1	73	362,1	-142	2,03	167	0,53	-38	1,71	-18	542,4	1122	1246	0,435
2	168,6	219,0	0	213,0	70	353,7	-145	1,96	164	0,66	-26	1,46	-23	556,4	1007	1151	0,484
3	164,8	218,4	0	202,2	67	349,6	-148	1,91	163	0,74	-22	1,35	-26	568,9	944	1102	0,516
4	162,0	219,2	0	195,4	67	345,3	-149	1,88	163	0,78	-20	1,26	-27	569,1	904	1068	0,533
5	159,3	219,3	0	188,0	67	340,3	-149	1,86	162	0,84	-20	1,17	-28	573,7	862	1036	0,554
6	155,2	218,6	0	176,3	66	331,9	-151	1,82	162	0,93	-20	1,01	-30	581,2	797	986	0,589
7	148,2	219,3	0	157,7	68	315,3	-152	1,77	161	1,07	-21	0,75	-30	590,2	695	912	0,647
8	142,9	219,2	0	143,8	69	301,9	-154	1,73	162	1,17	-22	0,56	-26	601,5	615	860	0,699
9	145,6	219,8	0	125,9	85	263,2	-152	1,69	167	1,43	-28	0,41	30	637,9	501	811	0,787
10	152,5	219,6	0	124,1	92	247,5	-150	1,66	169	1,52	-30	0,51	51	648,8	484	809	0,802
11	159,0	219,7	0	121,6	98	235,0	-149	1,64	171	1,59	-31	0,62	62	655,7	478	811	0,808
12	163,9	219,4	0	121,8	102	226,8	-148	1,63	172	1,64	-32	0,71	68	659,0	479	815	0,809
13	167,3	219,1	0	120,2	105	220,8	-148	1,61	173	1,67	-34	0,78	70	656,3	483	815	0,805
14	170,9	219,6	0	122,1	109	214,1	-147	1,60	174	1,69	-33	0,85	74	662,3	482	819	0,809
15	172,7	219,0	0	121,9	110	210,9	-147	1,59	175	1,70	-34	0,89	75	661,7	480	818	0,809
16	174,4	219,1	0	123,0	113	205,7	-147	1,58	175	1,71	-34	0,94	77	658,0	482	816	0,807
Observações:	Ensaio de carga com capacitor de 40,7 μF . Temperatura ambiente: 22 ± 2 °C. Ensaio em 02/07/2010 11:20																

Tabela 15 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 40,7 μF

Motor Indução	Corrente	Parâmetros Mecânicos					Parâmetros calculados por componentes simétricas								Temp.
		WEG 1/4 cv	I	Torque	Slip	Rotação	Potência	Rendimento	Módulo Z1	Ângulo Z1	Capacitor	Kv	Ki	Kv Corrigido	
N	(%)	T (N.m)	(s)	(rpm)	Pm (W)	η (%)	(Ω)	(graus)	(μ F)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1	175,9	0,000	0,00	1200	0,000	0,00	226,7	71,2	20,3	40,3	93,2	8,18	18,91	44,6	
2	168,6	0,502	0,017	1180	62,03	11,15	242,3	67,0	19,0	42,7	102,1	5,01	11,97	48,4	
3	164,8	0,688	0,025	1170	84,30	14,82	251,0	63,5	18,3	44,7	106,8	2,47	5,90	54,0	
4	162,0	0,805	0,033	1160	97,79	17,18	256,5	61,1	17,9	44,8	109,2	0,79	1,94	59,0	
5	159,3	0,976	0,042	1150	117,5	20,49	258,3	59,5	17,8	45,5	110,7	0,38	0,93	61,6	
6	155,2	1,227	0,058	1130	145,2	24,98	259,3	54,3	17,7	46,4	111,4	4,08	9,79	64,0	
7	148,2	1,588	0,092	1090	181,3	30,71	251,9	48,1	18,2	46,6	108,3	8,96	20,84	66,0	
8	142,9	1,800	0,125	1050	197,9	32,91	237,7	41,6	19,3	46,9	100,5	14,69	31,46	69,0	
9	145,6	2,209	0,250	900	208,2	32,64	181,9	35,8	25,3	40,7	68,0	23,56	39,39	65,0	
10	152,5	2,181	0,333	800	182,7	28,16	164,9	35,5	27,9	37,4	57,0	25,61	39,07	66,0	
11	159,0	2,102	0,417	700	154,1	23,50	152,7	35,1	30,1	35,6	49,7	27,39	38,25	68,0	
12	163,9	2,015	0,500	600	126,6	19,21	145,3	35,2	31,6	34,1	45,0	28,26	37,33	70,0	
13	167,3	1,926	0,583	500	100,8	15,37	139,5	35,9	32,9	33,9	40,9	28,96	34,91	72,0	
14	170,9	1,856	0,667	400	77,74	11,74	135,6	35,6	33,9	32,6	38,9	29,04	34,58	74,0	
15	172,7	1,794	0,750	300	56,36	8,52	132,8	35,6	34,6	32,4	36,2	30,13	33,72	77,0	
16	174,4	1,740	0,833	200	36,44	5,54	130,4	35,9	35,2	32,1	34,9	29,92	32,55	79,0	
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 40,7 μ F. Temperatura ambiente: 22 \pm 2 $^{\circ}$ C. Ensaio em 02/07/2010 11:20													

5.3.2 Motor com capacitor de 30 μ F

Tabela 16 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 30 μ F

Motor Indução	Corrente	Parâmetros Elétricos															
		WEG 1/4 cv	I	Tensões (V)					Correntes de fase (A)					Potências			
N	(%)	Vab	\angle Vab	Vbc	\angle Vbc	Vca	\angle Vca	Ia	\angle Ia	Ib	\angle Ib	Ic	\angle Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	f.p.
1	162,3	217,2	0	271,1	97	324,9	-124	1,67	-176	0,69	-91	1,58	14	373,5	1056	1120	0,334
2	150,3	218,8	0	255,8	94	324,7	-128	1,68	-179	0,59	-71	1,38	10	415,0	938	1026	0,404
3	144,9	219,3	0	246,6	93	322,4	-130	1,66	179	0,58	-59	1,27	9	437,4	874	977	0,448
4	141,5	219,3	0	239,6	92	319,4	-132	1,65	178	0,60	-49	1,18	7	443,1	831	941	0,471
5	138,7	219,2	0	229,8	90	317,0	-134	1,64	177	0,64	-41	1,09	6	464,0	782	909	0,511
6	135,7	217,9	0	215,0	88	312,0	-137	1,62	176	0,73	-35	0,94	4	493,8	713	867	0,569
7	131,4	218,8	0	191,4	89	292,5	-139	1,58	174	0,91	-30	0,69	12	516,3	604	795	0,650
8	129,7	217,1	0	173,1	90	276,3	-141	1,53	174	1,05	-30	0,56	22	534,5	524	749	0,714
9	143,1	217,4	0	147,4	105	229,4	-142	1,45	174	1,37	-33	0,65	69	565,3	456	726	0,778
10	150,7	217,6	0	142,3	112	210,1	-141	1,40	174	1,49	-32	0,76	81	575,6	445	727	0,791
11	158,7	217,5	0	137,7	117	196,9	-142	1,37	175	1,61	-33	0,87	87	589,6	445	739	0,798
12	163,1	216,7	0	135,6	121	187,0	-142	1,35	176	1,66	-34	0,95	89	591,6	445	740	0,799
13	165,7	216,5	0	135,3	124	179,8	-141	1,33	176	1,69	-34	1,00	92	591,7	444	740	0,800
14	167,1	217,5	0	135,0	126	175,7	-142	1,33	177	1,69	-35	1,03	93	591,3	446	741	0,798
15	167,6	216,3	0	135,9	128	169,8	-141	1,31	177	1,69	-34	1,06	94	586,9	439	733	0,801
16	169,2	217,0	0	135,0	130	166,9	-142	1,30	177	1,71	-35	1,09	94	585,6	445	735	0,796
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 30 μ F. Temperatura ambiente: 22 \pm 2 $^{\circ}$ C. Ensaio em 07/07/2010 10:00															

Tabela 17 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 30 μ F

Motor Indução	Corrente	Parâmetros Mecânicos					Parâmetros calculados por componentes simétricas								Temp.
		WEG 1/4 cv	I	Torque	Slip	Rotação	Potência	Rendimento	Módulo Z1	Ângulo Z1	Capacitor	Kv	Ki	Kv Corrigido	
N	(%)	T (N.m)	(s)	(rpm)	Pm (W)	η (%)	(Ω)	(graus)	(μ F)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
1	162,3	0,000	0,00	1200	0,000	0,00	221,2	73,1	20,8	24,0	55,1	9,52	21,80	41,0	
2	150,3	0,590	0,017	1180	72,91	17,57	235,2	68,4	19,5	24,9	59,1	6,05	14,34	43,0	
3	144,9	0,840	0,025	1170	102,9	23,53	241,8	65,8	19,0	25,2	60,8	4,12	9,95	45,0	
4	141,5	1,025	0,033	1160	124,5	28,10	248,3	63,2	18,5	25,3	63,3	2,23	5,58	48,0	
5	138,7	1,228	0,042	1150	147,9	31,87	252,2	59,9	18,2	26,7	65,8	0,08	0,20	50,6	
6	135,7	1,514	0,058	1130	179,2	36,28	254,1	55,3	18,1	28,3	68,1	3,39	8,16	52,2	
7	131,4	1,904	0,092	1090	217,3	42,09	242,4	48,1	19,0	28,3	64,8	9,19	21,03	54,0	
8	129,7	2,066	0,125	1050	227,2	42,50	226,6	43,1	20,3	28,9	60,2	14,16	29,54	56,0	
9	143,1	2,234	0,243	909	212,7	37,62	174,7	37,9	26,3	25,2	41,9	22,02	36,68	54,0	
10	150,7	2,091	0,333	800	175,2	30,43	159,9	36,7	28,7	24,1	39,2	23,34	37,95	57,0	
11	158,7	1,940	0,417	700	142,2	24,12	146,5	35,7	31,4	25,7	36,6	26,64	38,04	58,0	
12	163,1	1,799	0,500	600	113,0	19,11	138,6	36,0	33,2	26,7	34,8	27,69	36,08	61,0	
13	165,7	1,672	0,583	500	87,55	14,80	134,7	36,3	34,1	26,9	34,6	27,51	35,45	63,0	
14	167,1	1,573	0,667	400	65,89	11,14	132,1	36,3	34,8	28,4	33,5	28,90	34,04	68,0	
15	167,6	1,488	0,750	300	46,75	7,96	130,4	36,4	35,2	28,3	33,5	27,91	33,04	71,0	
16	169,2	1,425	0,833	200	29,85	5,10	127,8	37,0	35,9	30,3	33,0	28,84	31,47	74,0	
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 30 μ F. Temperatura ambiente: 22 \pm 2 $^{\circ}$ C. Ensaio em 07/07/2010 10:00													

5.3.3 Motor com capacitor de 20µF

Tabela 18 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 20 µF

Motor Indução WEG 1/4 cv	Corrente I	Parâmetros Elétricos															
		Tensões (V)						Correntes de fase (A)						Potências			
		Vab	∠ Vab	Vbc	∠ Vbc	Vca	∠ Vca	Ia	∠ Ia	Ib	∠ Ib	Ic	∠ Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	f.p.
1	129,6	218,3	0	266,5	116	259,9	-113	1,05	-169	0,95	-95	1,14	42	212,4	755	785	0,271
2	118,8	216,8	0	252,7	112,0	262,8	-117	1,09	-171	0,79	-85	1,00	40	258,6	662	711	0,364
3	114,3	220,1	0	245,6	113,0	259,2	-119	1,10	-174	0,74	-78	0,93	43	274,4	619	677	0,405
4	111,5	218,4	0	237,2	110,0	259,6	-121	1,11	-174	0,72	-72	0,87	42	294,9	582	653	0,452
5	108,6	217,2	0	228,3	110,0	257,0	-123	1,11	-176	0,72	-68	0,81	43	305,5	546	625	0,489
6	106,7	217,7	0	215,3	110,0	247,1	-125	1,11	-178	0,76	-55	0,72	51	336,4	490	595	0,566
7	109,9	216,6	0	190,6	110,0	233,5	-130	1,11	179	0,92	-45	0,64	63	385,4	433	579	0,665
8	115,8	216,4	0	173,9	113,0	218,6	-133	1,10	176	1,07	-40	0,64	75	415,0	409	583	0,712
9	140,6	216,3	0	143,4	125,0	177,7	-139	1,07	170	1,48	-38	0,86	99	482,9	410	633	0,762
10	147,1	216,8	0	139,3	131,0	164,3	-140	1,06	169	1,57	-36	0,94	104	502,0	405	645	0,778
11	154,7	216,3	0	134,7	136,0	152,8	-142	1,04	169	1,69	-36	1,02	106	516,7	414	662	0,780
12	158,5	217,3	0	134,9	140,0	143,5	-143	1,03	168	1,74	-36	1,07	109	526,1	417	671	0,784
13	160,3	216,9	0	134,9	142,0	138,3	-143	1,03	168	1,76	-35	1,11	110	528,2	415	672	0,786
14	161,2	216,9	0	134,7	145,0	132,3	-144	1,02	168	1,76	-36	1,13	111	525,1	414	669	0,785
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 20 µF. Temperatura ambiente: 22 ± 2 °C. Ensaio em 07/07/2010 12:00															

Tabela 19 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 20 µF

Motor Indução WEG 1/4 cv	Corrente I	Parâmetros Mecânicos					Parâmetros calculados por componentes simétricas								Temp. °C
		Torque T (N.m)	Slip (s)	Rotação (rpm)	Potência Pm (W)	Rendimento η(%)	Módulo Z1 (Ω)	Ângulo Z1 (graus)	Capacitor (µF)	Kv (%)	Ki (%)	Kv Corrigido (%)	Ki Corrigido (%)		
1	129,6	0,000	0,00	1200	0,000	0,00	249,2	74,6	18,4	11,9	30,8	9,37	24,30	39,0	
2	118,8	0,536	0,017	1180	66,23	25,61	262,6	68,8	17,5	11,8	27,3	6,31	14,62	41,0	
3	114,3	0,788	0,025	1170	96,55	35,18	266,3	66,1	17,3	9,1	22,9	4,21	10,56	42,6	
4	111,5	0,970	0,033	1160	117,8	39,96	268,5	62,9	17,1	10,7	23,7	2,18	4,82	43,8	
5	108,6	1,130	0,042	1150	136,1	44,55	269,3	61,4	17,1	10,2	21,9	1,07	2,30	44,8	
6	106,7	1,410	0,058	1130	166,8	49,60	263,4	55,2	17,4	9,5	20,8	4,07	8,96	45,8	
7	109,9	1,730	0,092	1090	197,5	51,23	241,4	47,9	19,0	11,6	24,1	11,12	23,09	46,8	
8	115,8	1,850	0,125	1050	203,4	49,02	219,8	43,8	20,9	14,0	29,8	14,20	30,19	47,4	
9	140,6	1,788	0,250	900	168,5	34,90	164,1	38,7	28,0	24,5	41,8	22,03	37,54	42,0	
10	147,1	1,610	0,333	800	134,9	26,87	152,7	37,6	30,1	28,7	45,3	23,39	36,85	45,0	
11	154,7	1,444	0,417	700	105,9	20,49	139,6	37,1	32,9	33,7	47,0	25,90	36,16	47,0	
12	158,5	1,280	0,500	600	80,42	15,29	134,2	37,3	34,2	37,2	49,6	26,01	34,70	48,0	
13	160,3	1,153	0,583	500	60,37	11,43	131,1	37,0	35,1	38,6	49,9	26,45	34,15	52,0	
14	161,2	1,055	0,667	400	44,19	8,42	128,0	37,7	35,9	41,6	50,4	26,74	32,37	55,0	
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 20 µF. Temperatura ambiente: 22 ± 2 °C. Ensaio em 07/07/2010 12:00													

