

**REDE DOCTUM DE ENSINO
FACULDADES DOCTUM DE CARATINGA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO LIGADO
A REDE MONOFÁSICA UTILIZANDO CONVERSOR PARA SUPRIMENTO DE
FASE**

FILIFE THULER HERINGER

Trabalho de Conclusão de Curso

Caratinga/MG

2017

FILIFE THULER HERINGER

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO LIGADO
A REDE MONOFÁSICA UTILIZANDO CONVERSOR PARA SUPRIMENTO DE
FASE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso Superior de Engenharia Elétrica das Faculdades Doctum de Caratinga como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Professor Orientador: Daniel Mageste Butters.

Caratinga/MG

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO LIGADO A REDE MONOFÁSICA UTILIZANDO CONVERSOR PARA SUPRIMENTO DE FASE, elaborado pelo(s) aluno(s) FILIPE THULER HERINGER foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de ENGENHARIA ELÉTRICA das FACULDADES DOCTUM CARATINGA, como requisito parcial da obtenção do título de

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Caratinga 12 de Dezembro de 2017



Daniel Mageste

Prof. Orientador



Vinicius Murilo

Prof. Avaliador 1



Ricardo Botelho

Prof. Examinador 2

À Deus por tudo que tem feito por mim e aos meus pais que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e incentivando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guardado na estrada e concedido tudo para que meu objetivo fosse alcançado. Agradeço também o apoio dado pela minha família, em especial, aos meus pais, Márcio e Nilza, pelo exemplo e incentivo e por não terem medido esforços para que eu concluísse essa caminhada. Ao meu irmão, Márcio, acima de tudo, pelo companheirismo de sempre. À minha avó, Beatriz, pela preocupação e instruções sábias. À minha noiva, Luana, por ter me encorajado e caminhado ao meu lado. Ao meu orientador, professor Daniel pelo apoio e suporte durante essa etapa. Aos demais familiares e amigos, que acreditaram e participaram de mais um capítulo da minha história, meu muito obrigado!

“A persistência é o caminho do êxito.”
(CHARLES CHAPLIN)

THULER HERINGER, Filipe. **Análise do comportamento do motor de indução trifásico ligado a rede monofásica utilizando conversor para suprimento de fase** Caratinga, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica. Faculdades Doctum de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2017.

RESUMO

O presente trabalho visa comprovar a eficiência do conversor. A análise foi feita pela ocorrência de anomalias nos motores e pelo aumento do consumo de energia elétrica. O conversor basicamente cria através de capacitores uma fase para suprir a falta de fase no motor. O objetivo é comprovar se o uso desse artifício é viável para utilizar em motores trifásicos conectados à rede monofásica rural, onde não há rede de distribuição trifásica. Foram feitas análises das tensões, correntes, potências (ativa/reactiva/aparente), fator de potência, ângulo de fase e rotação do motor na oficina, laboratório das Faculdades Doctum de Caratinga e através de simulações no software Psim. Sendo assim, será feito um estudo para comprovar a eficácia do equipamento em questão.

Palavras chave: Motor de indução trifásico; Falta de fase; Capacitores.

THULER HERINGER, Filipe. **Análise do comportamento do motor de indução trifásico ligado a rede monofásica utilizando conversor para suprimento de fase** Caratinga, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica - Curso de Engenharia Elétrica. Faculdades Doctum de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2017.

ABSTRACT

The present work aims to prove the efficiency of the converter. The analysis was made by the occurrence of anomalies in the engines and by the increase of the electric energy consumption. The converter basically creates through the capacitors a phase to supply the lack of phase in the motor. The objective is to verify if the use of this device is feasible for use in three-phase motors connected to the single-phase rural network, where there is no three-phase distribution network. Analysis of the tensions, currents, powers (active / reactive / apparent), power factor, phase angle and motor rotation in the workshop, Faculdade Doctum de Caratinga laboratory and through simulations in Psim software were performed. Therefore, a study will be carried out to prove the effectiveness of the equipment in question