5.3.4 Motor com capacitor de 17µF

Tabela 20 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 17 µF

Motor Indução WEG 1/4 cv	Corrente I	Parâmetros Elétricos															
		Tensões (V)						Correntes de fase (A)						Potências			
N	(%)	Vab	∠ Vab	Vbc	∠ Vbc	Vca	∠ Vca	Ia	∠ Ia	Ib	∠ Ib	Ic	∠ Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	f.p.
1	115,2	217,3	0	254,8	120	238,8	-112	0,84	-172	0,96	-91	0,99	50	183,3	636	662	0,277
2	106,4	215,7	0	240,7	117	240,4	-116	0,88	-174	0,82	-83	0,88	50	219,0	559	600	0,365
3	103,3	217,1	0	233,0	116	238,8	-119	0,90	-175	0,78	-78	0,83	52	235,2	526	577	0,408
4	100,9	216,9	0	225,5	116	235,4	-120	0,91	-177	0,76	-72	0,77	55	253,0	493	554	0,457
5	99,8	215,6	0	217,5	114	234,8	-122	0,92	-178	0,76	-69	0,74	57	268,5	470	541	0,496
6	100,0	217,5	0	205,5	116	223,2	-124	0,94	179	0,81	-56	0,67	66	300,3	430	525	0,572
7	105,9	217,4	0	184,9	117	210,8	-129	0,96	175	0,97	-46	0,64	79	351,1	398	531	0,661
8	112,9	217,1	0	168,0	119	200,0	-133	0,96	173	1,11	-42	0,66	88	384,1	387	545	0,704
9	138,8	216,9	0	137,7	131	163,4	-141	0,96	166	1,52	-38	0,88	107	459,8	399	609	0,755
10	146,5	216,0	0	132,8	136	152,0	-143	0,96	165	1,63	-37	0,96	109	480,9	400	626	0,769
11	150,8	215,8	0	130,5	140	142,4	-144	0,96	164	1,68	-36	1,02	111	491,9	397	632	0,778
12	154,0	215,9	0	129,6	144	135,8	-146	0,95	164	1,73	-35	1,05	113	501,4	396	639	0,785
13	156,2	216,1	0	129,9	147	129,8	-146	0,95	164	1,75	-35	1,08	114	504,9	398	643	0,785
14	157,3	215,9	0	129,1	149	125,6	-148	0,95	164	1,76	-36	1,11	114	500,3	402	642	0,779
15	158,2	215,9	0	130,3	151	121,0	-148	0,94	164	1,76	-35	1,13	116	505,1	396	642	0,787
16	158,8	216,4	0	132,1	153	115,4	-149	0,94	164	1,76	-35	1,15	117	507,7	392	642	0,791
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 17 µF.Temperatura ambiente: 22 ± 2 °C. Ensaiado em 07/07/2010 14:00															

Tabela 21 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 17 µF

Motor Indução WEG 1/4 cv	Corrente I	Parâmetros Mecânicos					Parâmetros calculados por componentes simétricas								Temp. °C
		Torque T (N.m)	Slip (s)	Rotação (rpm)	Potência Pm (W)	Rendimento η(%)	Módulo Z1 (Ω)	Ângulo Z1 (graus)	Capacitor (µF)	Kv (%)	Ki (%)	Kv Corrigido (%)	Ki Corrigido (%)		
1	115,2	0,000	0,00	1200	0,000	0,00	263,7	74,5	17,4	9,27	25,2	8,64	23,52	41,0	
2	106,4	0,479	0,017	1180	59,19	27,03	275,6	69,0	16,7	7,23	17,2	5,81	13,86	42,0	
3	103,3	0,688	0,025	1170	84,30	35,84	278,6	65,4	16,5	5,47	12,9	3,38	7,97	42,8	
4	100,9	0,878	0,033	1160	106,7	42,16	278,6	62,9	16,5	4,76	8,3	2,32	4,04	43,8	
5	99,8	1,018	0,042	1150	122,6	45,66	276,5	60,3	16,6	6,05	6,1	0,39	0,39	44,4	
6	100,0	1,292	0,058	1130	152,9	50,91	266,8	54,7	17,2	4,59	11,0	4,75	11,43	44,8	
7	105,9	1,574	0,092	1090	179,7	51,17	242,2	47,8	19,0	9,52	24,6	9,20	23,76	45,0	
8	112,9	1,678	0,125	1050	184,5	48,04	219,3	43,6	20,9	14,88	32,8	14,03	30,91	45,6	
9	138,8	1,585	0,250	900	149,4	32,49	162,8	37,9	28,2	29,67	49,9	22,64	38,11	43,0	
10	146,5	1,426	0,333	800	119,5	24,84	148,7	37,3	30,9	34,55	52,2	24,75	37,41	45,2	
11	150,8	1,243	0,417	700	91,12	18,52	141,0	37,1	32,6	38,09	53,9	25,71	36,41	48,4	
12	154,0	1,090	0,500	600	68,49	13,66	135,0	36,3	34,0	42,42	55,7	27,38	35,96	50,0	
13	156,2	0,966	0,583	500	50,58	10,02	131,2	36,9	35,0	44,64	56,1	27,14	34,11	54,0	
14	157,3	0,876	0,667	400	36,69	7,33	127,7	37,4	36,0	47,71	56,2	28,00	32,98	56,0	
15	158,2	0,806	0,750	300	25,32	5,01	126,2	37,0	36,4	49,32	57,3	28,21	32,77	60,0	
16	158,8	0,747	0,833	200	15,65	3,08	124,4	37,2	36,9	51,84	57,9	28,18	31,50	62,0	
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 17 µF.Temperatura ambiente: 22 ± 2 °C. Ensaiado em 07/07/2010 14:00													

5.3.5 Motor com capacitor de 15µF

Tabela 22 – Parâmetros elétricos do ensaio de carga com capacitor de 15 µF

Motor Indução	Corrente	Parâmetros Elétricos															
		Tensões (V)						Correntes de fase (A)						Potências			
WEG 1/4 cv	I	Vab	∠ Vab	Vbc	∠ Vbc	Vca	∠ Vca	Ia	∠ Ia	Ib	∠ Ib	Ic	∠ Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	f.p.
N	(%)	Vab	∠ Vab	Vbc	∠ Vbc	Vca	∠ Vca	Ia	∠ Ia	Ib	∠ Ib	Ic	∠ Ic	Pe (W)	Q (var)	S (VA)	f.p.
1	109,5	218,4	0	248,2	123	223,7	-112	0,73	-174	1,01	-90	0,92	57	165	588	611	0,270
2	101,5	219,7	0	235,1	121	223,0	-116	0,77	-178	0,87	-83	0,82	60	198	519	556	0,356
3	99,3	220,2	0	228,2	121	222,4	-118	0,79	-179	0,84	-77	0,78	63	222	490	538	0,412
4	97,8	219,9	0	220,4	120	220,6	-120	0,81	180	0,82	-72	0,74	65	238	465	523	0,456
5	97,3	218,6	0	214,1	119	219,2	-121	0,82	179	0,83	-67	0,71	67	254	446	513	0,494
6	98,5	219,5	0	202,0	120	212,5	-124	0,84	176	0,87	-58	0,67	75	288	417	506	0,569
7	105,0	219,4	0	180,7	120	203,4	-130	0,87	173	1,01	-49	0,66	86	341	391	519	0,658
8	113,3	219,3	0	163,7	122	190,9	-134	0,89	170	1,16	-43	0,69	96	380	382	539	0,705
9	137,7	219,1	0	136,6	135	157,4	-142	0,91	163	1,54	-38	0,88	112	457	392	602	0,759
10	143,6	217,9	0	130,9	139	147,4	-144	0,92	162	1,61	-37	0,96	112	471	389	611	0,771
11	148,8	218,3	0	129,2	143	139,5	-146	0,92	161	1,69	-36	1,00	115	489	390	626	0,782
12	153,4	218,6	0	128,4	147	132,3	-148	0,92	161	1,75	-35	1,05	116	500	397	639	0,783
13	155,4	218,5	0	127,8	150	126,5	-149	0,92	161	1,77	-36	1,08	117	503	397	641	0,785
14	154,5	218,2	0	128,5	151	122,8	-150	0,91	162	1,74	-35	1,09	118	500	388	633	0,790
15	155,9	218,5	0	128,2	153	119,3	-151	0,91	162	1,75	-35	1,11	117	500	392	635	0,787
16	156,4	218,6	0	130,3	156	113,8	-152	0,91	161	1,76	-35	1,13	120	502	388	634	0,791
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 15 µF. Temperatura ambiente: 22 ± 2 °C. Ensaio em 08/07/2010 10:00															

Tabela 23 – Parâmetros mecânicos do ensaio de carga com capacitor de 15 µF

Motor Indução	Corrente	Parâmetros Mecânicos					Parâmetros calculados por componentes simétricas								Temp.
		Torque	Slip	Rotação	Potência	Rendimento	Módulo Z1	Ângulo Z1	Capacitor	Kv	Ki	Kv Corrigido	Ki Corrigido		
WEG 1/4 cv	I	T (N.m)	(s)	(rpm)	Pm (W)	η (%)	(Ω)	(graus)	(µF)	(%)	(%)	(%)	(%)	°C	
1	109,5	0,000	0,00	1200	0,000	0,00	269,4	74,4	17,1	8,0	26,9	7,11	23,94	42,0	
2	101,5	0,483	0,017	1180	59,68	30,20	281,0	69,1	16,4	4,2	16,6	3,74	14,82	44,0	
3	99,3	0,692	0,025	1170	84,79	38,18	282,0	65,6	16,3	2,0	10,8	1,69	9,17	44,8	
4	97,8	0,865	0,033	1160	105,1	44,12	280,8	62,6	16,4	0,1	7,1	0,06	4,46	45,0	
5	97,3	1,005	0,042	1150	121,0	47,73	277,5	60,0	16,6	1,3	6,3	0,01	0,04	45,8	
6	98,5	1,251	0,058	1130	148,0	51,40	267,7	55,1	17,2	4,7	15,0	3,21	10,18	46,4	
7	105,0	1,531	0,092	1090	174,8	51,18	242,3	47,9	19,0	11,6	28,2	9,98	24,33	46,6	
8	113,3	1,634	0,125	1050	179,7	47,31	217,5	42,9	21,1	17,2	38,6	14,55	32,63	46,8	
9	137,7	1,516	0,250	900	142,9	31,25	164,8	37,8	27,9	33,0	55,9	22,40	37,97	46,4	
10	143,6	1,352	0,333	800	113,3	24,04	151,8	37,4	30,3	37,4	56,3	24,75	37,25	48,0	
11	148,8	1,192	0,417	700	87,38	17,87	143,7	36,6	32,0	41,8	59,4	26,08	37,11	50,8	
12	153,4	1,042	0,500	600	65,47	13,09	135,8	36,2	33,8	46,2	60,3	27,60	36,07	53,2	
13	155,4	0,919	0,583	500	48,12	9,57	131,4	37,0	35,0	49,2	61,0	27,69	34,32	56,0	
14	154,5	0,830	0,667	400	34,77	6,95	130,7	36,1	35,1	50,8	60,7	28,89	34,53	62,0	
15	155,9	0,757	0,750	300	23,78	4,76	127,3	36,7	36,1	53,1	59,7	29,21	32,86	65,0	
16	156,4	0,694	0,833	200	14,54	2,90	126,2	36,9	36,4	56,3	62,7	28,78	32,06	67,0	
Observações:		Ensaio de carga com capacitor de 15 µF. Temperatura ambiente: 22 ± 2 °C. Ensaio em 08/07/2010 10:00													

CAPÍTULO 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Comportamento do motor sob carga em rede trifásica

Com os dados obtidos na [Tabela 5](#), página 55, foi obtido o comportamento em carga, como mostrado na [Figura 73](#).

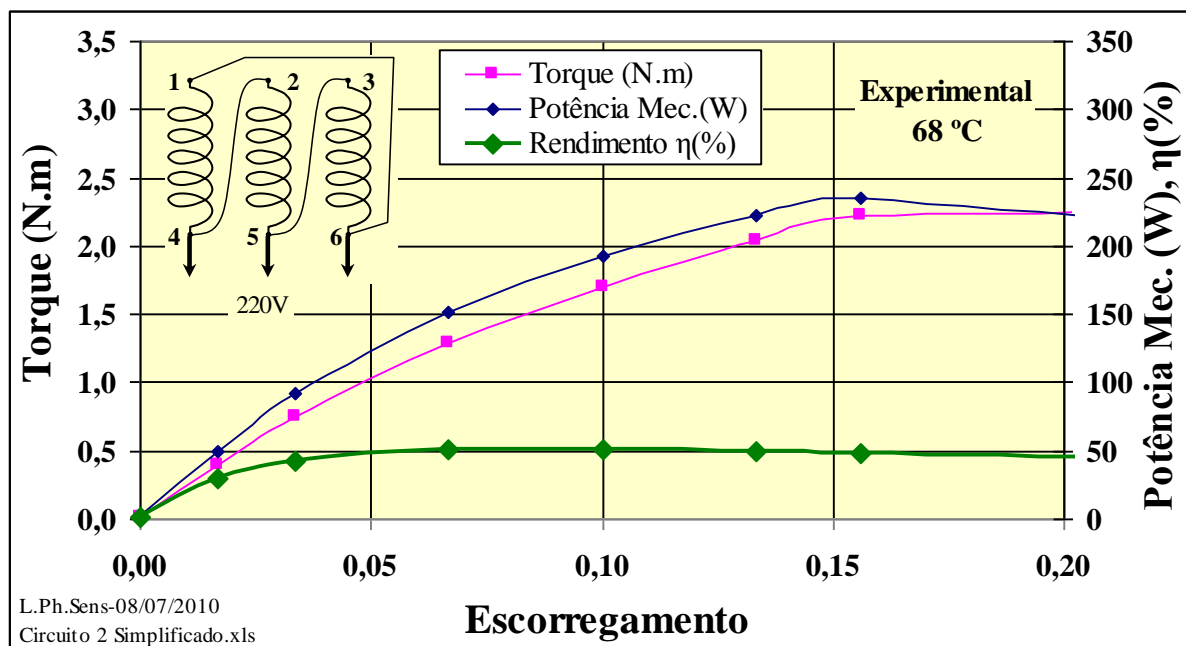


Figura 73 – Comportamento do motor sob carga em rede trifásica

A [Figura 73](#) mostra o torque, a potência e o rendimento do motor, entre os escorregamentos $s=0$ e $s=0,2$. O ponto a ser observado para comparação será o de escorregamento $s=0,1$, que é o ponto de operação nominal do motor. Pelo gráfico acima se observa que o rendimento não ultrapassa os 50% e que o torque nominal fica em torno de 1,7 Nm, valores coerentes com os prescritos em 2.1.1 na [Figura 4](#) da página 17.

Conforme mostrado na [Figura 51](#) e na [Figura 52](#) a tensão aplicada ao motor se apresenta praticamente senoidal, sendo o fator de potência de 63% com uma potência elétrica de 373 W. Já a corrente, como mostrado na [Figura 53](#), apresenta um pequeno desbalanço de 4,17%. Tanto a corrente quanto a tensão apresentam aproximadamente defasagens de 120° , conforme mostrado na [Figura 54](#).

A [Figura 55](#) apresenta a distorção harmônica total – THD da tensão de 2,45% e a [Figura 56](#) a distorção harmônica total da corrente de 2,05%. Ressalta-se que o motor foi alimentado por um variac, mostrado na [Figura 10](#), ou seja, uma condição real de operação.

No levantamento das características de rotação e torque com o tempo, na partida do motor com carga mínima, ou seja, apenas acoplado ao motor de corrente contínua e ao ventilador, como mostrado na **Figura 57**, observa-se que o motor leva 100 ms para atingir a rotação síncrona e 50ms para o torque máximo de 2,4 Nm. Observa-se também que a rotação cresce linearmente com o tempo.

Já na **Figura 58**, o motor partiu com a carga nominal aplicada e levou 300 ms para estabilização, onde o torque máximo de 2,8 Nm ocorreu em 130ms, se estabilizando em 2 Nm.

O motor foi acionado com carga mínima e em seguida aplicada a carga nominal, levando 60 ms para estabilização da rotação, também com um torque de 2 Nm, como mostrado na **Figura 59**.

6.2 Comportamento do motor sob carga em rede monofásica com capacitor

6.2.1 Análise pelo torque de partida do motor

Como primeira análise, foram realizados ensaios com diferentes capacitores (3,9 a 72 μ F) para obtenção daquele que resultasse no menor desbalanço entre correntes, respeitando-se a corrente máxima suportada pelo motor. O ensaio foi realizado então com uma tensão reduzida de apenas 60V entre fases.

Pelos resultados apresentados na **Tabela 10**, encontrou-se o capacitor de 40,9 μ F para o mínimo desbalanço de corrente, que resultou em 12,67%, como ilustrado na **Figura 74**.

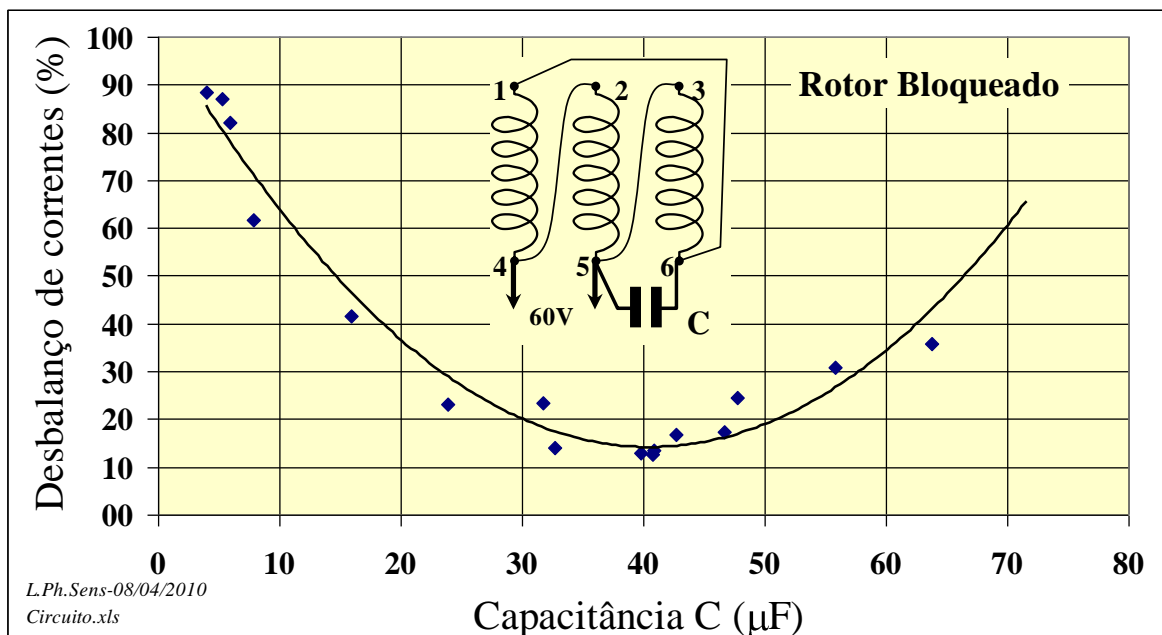


Figura 74 – Desbalanço de correntes com a capacitância para rotor bloqueado na corrente nominal

Um segundo ensaio foi realizado com a tensão nominal do motor. Pelos resultados apresentados na **Tabela 11**, encontrou-se o capacitor de $47,70 \mu\text{F}$ para o mínimo desbalanço de corrente, que resultou em 18,69%, como ilustrado na **Figura 75**.

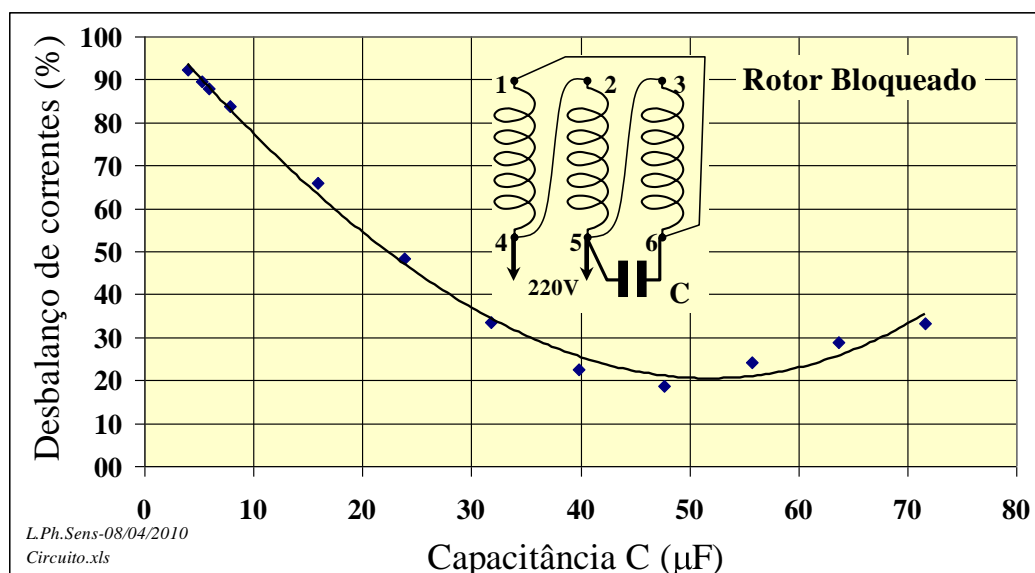


Figura 75 – Desbalanço de correntes com a capacitância para rotor bloqueado na tensão nominal

A **Figura 75** mostra que o mínimo de desbalanço seria obtido para uma capacitância de aproximadamente de $50 \mu\text{F}$. Conclui-se assim que o melhor capacitor a ser usado na partida do motor é o de $47,7 \mu\text{F}$.

6.2.2 Análise pela partida do motor em carga mínima

Como segunda análise foram realizados ensaios sob diferentes capacitores ($3,9$ a $72 \mu\text{F}$) para obtenção daquele que resultasse no menor desbalanço entre correntes na partida do motor em carga mínima. Pelos resultados apresentados na **Tabela 12** traçou-se um gráfico e pela sua linha de tendência, encontra-se o capacitor com o mínimo desbalanço de corrente, como ilustrado na **Figura 76**.

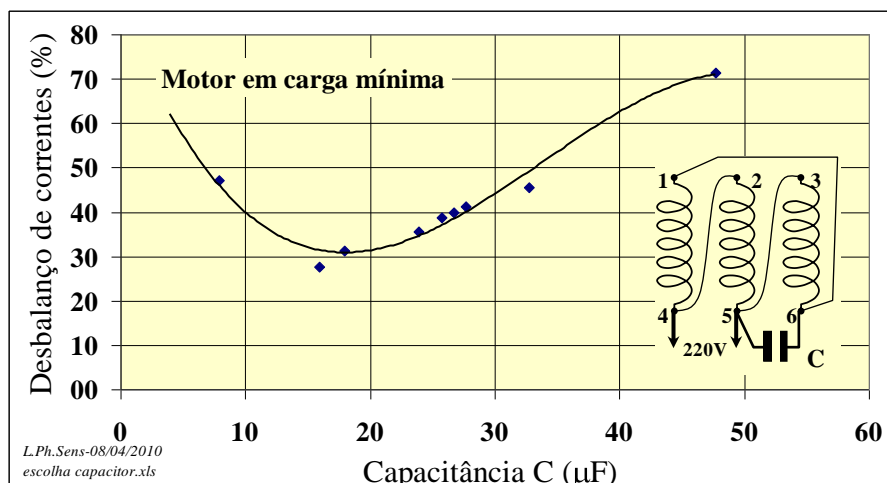


Figura 76 – Desbalanço entre correntes com a capacitância sob carga mínima

A **Figura 76** mostra que o mínimo de desbalanço seria obtido para uma capacitância de aproximadamente de 18 µF.

Os capacitores encontrados anteriormente foram testados na condição de carga mínima do motor, onde o torque e a rotação foram comparados com a situação de alimentação trifásica.

Conforme mostrado na **Figura 57**, o motor em alimentação trifásica apresenta torque máximo de 2,4Nm e estabilização da velocidade em 80ms. O torque máximo ocorreu após 50 ms da partida.

Por outro lado, quando acionado através de capacitores, em ligação monofásica, os torques foram reduzidos, e seus tempos prolongados, conforme mostrado na **Figura 68**, na **Figura 67** e na **Figura 69**.

A **Tabela 24** resume os torques e os tempos para o acionamento do motor na condição trifásica e através de três capacitores distintos, sob carga mínima.

Tabela 24 – Torques e tempos para partida em carga mínima

Alimentação	Torque Máx.	Tempo de estabilização da velocidade	Tempo para o torque máximo	Desbalanço nas correntes
	(N.m)	(ms)	(ms)	(%)
Trifásico	2,4	80	50	6,56
Capacitor 40,70µF	2,0	110	100	62,00
Capacitor 47,70µF	2,25	200	160	71,36
Capacitor 17,94µF	1,6	260	220	31,30

Como evidenciado na **Tabela 24**, o melhor capacitor a ser usado sob carga mínima, considerando o desbalanço nas correntes, é o de 17,94µF.

6.2.3 Análise pela partida do motor em carga nominal

Como terceira análise foram realizados ensaios sob diferentes capacitores (3,9 a 72 μ F) para obtenção daquele que resultasse no menor desbalanço entre correntes na partida do motor em carga nominal. Pelos resultados apresentados na **Tabela 13**, encontrou-se o capacitor de 17,94 μ F para o mínimo desbalanço de corrente, que resultou em 21,20%, como ilustrado na **Figura 77**.

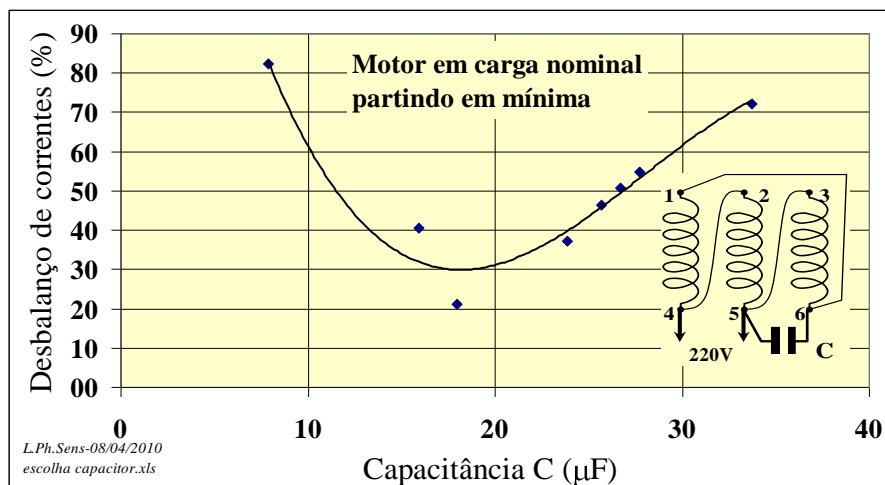


Figura 77 – Desbalanço entre correntes com a capacitância sob carga nominal

A **Figura 77** mostra através da linha de tendência que o mínimo de desbalanço seria obtido para uma capacitância de aproximadamente de 18 μ F.

Foram realizados ensaios sob carga nominal para os capacitores que tiveram melhores resultados em seus ensaios de partida, onde foram comparados seus torques e rotações com a situação de alimentação trifásica.

Na situação trifásica, mostrado na **Figura 58**, o motor partiu com a carga nominal aplicada e levou 300 ms para estabilização, onde o torque máximo de 2,8 Nm ocorreu em 130ms, se estabilizando em 2 Nm.

Por outro lado, quando acionado através de capacitores, em ligação monofásica, os torques foram reduzidos, e seus tempos prolongados, conforme mostrado na **Figura 70** e na **Figura 71**. No último caso, para o capacitor de 17,94 μ F, o motor não atingiu a velocidade nominal de operação, pois a partida foi feita já com a carga nominal aplicada. Foi realizado um novo ensaio, onde a carga foi aplicada após o motor partir em carga mínima, conforme mostrado na **Figura 72**.

A **Tabela 25** resume os torques e os tempos para o acionamento do motor na condição trifásica e através dos dois capacitores selecionados, sob carga nominal.

Tabela 25 – Torques e tempos para partida do motor em carga nominal

Alimentação	Torque Máx.	Tempo de estabilização da velocidade	Tempo para o torque máximo	Desbalanço nas correntes
	(N.m)	(ms)	(ms)	(%)
Trifásico	2,8	300	130	5,61
Capacitor 47,70 μ F	2,4	420	180	64,67
Capacitor 17,94 μ F	1,3	infinito	250	**
Capacitor 17,94 μ F (*)	2	50	65	21,20
(*) Motor partiu sob carga mínima e logo após foi aplicada a carga nominal. (**) Não foi medido				

Embora não seja possível a utilização do capacitor de 17,94 μ F para se partir o motor já sob carga, este se apresenta com satisfatório na partida sob carga mínima, apresentando baixo desbalanço nas correntes em relação aos outros capacitores utilizados.

6.2.4 Análise pelo ensaio de carga com capacitor

No item 5.3, são mostradas as tabelas com os parâmetros elétricos e mecânicos resultantes dos ensaios de carga impostos ao motor para os diferentes capacitores utilizados.

Primeiramente foram traçado os gráficos de torque e rendimento pelo escorregamento do motor, para comparação com a curva de carga na situação trifásica, mostrada na **Figura 73**, página 78.

Na região nominal de operação do motor ($s \approx 0,1$), foi possível observar que com os capacitores de 40,7 e 30 μ F, seus rendimentos aproximados foram de 32 e 43%, embora seus respectivos torques estivessem entre 1,6 e 2,0Nm. Já para os capacitores entre 15 e 20 μ F, os valores de rendimento e torque são equivalentes ao do motor em rede trifásica, isto é, $\eta=50\%$ e $T=1,6Nm$.

Desta forma, fica evidenciado inicialmente, que os capacitores entre 15 e 20 μ F apresentam melhores condições para operação do motor em carga. Os gráficos analisados são mostrados da **Figura 78** até a **Figura 82**.