Key words: Three-phase induction motor; Lack of phase; Capacitors

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Fluxograma	16
Figura 2	– Motor de indução	17
Figura 3	– Motor trifásico com rotor gaiola	18
Figura 4	– Circuito equivalente motor trifásico	19
Figura 5	– Onda trifásica e ligação das bobinas	20
Figura 6	– Diagrama de fase	22
Figura 7	– Relação entre tensões	22
Figura 8	– Condição falta de fase	24
Figura 9	– Danos no enrolamento em Y	24
Figura 10	– Danos no enrolamento em Δ	25
Figura 11	– Triângulo de potência	27
Figura 12	– Fator de potência	27
Figura 13	– Motor de indução trifásico Eberle 5 CV	30
Figura 14	– Circuito equilibrado Psim	31
Figura 15	– Tensões	32
Figura 16	– Correntes	32
Figura 17	– Diagrama fasorial corrente	33
Figura 18	– Circuito falta de fase Psim	34
Figura 19	– Tensões	34
Figura 20	– Correntes	35
Figura 21	– Diagrama fasorial corrente	35
Figura 22	– Circuito de carga conversor	36
Figura 23	– Circuito de comando conversor	37
Figura 24	– Circuito com conversor Psim	38
Figura 25	– Tensões	38
Figura 26	– Correntes	39
Figura 27	– Diagrama fasorial	40
Figura 28	– Placa desempenadeira	41
Figura 29	– Diagrama fasorial	42
Figura 30	– Aumento de temperatura em condição de falta de fase	43
Figura 31	– Placa especificações do motor Eberle	49
Figura 32	– Especificação motor software Psim	49
Figura 33	– Fator de potência fase 1	50
Figura 34	– Fator de potência fase 2	51
Figura 35	– Fator de potência fase 3	52
Figura 36	– RPM equilibrado	54

Figura 37 – Fator de potência fase 1	55
Figura 38 – Fator de potência fase 2	56
Figura 39 – RPM falta de fase	58
Figura 40 – Fator de potência fase 1	59
Figura 41 – Fator de potência fase 2	60
Figura 42 – Fator de potência fase 3	61
Figura 43 – RPM Conversor	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Tensões e correntes circuito equilibrado	32
Tabela 2	– Potências e fator de potência circuito equilibrado	33
Tabela 3	– Tensões e correntes circuito falta de fase	35
Tabela 4	– Potências e fator de potência circuito falta de fase	35
Tabela 5	– Tensões e correntes circuito conversor	39
Tabela 6	– Potências e fator de potência circuito conversor	39
Tabela 7	– Tensões e correntes prática	40
Tabela 8	– Potências e fator de potência prática	40
Tabela 9	– Tensão e corrente prática com carga	41
Tabela 10	– Potências e fator de potência prática com carga	41
Tabela 11	– Comparação das tensões e correntes	42
Tabela 12	– Potências e fator de potência	44
Tabela 13	– RPM	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
RPM	Rotações por minuto
TCC	Trabalho de conclusão de curso

LISTA DE SÍMBOLOS

$\cos\theta$	Cosseno do ângulo
CV	Cavalos de potência
Fp	Fator de potência
°	Graus
I	Corrente
GWh	Giga watts hora
kWh	Quilo watt hora
Δ	Ligação em delta/triângulo
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
S	Potência aparente
$\text{sen}\theta$	Seno do ângulo
V	Tensão
Va	Volt Apére
Var	Volt Apére Reativo
Y	Ligação em estrela
W	Watt
μF	Micro Farad

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Máquinas elétricas	17
2.2 Motores trifásicos	18
2.3 Campo girante	19
2.4 Escorregamento	20
2.5 Torque	21
2.6 Sequência de fase	21
2.7 Falta de fase	23
2.8 Energia ativa, reativa e aparente	25
2.8.1 Energia Ativa	25
2.8.2 Energia Reativa	26
2.8.3 Energia Aparente (total)	26
2.9 Fator de potência	27
2.10 Capacitores	28
3 METODOLOGIA	30
4 RESULTADOS	31
4.1 Circuito Equilibrado	31
4.2 Falta de fase	33
4.3 Conversor	36
4.3.1 Conversor prática	39
4.3.2 Conversor prática com carga	40
4.4 Comparação dos resultados	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
APÊNDICE A Autorização Corporativa	48
APÊNDICE B Especificações do motor e do software	49
APÊNDICE C Equilibrado	50
C.0.1 Fase 1	50
C.0.2 Fase 2	51
C.0.3 Fase 3	52
C.0.4 Potências	53
C.0.5 Fator de Potência	53

C.0.6 RPM	54
APÊNDICE D Falta de fase	55
D.0.1 Fase 1	55
D.0.2 Fase 2	56
D.0.3 Potências	57
D.0.4 Fator de potência	57
D.0.5 RPM	58
APÊNDICE E Conversor	59
E.0.1 Fase 1	59
E.0.2 Fase 2	60
E.0.3 Fase 3	61
E.0.4 Potências	62
E.0.5 Fator de Potência	62
E.0.6 RPM	63
APÊNDICE F Conversor prática	64
F.0.1 Fase 1	64
F.0.2 Fase 2	64
F.0.3 Fase 3	65
F.0.4 Potências	65
F.0.5 Fator de Potência	66
APÊNDICE G Conversor com carga	67
G.0.1 Fase 1	67
G.0.2 Fase 2	67
G.0.3 Fase 3	68
G.0.4 Potências	68
G.0.5 Fator de Potência	69

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais indícios do crescimento econômico de um país, está relacionado ao consumo de energia elétrica, que tem influência na produção do setor industrial e comercial e no consumo da população quanto ao uso de aparelhos eletroeletrônicos e eletrodomésticos. Em 2016, foram consumidos cerca de 460.001 GWh de energia elétrica no Brasil, sendo cerca de 49% fornecida pelas concessionárias de energia à área industrial, que consome grande parte da energia do país (ELETROBRÁS, 2009; EPE, 2016).