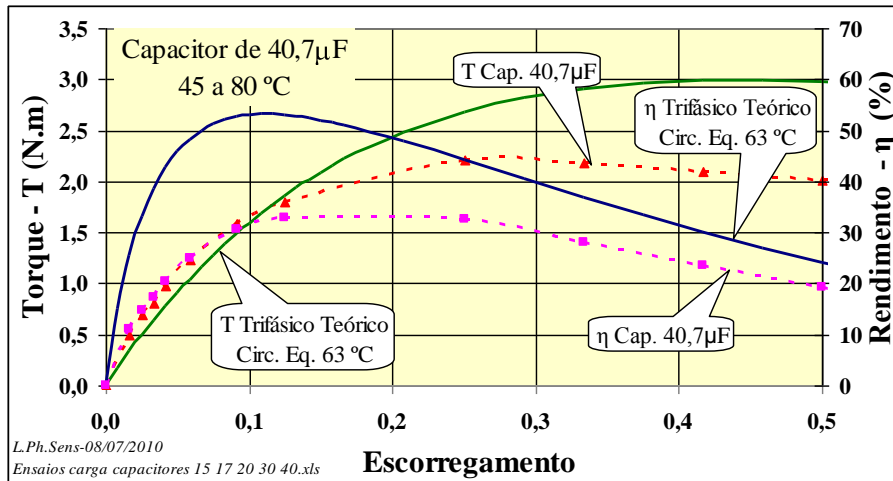


Figura 78 – Ensaio de carga com capacitor de 40,7 μ F

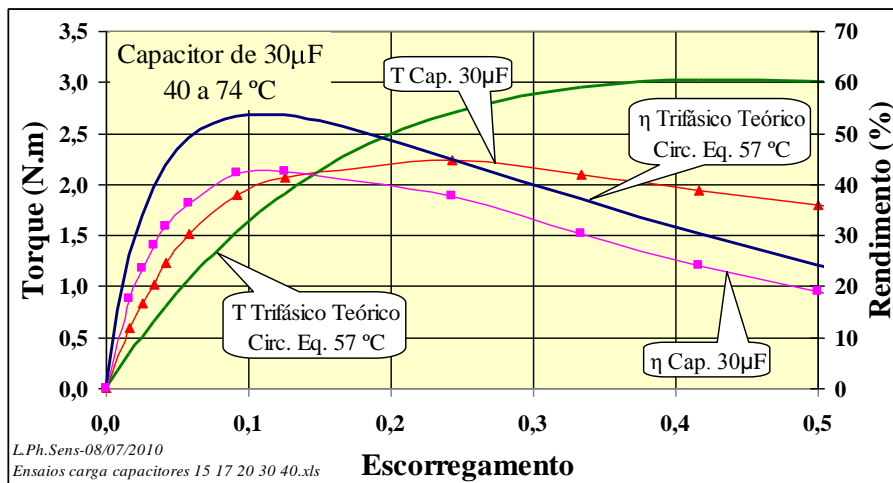


Figura 79 – Ensaio de carga com capacitor de 30 μ F

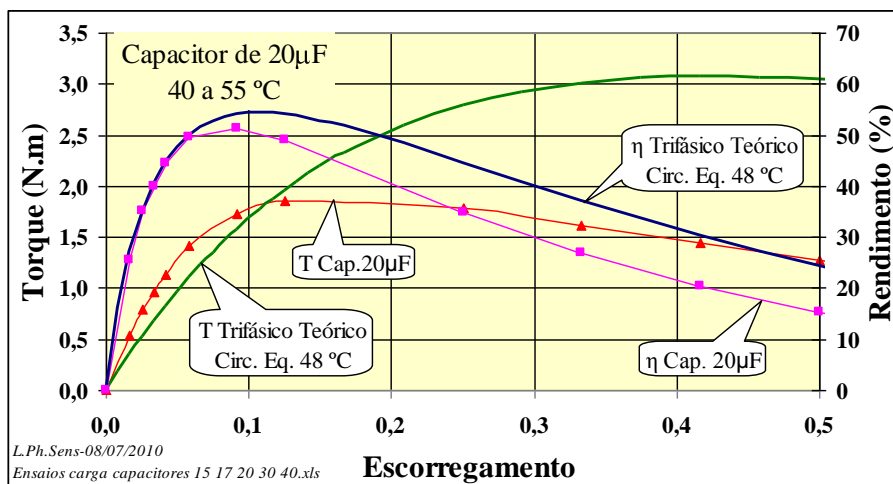


Figura 80 – Ensaio de carga com capacitor de 20 μ F

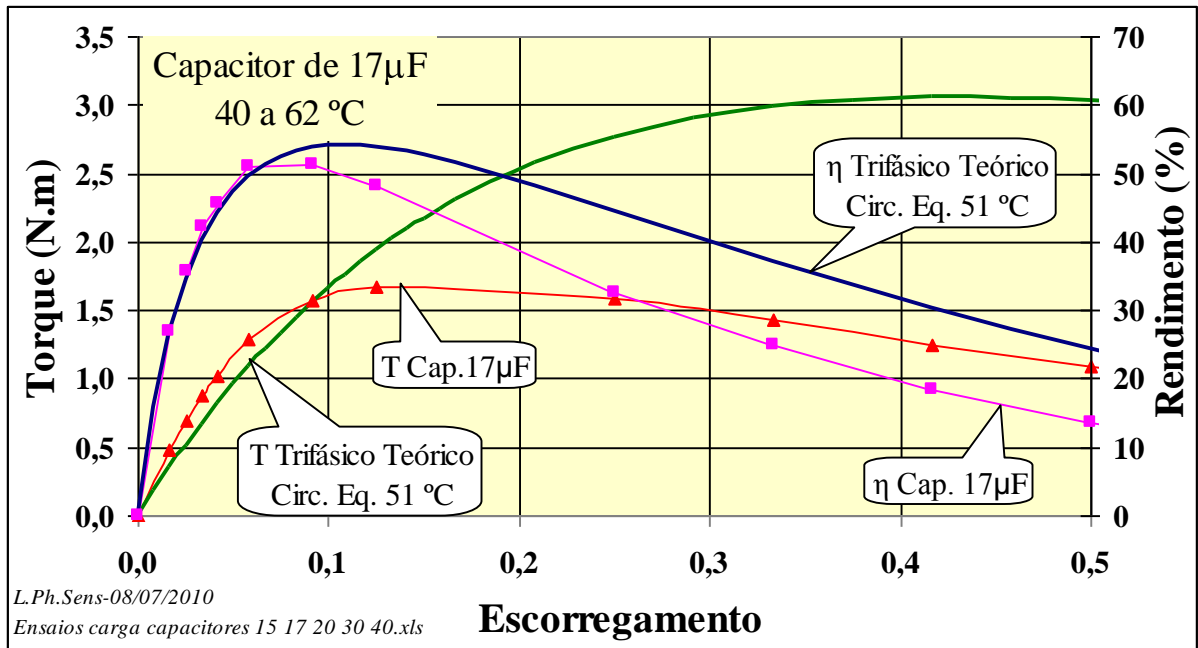


Figura 81 – Ensaio de carga com capacitor de 17 µF

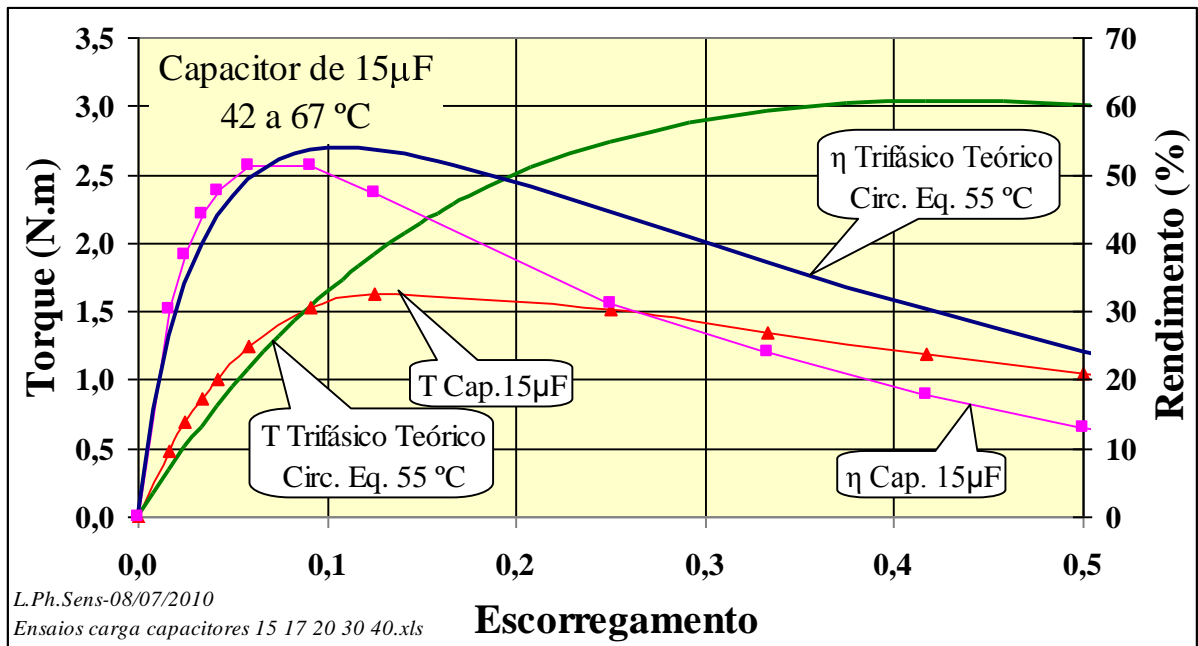


Figura 82 – Ensaio de carga com capacitor de 15 µF

Outra análise a ser feita é em relação às correntes, desbalanço K_i , torque, rendimento e temperatura do motor conforme o capacitor utilizado. Tomando-se os resultados para a rotação nominal de 1090 rpm, chega-se ao seguinte gráfico, ilustrado na **Figura 83**. O desbalanço de corrente foi calculado pela norma CIGRÉ.

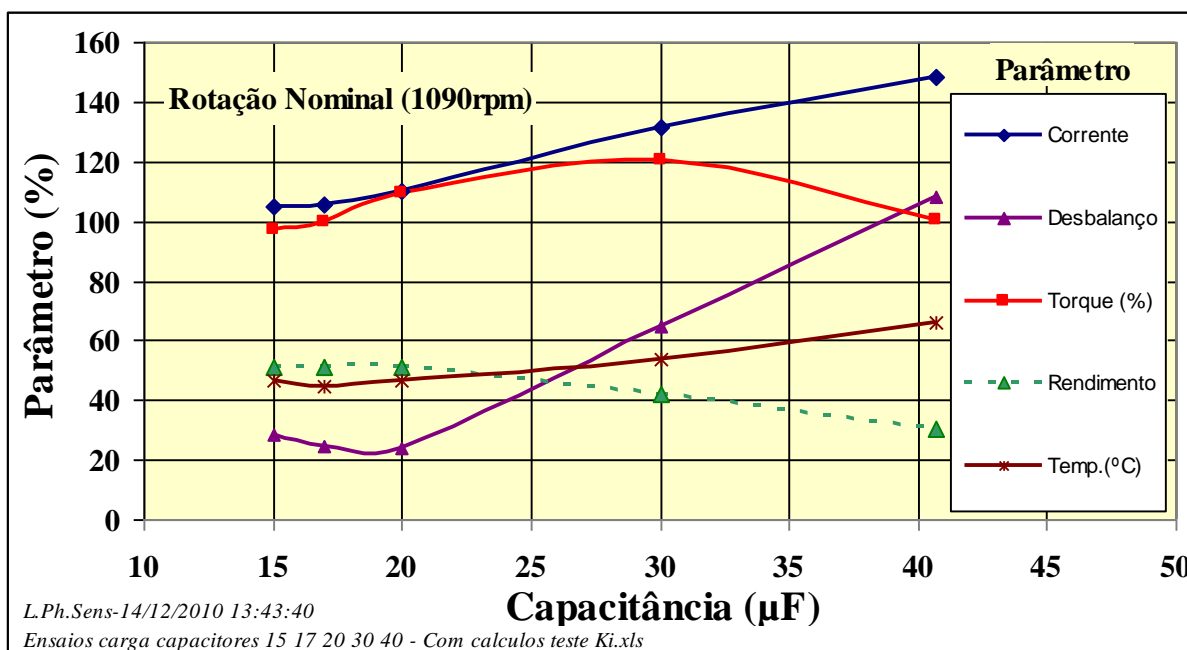


Figura 83 – Parâmetros em relação à capacitância

Neste caso observou-se que para valores de capacitância acima de $20\mu\text{F}$ as correntes se elevam acima de 110% da corrente nominal, o que acarreta o aumento da temperatura e consequentemente as perdas do motor, reduzindo assim seu rendimento.

Em relação ao desbalanço, conclui-se pelo gráfico, que seu mínimo encontra-se entre as capacitâncias de 17 e $20\mu\text{F}$, onde os valores de corrente, torque e rendimentos são próximos dos nominais do motor em operação trifásica.

Para se chegar a uma conclusão final, de que capacitor é o ideal para balancear o sistema, fez-se o uso do método das componentes simétricas para o caso do motor alimentado monofasicamente, descrito em 3.3 e 3.4, páginas 35 até 38,

O fluxograma mostrado na **Figura 84** ilustra a sequência de procedimentos que foram seguidos para obtenção da capacitância ideal.

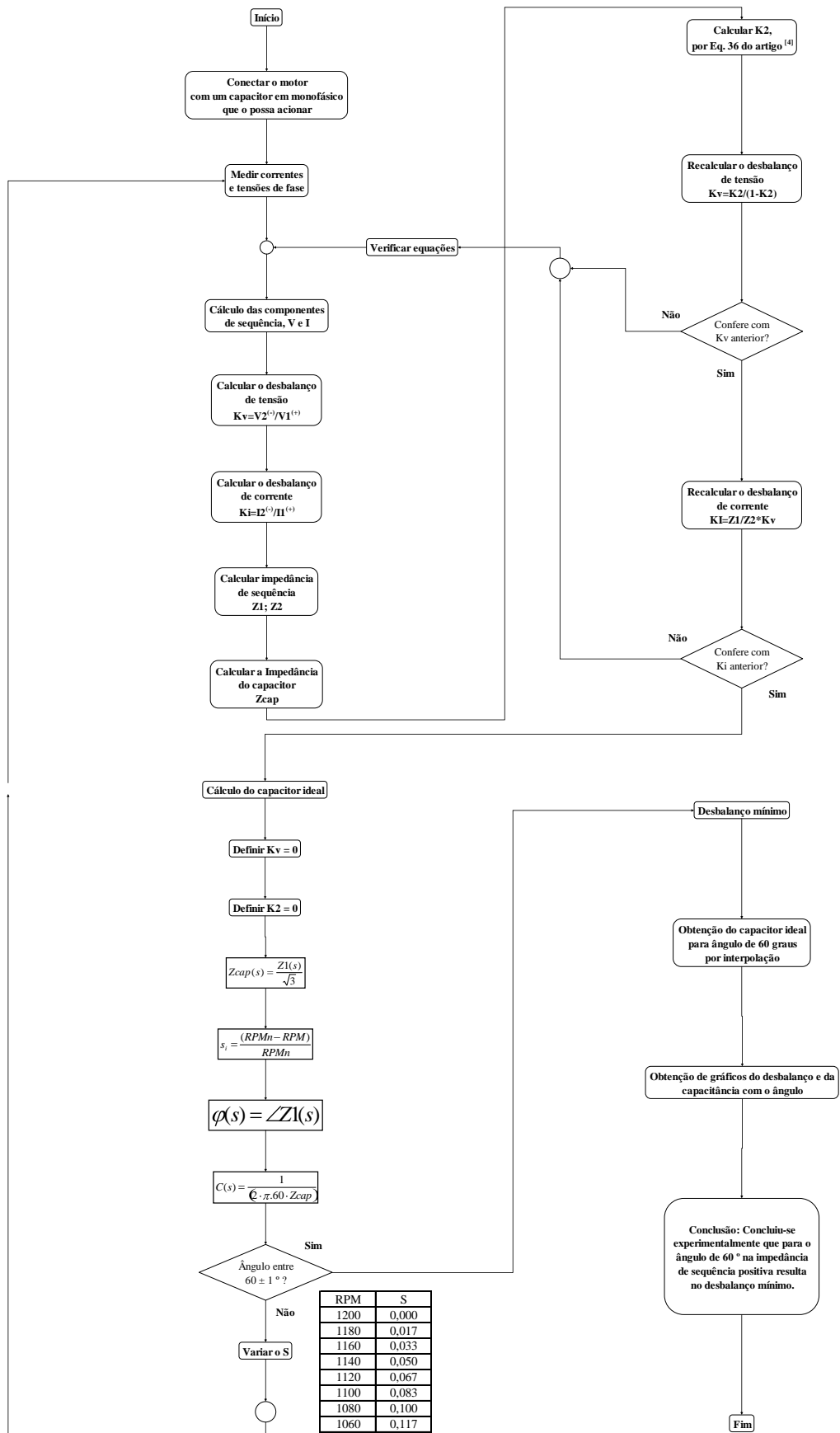


Figura 84 – Fluxograma para cálculo do capacitor ideal

Apenas os dados de um ensaio basta para encontrar o capacitor que balancearia o sistema, porém os ensaios foram repetidos com outros capacitores, para averiguar se chegariam ao mesmo resultado. Assim, foi possível para cada ensaio realizado, a obtenção de valores de capacitâncias teóricas e seus desbalanços causados em cada nível de escorregamento. No item 5.3 são mostradas as tabelas com os resultados dos cálculos descritos pelo fluxograma, que foram utilizados para encontrar o capacitor ideal por interpolação.

Os gráficos a seguir, da Figura 85 até a Figura 89, mostram que para cada ensaio realizado, o capacitor ideal calculado corresponde a um nível de desbalanço, que é minimizado conforme o ângulo da impedância de sequencia positiva (Z_1) se aproxima de 60 graus.

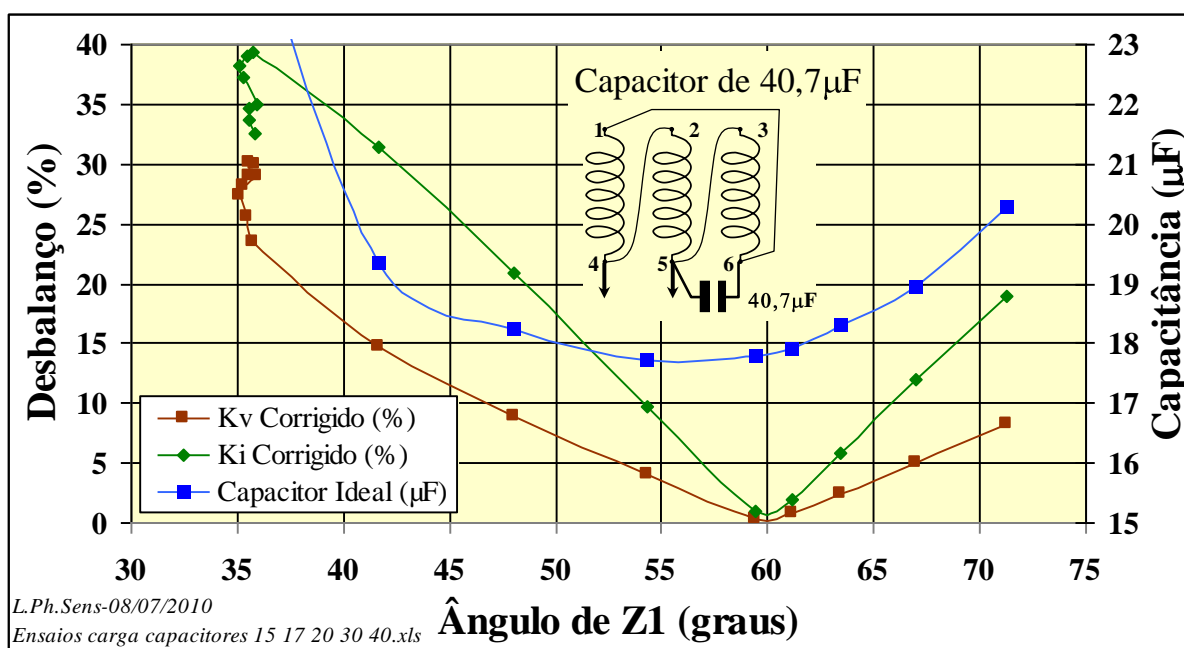


Figura 85 – Capacitor ideal pelo ensaio de 40,7 µF

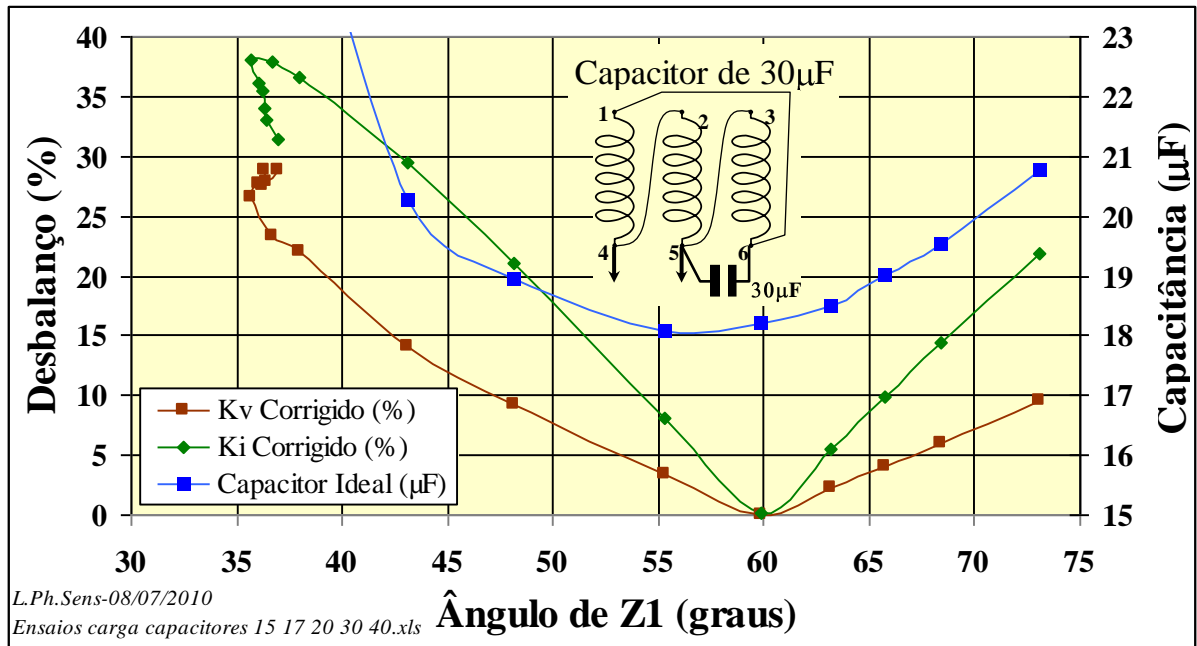


Figura 86 – Capacitor ideal pelo ensaio de 30 µF

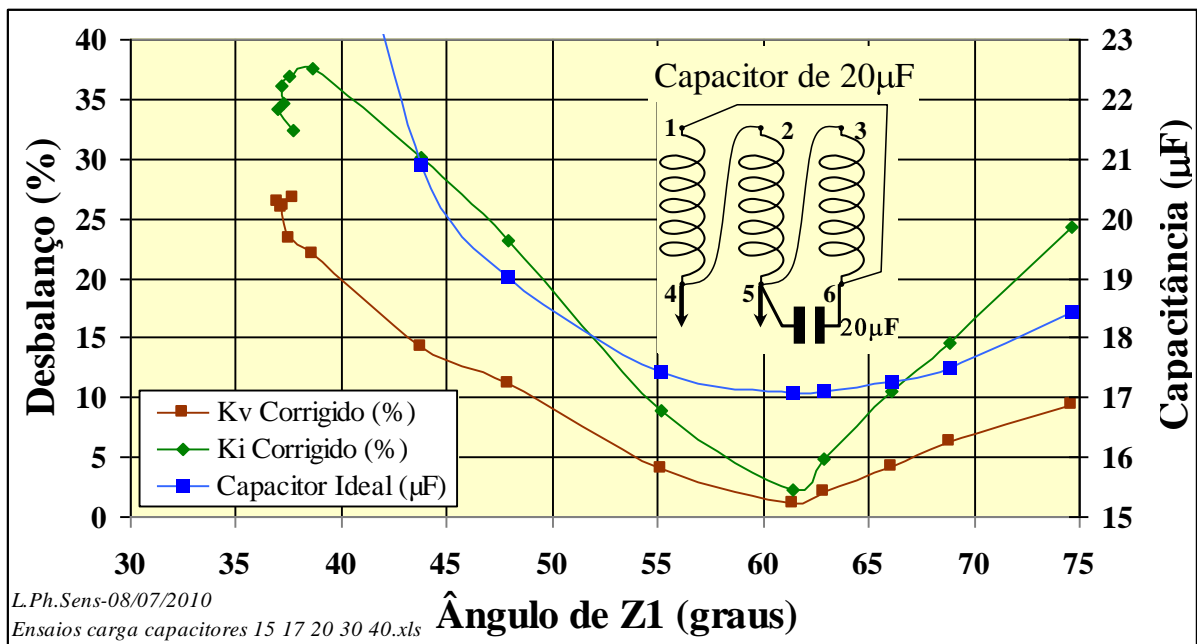


Figura 87 – Capacitor ideal pelo ensaio de 20 µF

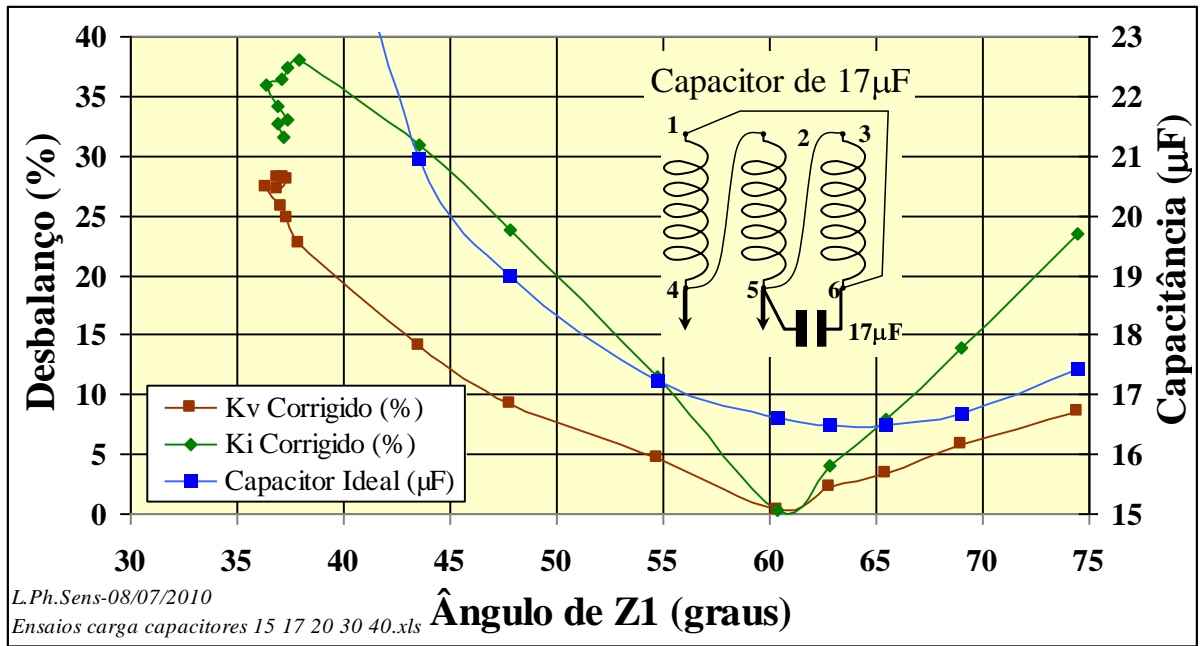


Figura 88 – Capacitor ideal pelo ensaio de 17 µF

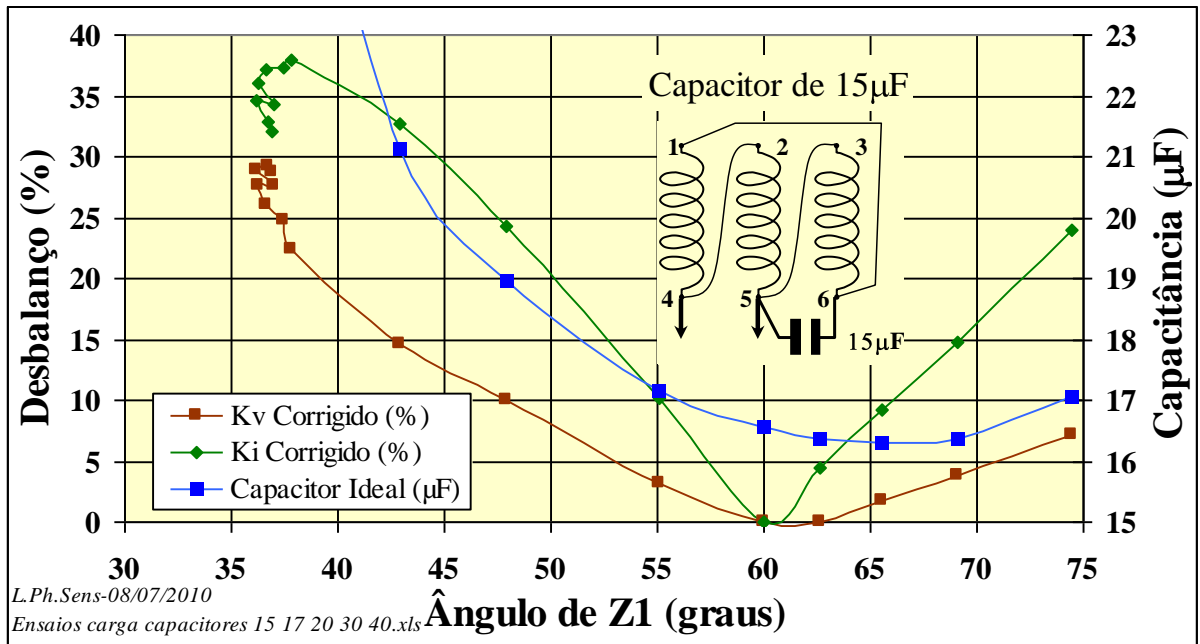


Figura 89 – Capacitor ideal pelo ensaio de 15 µF

Os desbalanços de tensão e corrente, K_v e K_i , mostrados nos gráficos acima, são desbalanços corrigidos a partir do capacitor ideal calculado, ou seja, seria o desbalanço encontrado caso o ensaio fosse feito com o capacitor ideal.

O capacitor ideal é aquele onde os desbalanços se tornaram mínimos, ficando entre 18 e 16,6 μ F, com uma variação de apenas 1,4 μ F, valor suficiente para concluir que mesmo sendo realizados diferentes ensaios, o valor médio de 17,3 μ F é uma ótima aproximação.

Outro ponto a se destacar é a comprovação que para um ângulo de impedância de sequência positiva (Z_1) de aproximadamente 60 graus, o desbalanço de tensão e correntes são mínimos.

Na **Figura 90** é mostrado por fim, os gráficos dos desbalanços de correntes em relação ao escorregamento, mostrando que para um valor de capacitância de 17 μ F tem-se um valor mínimo de desbalanço na região entre $s=0$ e $s=0,1$, ou seja, na região de operação normal do motor. Constata-se também que é no escorregamento $s=0,04$ que ocorre o mínimo desbalanço, ou seja, é o ponto onde o ângulo da impedância de sequência positiva é igual a 60°.

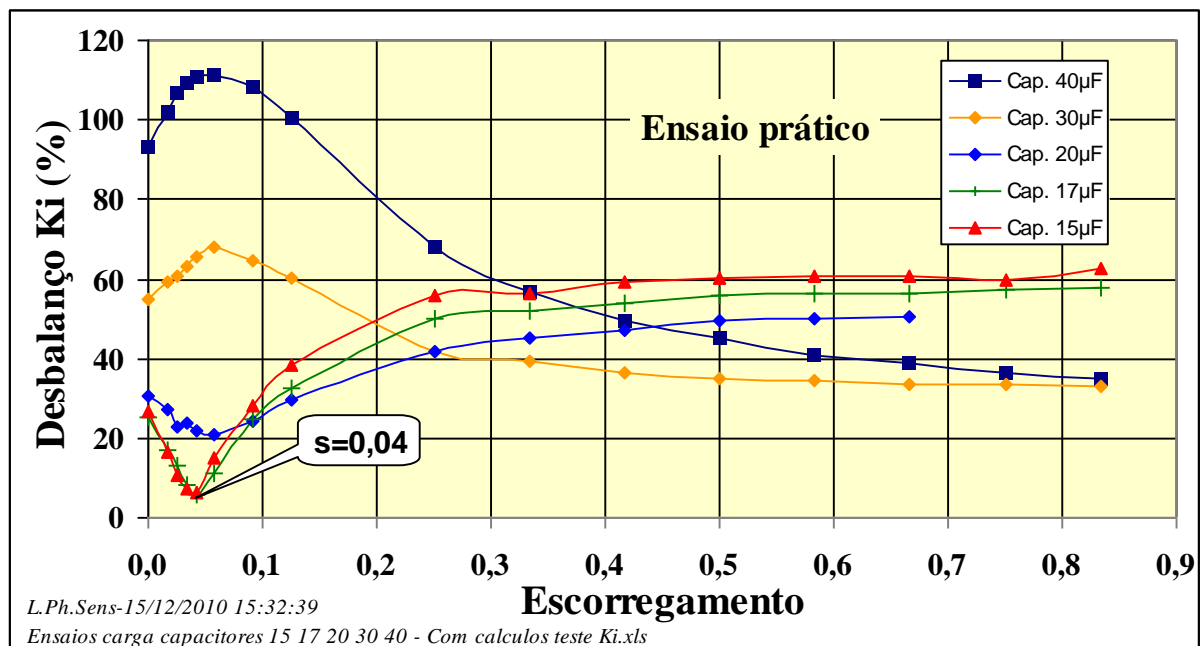


Figura 90 – Desbalanço de correntes pelo escorregamento

6.2.5 Análise pelo circuito equivalente

A análise pelo circuito equivalente é feita através da montagem do motor em um simulador de circuitos elétricos, Workbench Multisim^[10]. Foram utilizados os parâmetros do circuito equivalente já calculados em 4.7 e mostrados na **Tabela 8**, na página 64.

No simulador a montagem é feita fazendo a ligação dos enrolamentos em delta, onde para cada fase existe um wattímetro para medição da potência de entrada e um amperímetro para medição da corrente de fase. A parte resistiva do circuito equivalente que varia com o escorregamento representa a carga do sistema, que no simulador é representado por 3 resistências variáveis. Há também 3 wattímetros dispostos sobre as resistências de carga, representando a potência mecânica do sistema. A ligação à rede trifásica é feita em Y, 127V 60Hz, onde há 3 amperímetros para registrar as correntes de linha. A **Figura 91** mostra o circuito.

A verificação do circuito montado no simulador é feita comparando-se os valores das potências de entrada e saída e as correntes de linha com aquelas já calculadas no ensaio de carga teórico mostrado na **Tabela 9**, página 64.

Inicialmente a resistência de carga é ajustada para um determinado valor referente ao um escorregamento qualquer, que este caso foi escolhido $s=0,092$, ou seja, para a velocidade nominal do motor, 1090 rpm.

As potências e correntes então são mostrados nos respectivos instrumentos, conforme a **Figura 91**, onde parte da **Tabela 9** é mostrada. Constata-se que os valores medidos pelo simulador são muito próximos dos calculados anteriormente, e que o circuito montado representa bem o sistema de ensaio.

rpm	s	Rcarga (Ω)	Req (Ω)	Pe (W)	Xeq (Ω)	Zeq (Ω)	I(A)	Rendimento η (%)	Torque (N.m)	Pm (W)
1090	0,092	354,63	150,5	362,5	194,0	245,5	1,552	51,7	1,43	187

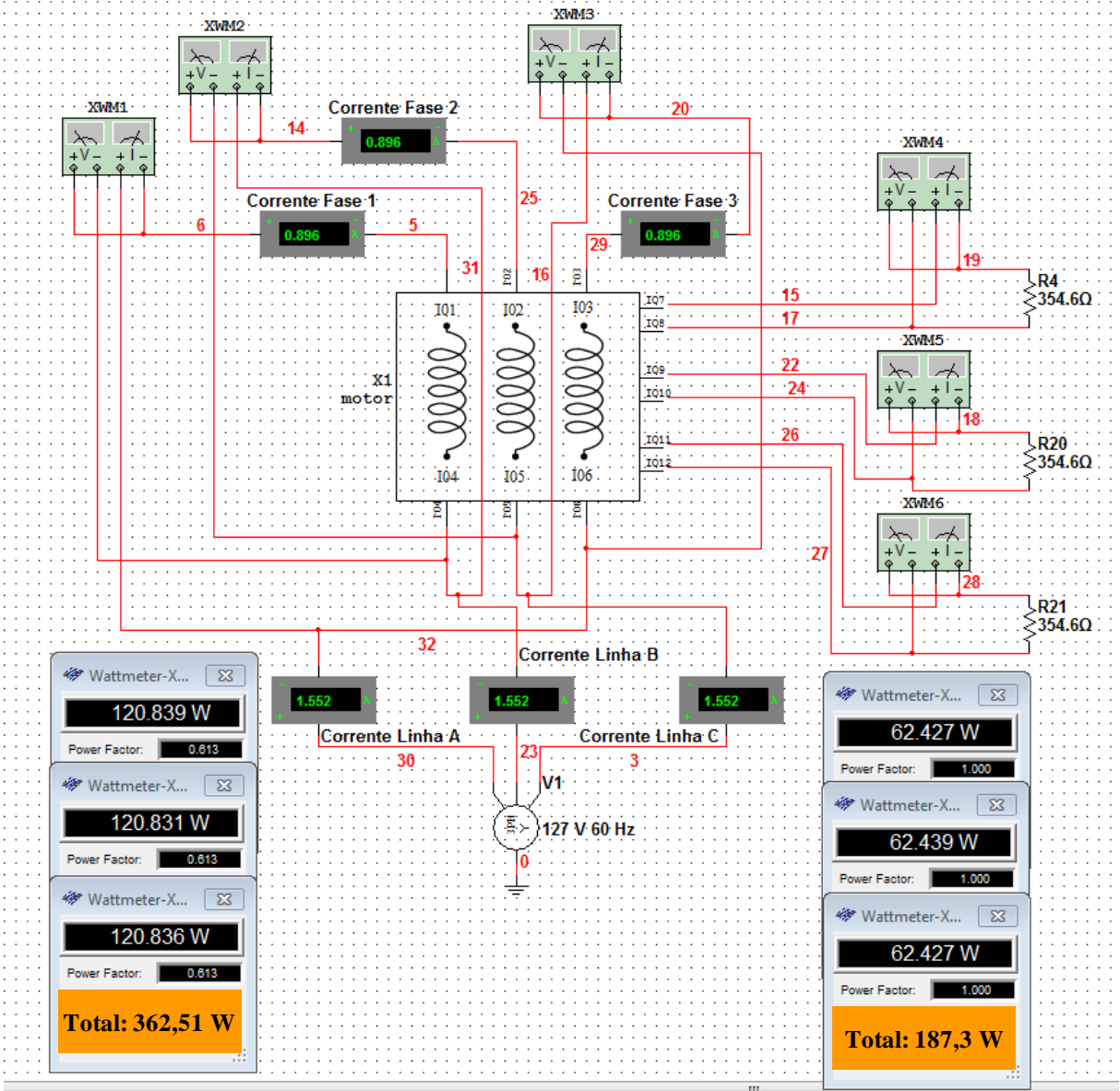


Figura 91 – Simulação do motor trifásico sob carga

Com o circuito já validado, passa-se para o caso da ligação do motor monofasicamente. Os enrolamentos do motor são ligados em delta e a ligação à rede trifásica é feita na configuração de Steinmetz, onde uma das fases é retirada e substituída por um capacitor variável energizado por uma das fases remanescentes. Desta forma o motor é alimentado monofasicamente e o capacitor variável será responsável para equilibrar o sistema.

A parte resistiva dos enrolamentos, variáveis com o escorregamento, continua sendo representado por resistências variáveis. Assim, para determinado escorregamento, o valor das resistências é alterado, o que representa neste caso a carga do sistema.

O circuito apresenta amperímetros para medição das correntes de linha e fase do motor, assim como wattímetros para medir a potência de entrada e saída, mostrados na **Figura 92**.

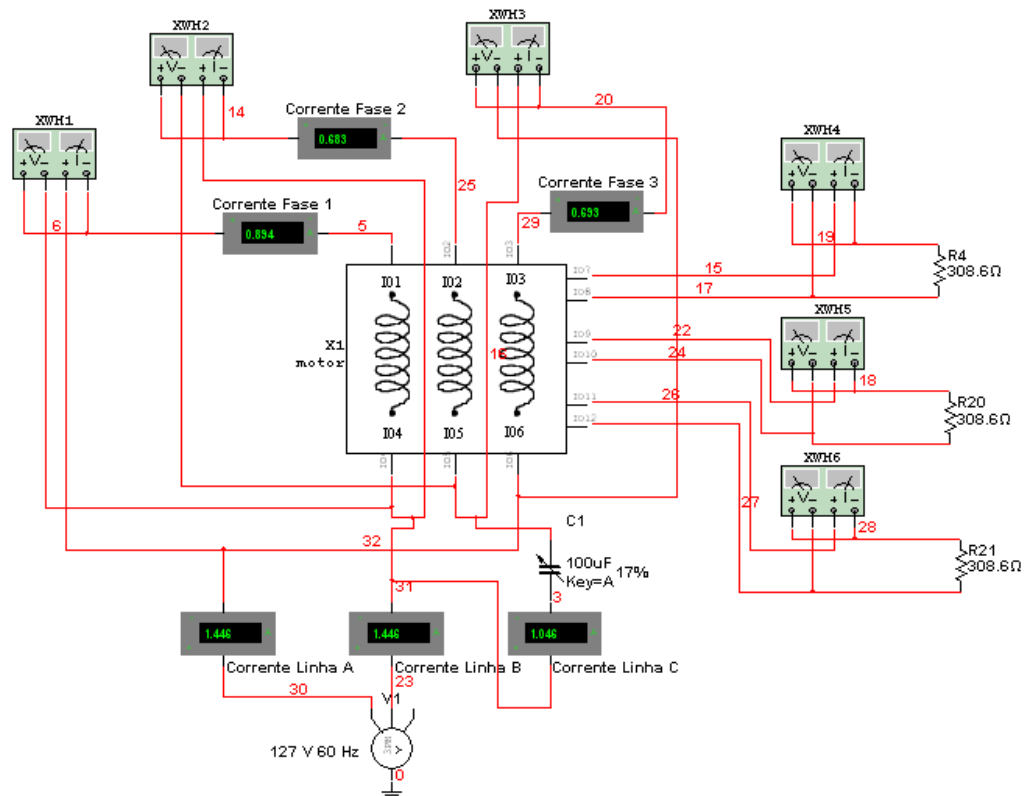


Figura 92 – Esquema de simulação computacional do motor

Para se chegar ao valor da capacitância em que o sistema apresenta um menor desbalanço, primeiramente simulou-se um ensaio de carga, variando o escorregamento de zero até $s=1$ para também diferentes valores de capacitância. A **Figura 93** mostra o grau de desbalanço das correntes de fase do motor em relação ao escorregamento e a capacitância.

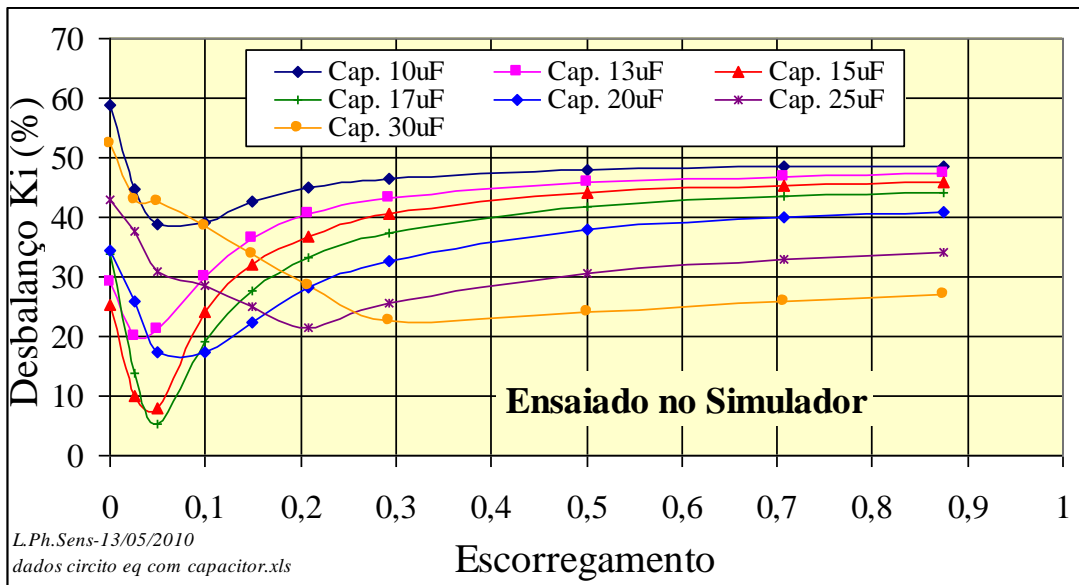


Figura 93 – Grau de desbalanço das correntes de fase

A **Figura 93** mostra que para um valor de capacitância de 17 μF tem-se um valor mínimo de desbalanço na região entre $s=0$ e $s=0,1$, ou seja, na região de operação normal do motor. O gráfico é então ampliado para se determinar com mais precisão o grau de desbalanço, e em que escorregamento ele ocorreu.

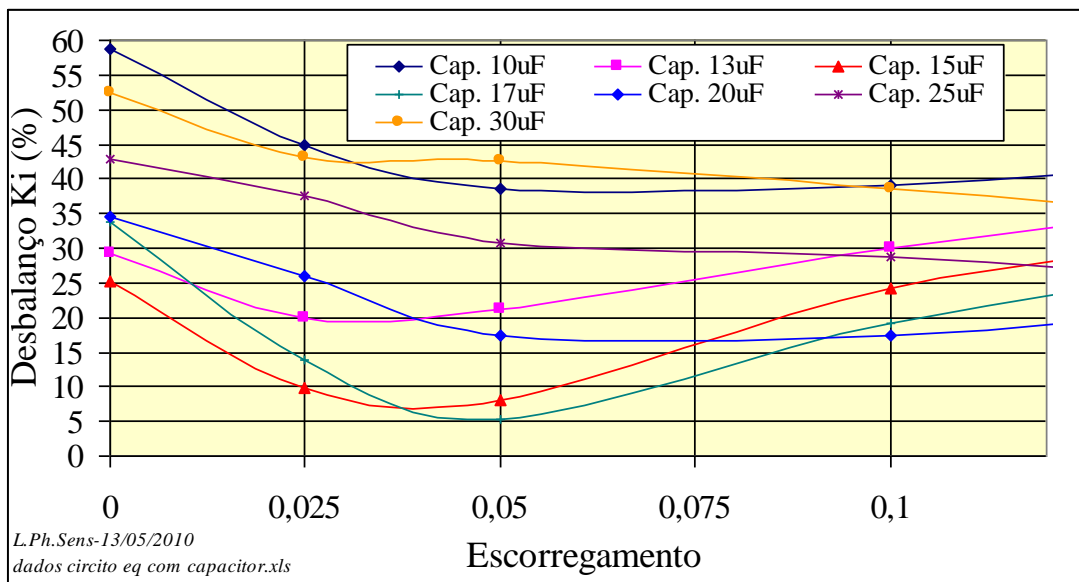


Figura 94 - Determinação do grau de desbalanço das correntes de fase

Na **Figura 94** observa-se que para um escorregamento de 0,05 o desequilíbrio mínimo encontrado foi de 5%, para um valor de capacitância igual 17 μF . Os valores dos desequilíbrios foram calculados pelo método NEMA, pois no simulador não é possível a obtenção dos ângulos de fase.

CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através de ensaios experimentais foram levantadas as características dinâmicas do motor de indução trifásico, onde foram comprovadas com os dados elétricos e mecânicos fornecidos pela placa do motor e pelo site do fabricante.

Foi verificado experimentalmente, em uma série de ensaios com diferentes valores de capacitores, aquele que proporciona melhor operação do motor em uma rede monofásica, tomando como base o desequilíbrio das correntes na partida e operação do motor com e sem carga aplicada. O capacitor encontrado foi o de $17,94\mu\text{F}$.

Foi verificado teoricamente que o capacitor encontrado experimentalmente pode ser encontrado pela análise de componentes simétricas, utilizando-se como dados de entrada os resultados experimentais de um único ensaio do motor, operando monofasicamente através de um capacitor qualquer. Assim encontrou-se um valor de capacitância de aproximadamente $17\mu\text{F}$ que tornava o desequilíbrio das correntes mínimo e que tal situação acontecia quando o ângulo da impedância de sequência positiva atingia o valor de 60° . Tal situação era esperada teoricamente.

Foi comparado o comportamento do motor, obtido experimentalmente, com o teórico, obtido através dos parâmetros do circuito equivalente, tanto para operação trifásica normal, quanto em monofásico com o uso do capacitor. Na situação trifásica, tanto os ensaios teóricos através do Excel, quanto pelo simulador forneceram dados muito aproximados com a situação prática. Desta forma, foi possível a implementação do circuito de Steinmetz no simulador, onde mais uma vez comprovou-se que o capacitor de $17\mu\text{F}$ é o que melhor equilibra o motor operando monofasicamente.

Como recomendação para investigação e medições adicionais podemos citar o efeito da inclusão de resistência em série com o capacitor acima referido, visando estender a faixa de balanceamento limitada apenas ao ponto de operação único nas condições de medição efetuadas e referidas no trabalho, e, ainda, a aplicação de procedimentos de modelagem mais complexos para reprodução precisa dos conjugados desenvolvidos pelo motor sob diferentes condições de operação, desde a partida até a operação na rotação síncrona.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/pt/Charles Proteus Steinmetz](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/pt/Charles_Proteus_Steinmetz)
- [2] S. E. M. Oliveira, "Starting Transients of Saturated Induction Motors With Series Capacitors on the Supply", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. EC-1, no.3, September 1986, pp. 205/10.
- [3] S. E. M. Oliveira, "Operation of Three-Phase Induction Motors Connected to One-Phase Supply", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 5, no.4, December 1990, pp. 713/18.
- [4] ENERSUL. Fornecimento de energia elétrica no sistema monofásico com retorno por terra (MRT). Campo Grande, 2001. 167p. (ENERSUL. Orientação Técnica,1).
- [5] http://catalogo.weg.com.br/TEC_CAT/tech_motor_dat_web.asp
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica, Seção 8.1 - Qualidade do Produto. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8 Revisao 1-Retificacao 1.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_1-Retificacao_1.pdf). Acessado em 11 de março de 2010.
- [7] CIGRE, "A New Simple and Effective Approximate Formulation for the Determination of Three-Phase Unbalances by Voltmeter Method," Belgique, CIGRE, 1986.
- [8] NEMA MG1-14.34-2009 - Motors and Generators – Nation Electrical Manufactures Association
- [9] IEEE 112 Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators
- [10] Simulador de circuitos elétricos. Disponível em: <http://www.ni.com/multisim>

ANEXO - PROGRAMAÇÃO AUXILIAR EM VBA

Function SensZeq(R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)

'R1 = 39.4

'R2 = 39.17

'X1 = 44.26

'X2 = X1

'Rm = 1878.2

'Xm = 256.9

'Ns = 1200

'N = 1090

$s = (Ns - N) / Ns + 0.000000000001$

'Rs= R secundario + resistencia da carga

$Rcarga = R2 * (1 - s) / s$

$Rs = R2 + Rcarga$

'Ym= Y mutuo

$Ym = ((1 / Rm) ^ 2 + (1 / Xm) ^ 2) ^ 0.5$

$Rser = 1 / Ym ^ 2 * Rm$

$Xser = 1 / Ym ^ 2 * Xm$

$Z1 = (R1 ^ 2 + X1 ^ 2) ^ 0.5$

$Z2 = (X2 ^ 2 + Rs ^ 2) ^ 0.5$

$Zm = (Rser ^ 2 + Xser ^ 2) ^ 0.5$

'I2 = V * Zm / (Z1 * Zm + Z1 * Z2 + Z2 * Zm)

'Rp=secundario +carga

$Rp = Z2 ^ 2 / Rs$

'Xp= equivalente paralelo do secundario

$Xp = Z2 ^ 2 / X2$

'Rpp=R equivalente da parte mutua com o secundario paralelo

$Rpp = (Rp * Rm) / (Rp + Rm)$

'equivalente da parte mutua com o secundario

$Xpp = (Xm * Xp) / (Xm + Xp)$

$Ypp2 = (1 / Rpp) ^ 2 + (1 / Xpp) ^ 2$

'Rps= equivalente serie mutua com a secundaria

$Rps = 1 / Ypp2 / Rpp$

$Xps = 1 / Ypp2 / Xpp$

$Req = Rps + R1$

$Xeq = Xps + X1$

$SensZeq = (Req ^ 2 + Xeq ^ 2) ^ 0.5$

End Function

Function SensReq(R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)

'R1 = 39.4

'R2 = 39.17

'X1 = 44.26

```

'X2 = X1
'Rm = 1878.2
'Xm = 256.9
'Ns = 1200
'N = 1090
s = (Ns - N) / Ns + 0.000000000001
'Rs= R secundario + resistencia da carga'
Rcarga = R2 * (1 - s) / s
Rs = R2 + Rcarga
'Ym= Y mutuo
Ym = ((1 / Rm) ^ 2 + (1 / Xm) ^ 2) ^ 0.5
Z2 = (X2 ^ 2 + Rs ^ 2) ^ 0.5
'Rp=secundario +carga
Rp = Z2 ^ 2 / Rs
'Xp= equivalente paralelo do secundario
Xp = Z2 ^ 2 / X2
'Rpp=R equivalente da parte mutua com o secundario paralelo
Rpp = (Rp * Rm) / (Rp + Rm)
'Xpp= X equilante da pare mutua com o secundario
Xpp = (Xm * Xp) / (Xm + Xp)
Ypp2 = (1 / Rpp) ^ 2 + (1 / Xpp) ^ 2
'Rps= equivalente serie mutua com a secundaria
Rps = 1 / Ypp2 / Rpp
Xps = 1 / Ypp2 / Xpp
Req = Rps + R1
Xeq = Xps + X1
Zeq = (Req ^ 2 + Xeq ^ 2) ^ 0.5
SensReq = Req
End Function
Function SensXeq(R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)
'R1 = 39.4
'R2 = 39.17
'X1 = 44.26
'X2 = X1
'Rm = 1878.2
'Xm = 256.9
'Ns = 1200
'N = 1090
s = (Ns - N) / Ns + 0.000000000001
'Rs= R secundario + resistencia da carga'
Rcarga = R2 * (1 - s) / s
Rs = R2 + Rcarga
'Ym= Y mutuo
Ym = ((1 / Rm) ^ 2 + (1 / Xm) ^ 2) ^ 0.5
Z2 = (X2 ^ 2 + Rs ^ 2) ^ 0.5
'Rp=secundario +carga
Rp = Z2 ^ 2 / Rs
'Xp= equivalente paralelo do secundario
Xp = Z2 ^ 2 / X2
'Rpp=R equivalente da parte mutua com o secundario paralelo

```

$$R_{pp} = (R_p * R_m) / (R_p + R_m)$$

'Xpp= X equivalente da pare mutua com o secundario

$$X_{pp} = (X_m * X_p) / (X_m + X_p)$$

$$Y_{pp2} = (1 / R_{pp})^2 + (1 / X_{pp})^2$$

'Rps= equivalente serie mutua com a secundaria

$$R_{ps} = 1 / Y_{pp2} / R_{pp}$$

$$X_{ps} = 1 / Y_{pp2} / X_{pp}$$

$$R_{eq} = R_{ps} + R_1$$

$$X_{eq} = X_{ps} + X_1$$

$$Z_{eq} = (R_{eq}^2 + X_{eq}^2)^{0.5}$$

$$\text{Sens}X_{eq} = X_{eq}$$

End Function

Function SensRend(V, R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)

'R1 = 39.4

'R2 = 39.17

'X1 = 44.26

'X2 = X1

'Rm = 1878.2

'Xm = 256.9

'Ns = 1200

'N = 1090

$$Z_{eq} = \text{Sens}Z_{eq}(R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)$$

$$I = V / Z_{eq}$$

$$R_{eq} = \text{Sens}R_{eq}(R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)$$

$$P_m = \text{Sens}P_m(V, R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)$$

$$P_e = (R_{eq} * I^2) * 3$$

$$\text{Sens}R_{end} = P_m / P_e * 100$$

End Function

Function SensT(V, R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)

'R1 = 39.4

'R2 = 39.17

'X1 = 44.26

'X2 = X1

'Rm = 1878.2

'Xm = 256.9

'Ns = 1200

'N = 1090

$$Pi = \text{Application.WorksheetFunction.Pi}()$$

$$s = (Ns - N) / Ns + 0.000000000001$$

'Rs= R secundario + resistencia da carga'

$$R_{carga} = R_2 * (1 - s) / s$$

$$R_s = R_2 + R_{carga}$$

'Ym= Y mutuo

$$Y_m = ((1 / R_m)^2 + (1 / X_m)^2)^{0.5}$$

$$R_{ser} = 1 / Y_m^2 / R_m$$

$$X_{ser} = 1 / Y_m^2 / X_m$$

$$Z_1 = (R_1^2 + X_1^2)^{0.5}$$

$$Z_2 = (X_2^2 + R_s^2)^{0.5}$$

$$Z_m = (R_{ser}^2 + X_{ser}^2)^{0.5}$$

```

Zeq = SensZeq(R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)
I = V / Zeq
I2 = V * Zm / (Z1 * Zm + Z1 * Z2 + Z2 * Zm)
SensT = Rcarga * I2 ^ 2 * 60 / (2 * Pi * N) * 3

```

End Function

Function SensPm(V, R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)

```

'R1 = 39.4
'R2 = 39.17
'X1 = 44.26
'X2 = X1
'Rm = 1878.2
'Xm = 256.9
'Ns = 1200
'N = 1090
Pi = Application.WorksheetFunction.Pi()
s = (Ns - N) / Ns + 0.0000000000001
'Rs= R secundario + resistencia da carga'
'Rcarga = R2 * (1 - s) / s
Rs = R2 + Rcarga
'Ym= Y mutuo
Ym = ((1 / Rm) ^ 2 + (1 / Xm) ^ 2) ^ 0.5
'Z2 - impedância da carga com secundário
Z2 = (X2 ^ 2 + Rs ^ 2) ^ 0.5
R2p = Z2 ^ 2 / Rs
X2p = Z2 ^ 2 / X2
'Zcm=Impedância da carga como o mútuo
Rmc = Rm * R2p / (Rm + R2p)
Xmc = Xm * X2p / (Xm + X2p)
Ymc = (1 / Rmc ^ 2 + 1 / Xmc ^ 2) ^ 0.5
Zcm = 1 / Ymc
Zeq = SensZeq(R1, R2, X1, X2, Rm, Xm, Ns, N)
I = V / Zeq
Vm = I * Zcm
I2 = Vm / Z2
Pm = I2 ^ 2 * Rcarga * 3
SensPm = Pm

```

End Function

Function SensParametros_Rm(Rcc, Ta, Top, Vmv, Imv, Pev, Vmc, Imc, Pec, X1)

```

'Rcc = Resistencia cc do primário medido na temperatura Ta
'Ta = Temperatura ambiente
'Top = Temperatura de operação
'Vmv = Tensão média em vazio
'Imv = Corrente média em vazio
'Pev = Potencia de entrada em vazio
'Vmc = Tensão média em curto
'Imc = Corrente média em curto
'Pec = Potencia de entrada em curto

```

'Calculo da resistencia cc do primario para temperatura de operação

$$\text{'Rccop} = \text{Rcc} * (234.5 + \text{Top}) / (234.5 + \text{Ta})$$

$$\text{Rccop} = \text{Rcc}$$

'Calculo de RT,R2,XT,X1,X2 e Zc pelo ensaio de curto

'RT= resistencia total

'R2= resistencia do secundario

'XT= reatancia total

'X1 e X2 =reatancia do primario e secundario

'Zc=Impedancia equivalente do circuito em curto

$$\text{'Pec} = \text{Pec} / 3$$

$$\text{'Sc} = \text{Vmc} * \text{Imc}$$

$$\text{'Qc} = (\text{Sc} ^ 2 - \text{Pec} ^ 2) ^ 0.5$$

'X1 = X1 estimado do ensaio em curto na corrente do ensaio em vazio

$$\text{'RT} = \text{Pec} / \text{Imc} ^ 2$$

$$\text{'R2} = \text{RT} - \text{Rccop}$$

$$\text{'XT} = \text{Qc} / \text{Imc} ^ 2$$

$$\text{'X1} = \text{XT} / 2$$

$$\text{'X2} = \text{X1}$$

'Calculo de Rmu,Xmu,Zmu pelo ensaio a vazio

'Rmu = Resistencia mutua

'Xmu = Reatancia mutua

'Zmu = Impedancia mutua

'Pmu = Potencia ativa mutua

'Vmu = Tensão mutua

'Smu = Potencia aparente mutua

'Qmu = Potencia reativa mutua

$$\text{Pev} = \text{Pev} / 3$$

$$\text{Pmu} = (\text{Pev}) - (\text{Rcc} * \text{Imv} ^ 2)$$

$$\text{Sv} = \text{Vmv} * \text{Imv}$$

$$\text{Qv} = (\text{Sv} ^ 2 - \text{Pev} ^ 2) ^ 0.5$$

$$\text{'X1} = 42.385 * \text{Imv} ^ -0.2553$$

$$\text{Qmu} = \text{Qv} - \text{Imv} ^ 2 * \text{X1}$$

$$\text{Smu} = (\text{Pmu} ^ 2 + \text{Qmu} ^ 2) ^ 0.5$$

$$\text{Vmu} = \text{Smu} / \text{Imv}$$

$$\text{Rmu} = \text{Vmu} ^ 2 / \text{Pmu}$$

$$\text{Xmu} = \text{Vmu} ^ 2 / \text{Qmu}$$

$$\text{Zmu} = \text{Vmu} ^ 2 / \text{Smu}$$

$$\text{SensParametros_Rm} = \text{Rmu}$$

End Function

Function SensParametros_Xm(Rcc, Vmv, Imv, Pev, Vmc, Imc, Pec, X1)

'Rcc = Resistencia cc do primário medido na temperatura Ta

'Vmv = Tensão média em vazio
'Imv = Corrente média em vazio
'Pev = Potencia de entrada em vazio
'Rccop = Rcc
'Pec = Pec / 3
'Sc = Vmc * Imc
'Qc = (Sc ^ 2 - Pec ^ 2) ^ 0.5
'X1 = X1 estimado do ensaio em curto na corrente do ensaio em vazio
'XT = Qc / Imc ^ 2
'X1 = XT / 2

'Calculo de Xmu pelo ensaio a vazio

'Rmu = Resitencia mutua
'Xmu = Reatancia mutua
'Zmu = Impedancia mutua
'Pmu = Potencia ativa mutua
'Vmu = Tensão mutua
'Smu = Potencia aparente mutua
'Qmu = Potencia reativa mutua
Pev = Pev / 3
Pmu = (Pev) - (Rcc * Imv ^ 2)
Sv = Vmv * Imv
Qv = (Sv ^ 2 - Pev ^ 2) ^ 0.5
'X1 = 42.385 * Imv ^ -0.2553
Qmu = Qv - Imv ^ 2 * X1
Smu = (Pmu ^ 2 + Qmu ^ 2) ^ 0.5
Vmu = Smu / Imv

Xmu = Vmu ^ 2 / Qmu

SensParametros_Xm = Xmu

End Function

Function SensParametros_Zm(Rcc, Vmv, Imv, Pev)

'Rcc = Resistencia cc do primário medido na temperatura Ta

'Vmv = Tensão média em vazio

'Imv = Corrente média em vazio

'Pev = Potencia de entrada em vazio

'Calculo de Zmu pelo ensaio a vazio

'Zmu = Impedancia mutua
'Pmu = Potencia ativa mutua
'Vmu = Tensão mutua
'Smu = Potencia aparente mutua
'Qmu = Potencia reativa mutua
Pev = Pev / 3
Pmu = (Pev) - (Rcc * Imv ^ 2)
Sv = Vmv * Imv

$Q_v = (S_v^2 - P_{ev}^2)^{0.5}$
'X1 = 42.385 * Imv ^ -0.2553
 $X1 = 39.174 * Imv^{-0.2798}$
 $Q_{mu} = Q_v - Imv^2 * X1$
 $S_{mu} = (P_{mu}^2 + Q_{mu}^2)^{0.5}$
 $V_{mu} = S_{mu} / Imv$
 $Z_{mu} = V_{mu}^2 / S_{mu}$

SensParametros_Zm = Zmu

End Function

Function SensParametros_Rccop(Rcc, Ta, Top)

'Rcc = Resistencia cc do primário medido na temperatura Ta

'Ta = Temperatura ambiente

'Top = Temperatura de operação

'Calculo da resitencia cc do primario para temperatura de operação

$R_{ccop} = R_{cc} * (234.5 + Top) / (234.5 + Ta)$

SensParametros_Rccop = Rccop

End Function

Function SensParametros_R2(Rcc, Ta, Top, Imc, Pec)

'Rcc = Resistencia cc do primário medido na temperatura Ta

'Ta = Temperatura ambiente

'Top = Temperatura de operação

'Imc = Corrente média em curto

'Pec = Potencia de entrada em curto

'Calculo da resitencia cc do primario para temperatura de operação

$R_{ccop} = R_{cc} * (234.5 + Top) / (234.5 + Ta)$

'Calculo de RT,R2 pelo ensaio de curto

'RT= resistencia total

'R2= resitencia do secundario

$P_{ec} = Pec / 3$

$RT = Pec / Imc^2$

$R2 = RT - R_{ccop}$

SensParametros_R2 = R2

End Function

Function SensParametros_RT(Imc, Pec, Ta, Top)

'Imc = Corrente média em curto

'Pec = Potencia de entrada em curto

'Calculo de RT pelo ensaio de curto
'RT= resistencia total

$Pec = Pec / 3$
 $RT = Pec / Imc ^ 2$
 $RT = RT * (234.5 + Top) / (234.5 + Ta)$

SensParametros_RT = RT

End Function

Function SensParametros_XT(Vmc, Imc, Pec)

'Vmc = Tensão média em curto
'Imc = Corrente média em curto
'Pec = Potencia de entrada em curto

'Calculo de XT,X1,X2 pelo ensaio de curto
'XT= reatancia total
'X1 e X2 =reatancia do primario e secundario
 $Pec = Pec / 3$
 $Sc = Vmc * Imc$
 $Qc = (Sc ^ 2 - Pec ^ 2) ^ 0.5$

$XT = Qc / Imc ^ 2$

SensParametros_XT = XT

End Function

Function SensParametros_Zc(Vmc, Imc)

'Vmc = Tensão média em curto
'Imc = Corrente média em curto

'Calculo de Zc pelo ensaio de curto

'Zc=Impedancia equivalente do circuito em curto
 $Sc = Vmc * Imc$
 $Zc = Sc / Imc ^ 2$
SensParametros_Zc = Zc

End Function

Function Z1_mod(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

A = complex(-0.5, 0.866)
aa = improduct(A, A)

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

'Transformação para numero imaginário

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

'Calculo de Z1 e Z2

Z1_complexo = imdiv(V_1, I_1)

Z1_mod = imabs(Z1_complexo)

Z1_ang_ = imargument(Z1_complexo)

Z2_complexo = imdiv(V_2, I_2)

Z2_mod = imabs(Z2_complexo)

Z2_ang = imargument(Z2_complexo)

'Calculo do Zcap e Cap

```

Icap = imsub(IA_complexo, IC_complexo)
Zcap = imdiv(VBC_complexo, Icap)
Zcap_mod = imabs(Zcap)
Zcap_ang = imargument(Zcap)
Cap = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_mod)

```

'Calculo de Kv e Ki

```

'x1=aa-a
'x2=Zcap/Z1
'x3=Zcap/Z2

```

```

X1 = imsub(aa, A)
X2 = imdiv(Zcap, Z1_complexo)
X3 = imdiv(Zcap, Z2_complexo)

```

```

K2 = imdiv(imsub(improduct(X1, X2), A), improduct(X1, imsum(X2, X3, 1)))
Kv_ = imabs(imdiv(K2, imsub(1, K2))) * 100
Ki_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kv_

```

'Calculo do capacitor ideal

```

Zcap_ideal = Z1_mod / 3 ^ 0.5
Cap_ideal_ = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_ideal)

```

'Balanceamento pelo capacitor ideal

```

Zcap_bal = complex(0, -Zcap_ideal)

```

```

X2b = imdiv(Zcap_bal, Z1_complexo)
X3b = imdiv(Zcap_bal, Z2_complexo)

```

```

K2bal = imdiv(imsub(improduct(X1, X2b), A), improduct(X1, imsum(X2b, X3b, 1)))
Kvbal_ = imabs(imdiv(K2bal, imsub(1, K2bal))) * 100
Kibal_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kvbal_

```

End Function

Function Z1_ang(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

```

A = complex(-0.5, 0.866)
aa = improduct(A, A)

```

```

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

```

'Transformação para numero imaginário

```

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

```

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

'Calculo de Z1 e Z2

Z1_complexo = imdiv(V_1, I_1)

Z1_mod_ = imabs(Z1_complexo)

Z1_ang = imargument(Z1_complexo) * 180 / Pii

Z2_complexo = imdiv(V_2, I_2)

Z2_mod = imabs(Z2_complexo)

Z2_ang = imargument(Z2_complexo)

'Calculo do Zcap e Cap

Icap = imsub(IA_complexo, IC_complexo)

Zcap = imdiv(VBC_complexo, Icap)

Zcap_mod = imabs(Zcap)

Zcap_ang = imargument(Zcap)

Cap = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_mod)

'Calculo de Kv e Ki

'x1=aa-a

'x2=Zcap/Z1

'x3=Zcap/Z2

```
X1 = imsub(aa, A)
X2 = imdiv(Zcap, Z1_complexo)
X3 = imdiv(Zcap, Z2_complexo)
```

```
K2 = imdiv(imsub(improduct(X1, X2), A), improduct(X1, imsum(X2, X3, 1)))
Kv_ = imabs(imdiv(K2, imsub(1, K2))) * 100
Ki_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kv_
```

'Calculo do capacitor ideal

```
Zcap_ideal = Z1_mod_ / 3 ^ 0.5
Cap_ideal_ = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_ideal)
```

'Balanceamento pelo capacitor ideal

```
Zcap_bal = complex(0, -Zcap_ideal)

X2b = imdiv(Zcap_bal, Z1_complexo)
X3b = imdiv(Zcap_bal, Z2_complexo)

K2bal = imdiv(imsub(improduct(X1, X2b), A), improduct(X1, imsum(X2b, X3b, 1)))
Kvbal_ = imabs(imdiv(K2bal, imsub(1, K2bal))) * 100
Kibal_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kvbal_
```

End Function

Function Cap_ideal(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

```
A = complex(-0.5, 0.866)
aa = improduct(A, A)
```

```
Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()
```

'Transformação para numero imaginário

```
VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))
```

```
VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))
```

```
VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))
```

```
IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))
```

```
IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))
```

```
IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))
```

'Calculo de V1 e V2

```
V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A,
VCA_complexo)), 3)
V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa,
VCA_complexo)), 3)
```

'Calculo de I1 e I2

```
I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A,
IA_complexo)), 3)
I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa,
IA_complexo)), 3)
```

'Calculo de Z1 e Z2

```
Z1_complexo = imdiv(V_1, I_1)
Z1_mod_ = imabs(Z1_complexo)
Z1_ang_ = imargument(Z1_complexo)
```

```
Z2_complexo = imdiv(V_2, I_2)
Z2_mod = imabs(Z2_complexo)
Z2_ang = imargument(Z2_complexo)
```

'Calculo do Zcap e Cap

```
Icap = imsub(IA_complexo, IC_complexo)
Zcap = imdiv(VBC_complexo, Icap)
Zcap_mod = imabs(Zcap)
Zcap_ang = imargument(Zcap)
Cap = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_mod)
```

'Calculo de Kv e Ki

```
'x1=aa-a
'x2=Zcap/Z1
'x3=Zcap/Z2
```

```
X1 = imsub(aa, A)
X2 = imdiv(Zcap, Z1_complexo)
X3 = imdiv(Zcap, Z2_complexo)
```

```
K2 = imdiv(imsub(improduct(X1, X2), A), improduct(X1, imsum(X2, X3, 1)))
Kv_ = imabs(imdiv(K2, imsub(1, K2))) * 100
Ki_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kv_
```

'Calculo do capacitor ideal

```
Zcap_ideal = Z1_mod_ / 3 ^ 0.5
```

Cap_ideal = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_ideal)

'Balanceamento pelo capacitor ideal

Zcap_bal = complex(0, -Zcap_ideal)

X2b = imdiv(Zcap_bal, Z1_complexo)

X3b = imdiv(Zcap_bal, Z2_complexo)

K2bal = imdiv(imsub(improduct(X1, X2b), A), improduct(X1, imsum(X2b, X3b, 1)))

Kvbal_ = imabs(imdiv(K2bal, imsub(1, K2bal))) * 100

Kibal_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kvbal_

End Function

Function Kv(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

A = complex(-0.5, 3 ^ 0.5 / 2)

aa = improduct(A, A)

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

'Transformação para numero imaginário

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

'Calculo de Z1 e Z2

```
Z1_complexo = imdiv(V_1, I_1)
Z1_mod_ = imabs(Z1_complexo)
Z1_ang_ = imargument(Z1_complexo)
```

```
Z2_complexo = imdiv(V_2, I_2)
Z2_mod = imabs(Z2_complexo)
Z2_ang = imargument(Z2_complexo)
```

'Calculo do Zcap e Cap

```
Icap = imsub(IA_complexo, IC_complexo)
Icap_mod = imabs(Icap)
Zcap = imdiv(VBC_complexo, Icap)
Zcap_mod = imabs(Zcap)
Zcap_ang = imargument(Zcap)
Cap = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_mod)
```

'Calculo de Kv e Ki

```
'x1=aa-a
'x2=Zcap/Z1
'x3=Zcap/Z2
```

```
X1 = imsub(aa, A)
X2 = imdiv(Zcap, Z1_complexo)
X3 = imdiv(Zcap, Z2_complexo)
```

```
K2 = imdiv(imsub(improduct(X1, X2), A), improduct(X1, imsum(X2, X3, 1)))
```

```
Kv = imabs(imdiv(K2, imsub(1, K2))) * 100
```

```
Ki_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kv
```

'Calculo do capacitor ideal

```
Zcap_ideal = Z1_mod_ / 3 ^ 0.5
Cap_ideal_ = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_ideal)
```

'Balanceamento pelo capacitor ideal

```
Zcap_bal = complex(0, -Zcap_ideal)
X2b = imdiv(Zcap_bal, Z1_complexo)
```


X3b = imdiv(Zcap_bal, Z2_complexo)

K2bal = imdiv(imsub(improduct(X1, X2b), A), improduct(X1, imsum(X2b, X3b, 1)))

Kvbal_ = imabs(imdiv(K2bal, imsub(1, K2bal))) * 100

Kibal_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kvbal_

End Function

Function Ki(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

A = complex(-0.5, 3 ^ 0.5 / 2)

aa = improduct(A, A)

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

'Transformação para numero imaginário

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

'Calculo de Z1 e Z2

Z1_complexo = imdiv(V_1, I_1)

Z1_mod_ = imabs(Z1_complexo)

Z1_ang_ = imargument(Z1_complexo)

```
Z2_complexo = imdiv(V_2, I_2)
Z2_mod = imabs(Z2_complexo)
Z2_ang = imargument(Z2_complexo)
```

'Calculo do Zcap e Cap

```
Icap = imsub(IA_complexo, IC_complexo)
Zcap = imdiv(VBC_complexo, Icap)
Zcap_mod = imabs(Zcap)
Zcap_ang = imargument(Zcap)
Cap = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_mod)
```

'Calculo de Kv e Ki

```
'x1=aa-a
'x2=Zcap/Z1
'x3=Zcap/Z2
```

```
X1 = imsub(aa, A)
X2 = imdiv(Zcap, Z1_complexo)
X3 = imdiv(Zcap, Z2_complexo)
```

```
K2 = imdiv(imsub(improduct(X1, X2), A), improduct(X1, imsum(X2, X3, 1)))
Kv_ = imabs(imdiv(K2, imsub(1, K2))) * 100
Ki = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kv_
```

'Calculo do capacitor ideal

```
Zcap_ideal = Z1_mod_ / 3 ^ 0.5
Cap_idea_1 = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_ideal)
```

'Balanceamento pelo capacitor ideal

```
Zcap_bal = complex(0, -Zcap_ideal)

X2b = imdiv(Zcap_bal, Z1_complexo)
X3b = imdiv(Zcap_bal, Z2_complexo)

K2bal = imdiv(imsub(improduct(X1, X2b), A), improduct(X1, imsum(X2b, X3b, 1)))
Kvbal_ = imabs(imdiv(K2bal, imsub(1, K2bal))) * 100
Kibal_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kvbal_
```

End Function

Function Kvbal(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

```
A = complex(-0.5, 0.866)
```

aa = improduct(A, A)

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

'Transformação para numero imaginário

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

'Calculo de Z1 e Z2

Z1_complexo = imdiv(V_1, I_1)

Z1_mod_ = imabs(Z1_complexo)

Z1_ang_ = imargument(Z1_complexo)

Z2_complexo = imdiv(V_2, I_2)

Z2_mod = imabs(Z2_complexo)

Z2_ang = imargument(Z2_complexo)

'Calculo do Zcap e Cap

Icap = imsub(IA_complexo, IC_complexo)

Zcap = imdiv(VBC_complexo, Icap)

Zcap_mod = imabs(Zcap)

Zcap_ang = imargument(Zcap)

Cap = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_mod)

'Calculo de Kv e Ki

```
'x1=aa-a  
'x2=Zcap/Z1  
'x3=Zcap/Z2
```

```
X1 = imsub(aa, A)  
X2 = imdiv(Zcap, Z1_complexo)  
X3 = imdiv(Zcap, Z2_complexo)
```

```
K2 = imdiv(imsub(improduct(X1, X2), A), improduct(X1, imsum(X2, X3, 1)))  
Kv_ = imabs(imdiv(K2, imsub(1, K2))) * 100  
Ki_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kv_
```

'Calculo do capacitor ideal

```
Zcap_ideal = Z1_mod_ / 3 ^ 0.5  
Cap_ideal_ = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_ideal)
```

'Balanceamento pelo capacitor ideal

```
Zcap_bal = complex(0, -Zcap_ideal)  
  
X2b = imdiv(Zcap_bal, Z1_complexo)  
X3b = imdiv(Zcap_bal, Z2_complexo)  
  
K2bal = imdiv(imsub(improduct(X1, X2b), A), improduct(X1, imsum(X2b, X3b, 1)))  
Kvbal = imabs(imdiv(K2bal, imsub(1, K2bal))) * 100  
Kibal_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kvbal
```

End Function

Function Kibal(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

```
A = complex(-0.5, 0.866)  
aa = improduct(A, A)
```

```
Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()
```

'Transformação para numero imaginário

```
VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))  
VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))  
VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))
```

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

'Calculo de Z1 e Z2

Z1_complexo = imdiv(V_1, I_1)

Z1_mod_ = imabs(Z1_complexo)

Z1_ang_ = imargument(Z1_complexo)

Z2_complexo = imdiv(V_2, I_2)

Z2_mod = imabs(Z2_complexo)

Z2_ang = imargument(Z2_complexo)

'Calculo do Zcap e Cap

Icap = imsub(IA_complexo, IC_complexo)

Zcap = imdiv(VBC_complexo, Icap)

Zcap_mod = imabs(Zcap)

Zcap_ang = imargument(Zcap)

Cap = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_mod)

'Calculo de Kv e Ki

'x1=aa-a

'x2=Zcap/Z1

'x3=Zcap/Z2

X1 = imsub(aa, A)

X2 = imdiv(Zcap, Z1_complexo)

X3 = imdiv(Zcap, Z2_complexo)

```

K2 = imdiv(imsub(improduct(X1, X2), A), improduct(X1, imsum(X2, X3, 1)))
Kv_ = imabs(imdiv(K2, imsub(1, K2))) * 100
Ki_ = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kv_

```

'Calculo do capacitor ideal

```

Zcap_ideal = Z1_mod_ / 3 ^ 0.5
Cap_ideal_ = 1 / (2 * Pii * 60 * Zcap_ideal)

```

'Balanceamento pelo capacitor ideal

```

Zcap_bal = complex(0, -Zcap_ideal)

X2b = imdiv(Zcap_bal, Z1_complexo)
X3b = imdiv(Zcap_bal, Z2_complexo)

K2bal = imdiv(imsub(improduct(X1, X2b), A), improduct(X1, imsum(X2b, X3b, 1)))
Kvbal_ = imabs(imdiv(K2bal, imsub(1, K2bal))) * 100
Kibal = imabs(imdiv(Z1_complexo, Z2_complexo)) * Kvbal_

```

End Function

Function Kv_cigre(VAB, VBC, VCA)

```

beta = (VAB ^ 4 + VBC ^ 4 + VCA ^ 4) / ((VAB ^ 2 + VBC ^ 2 + VCA ^ 2) ^ 2)

Kv_cigre = ((1 - (3 - 6 * beta) ^ 0.5) / (1 + (3 - 6 * beta) ^ 0.5)) ^ 0.5 * 100

```

End Function

Function Ki_cigre(Ia, Ib, Ic)

```

Ia = Ia
Ib = Ib
Ic = Ic

beta = (Ia ^ 4 + Ib ^ 4 + Ic ^ 4) / ((Ia ^ 2 + Ib ^ 2 + Ic ^ 2) ^ 2)

Ki_cigre = ((1 - (3 - 6 * beta) ^ 0.5) / (1 + (3 - 6 * beta) ^ 0.5)) ^ 0.5 * 100

```

End Function

Function Kv_real(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

```

A = complex(-0.5, 3 ^ 0.5 / 2)

```

aa = improduct(A, A)

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

'Transformação para numero imaginário

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

Kv_real = imabs(imdiv(V_2, V_1)) * 100

End Function

Function Ki_real(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

A = complex(-0.5, 3 ^ 0.5 / 2)

aa = improduct(A, A)

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

'Transformação para numero imaginário

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

Ki_real = imabs(imdiv(I_2, I_1)) * 100

End Function

Function Kv_ang(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

A = complex(-0.5, 3 ^ 0.5 / 2)

aa = improduct(A, A)

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

'Transformação para numero imaginário

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A, IA_complexo)), 3)

I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa, IA_complexo)), 3)

Kv_ang = imargument(imdiv(V_2, V_1)) * 180 / Pii

End Function

Function Ki_ang(VAB, anguloVAB, VBC, anguloVBC, VCA, anguloVCA, Ia, anguloIA, Ib, anguloIB, Ic, anguloIC)

A = complex(-0.5, 3 ^ 0.5 / 2)

aa = improduct(A, A)

Pii = Application.WorksheetFunction.Pi()

'Transformação para numero imaginário

VAB_complexo = improduct(VAB, imexp(complex(0, anguloVAB * Pii / 180)))

VBC_complexo = improduct(VBC, imexp(complex(0, anguloVBC * Pii / 180)))

VCA_complexo = improduct(VCA, imexp(complex(0, anguloVCA * Pii / 180)))

IA_complexo = improduct(Ia, imexp(complex(0, anguloIA * Pii / 180)))

IB_complexo = improduct(Ib, imexp(complex(0, anguloIB * Pii / 180)))

IC_complexo = improduct(Ic, imexp(complex(0, anguloIC * Pii / 180)))

'Calculo de V1 e V2

V_1 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(aa, VBC_complexo), improduct(A, VCA_complexo)), 3)

V_2 = imdiv(imsum(VAB_complexo, improduct(A, VBC_complexo), improduct(aa, VCA_complexo)), 3)

'Calculo de I1 e I2

```
I_1 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(aa, IC_complexo), improduct(A,  
IA_complexo)), 3)
```

```
I_2 = imdiv(imsum(IB_complexo, improduct(A, IC_complexo), improduct(aa,  
IA_complexo)), 3)
```

```
Ki_ang = imargument(imdiv(I_2, I_1)) * 180 / Pii
```

```
End Function
```