Os motores elétricos são máquinas que, basicamente, convertem energia elétrica em mecânica. O primeiro foi produzido em 1886 pelo alemão Werner Von Siemens. São compostos, em sua maioria, por estator e rotor, em média responsáveis por mais de 50% do consumo de eletricidade. São classificados em indução ou assíncronos, síncronos e de corrente contínua, monofásico e trifásico. Os motores trifásicos têm apresentado boas opções quanto ao custo, comparado aos motores monofásicos. São capazes de utilizar 95% do seu consumo para gerar força motriz. Segundo dados do Procel, o único que possui etiqueta de Eficiência Energética do Programa Brasileiro de Etiquetagem, é o motor de indução trifásico (ELETROBRÁS, 2009; UNESP, 2017).

A escolha de um motor envolve vários requisitos, tais como tensão, corrente, frequência, polaridade, entre outros. Após a escolha, a instalação, manutenção e operação dentro dos padrões do motor escolhido são indispensáveis. É importante o equilíbrio entre as fases para que a energia ativa e reativa estejam circulando igualmente. A má operação, pode acarretar em anomalias. Em consequência, pode ser provocado baixo fator de potência, diminuição na eficiência do motor, redução do torque, danos nos enrolamentos, entre outros (UFRN, 2017).

A oficina “Carrocerias Manhuaçu”, situada na BR 262 KM 44,5 atua no ramo de fabricação e reforma de carrocerias de caminhões e carretas. Composta por equipamentos elétricos, a oficina dispõe de quatro motores trifásicos: dois de 5 cavalos (CV) e dois de 7 CV. No antigo endereço, situado na zona urbana de Manhuaçu/MG, a rede elétrica fornecida para oficina pela concessionária de energia elétrica, era do padrão trifásico. Atualmente, a oficina tem sua operação na zona rural, onde o padrão fornecido é monofásico. Diante deste impasse, o empresário tem usado um conversor que utiliza capacitores, um relé de tempo e um contator para partir o motor e suprir a falta de fase. Consequentemente, após o uso desse artifício a conta de energia elétrica teve um aumento considerável. Também foi relatado que após a mudança, os motores começaram a apresentar falhas. Após visitar a oficina, notou-se a necessidade da instalação de dispositivos elétricos e eletrônicos para corrigir falhas, melhorando a qualidade da energia.

O conversor tem a função de suprir fase e dar partida no motor. É composto por capa-

citores de partida, capacitores permanentes, um contator e um relé de tempo. Ao ligar o motor o contator energiza os capacitores de partida e permanentes para dar movimento ao motor. Após alguns segundos, o relé desliga o contator desenergizando os capacitores de partida e mantendo apenas os capacitores permanentes para suprir a fase que falta.

O trabalho propõe a utilização de métodos modernos à indústria com o intuito de evitar eventuais danos aos motores elétricos, visando a economia de energia elétrica e prevenindo possíveis danos aos motores. Propõe discorrer a análise do comportamento do motor de indução trifásico em condição de falta de fase, com uso de capacitores para o suprimento de fase, além de contar com medições e cálculos de grandezas elétricas que analisará a viabilidade do uso desse tipo de equipamento.

Para melhor compreensão das etapas da pesquisa foi elaborado um fluxograma como mostra a figura a seguir:

Figura 1: Fluxograma



Fonte: Próprio autor

O presente decompõe-se em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução; O segundo capítulo fará uma interpelação sobre as principais obras que dão o referencial teórico a este trabalho. Nele serão abordados temas que darão embasamento à pesquisa, tais como máquinas elétricas, motores de indução trifásico, campo girante, escorregamento, torque, ângulo de fase, falta de fase, energia ativa/reactiva/aparente, fator de potência e capacitores; No terceiro capítulo tratará a metodologia utilizada para colheita de dados e medição das grandezas elétricas; O quarto capítulo discutirá sobre os resultados obtidos através das medições, experimento em laboratório e simulação; Quinto e último capítulo tratará das considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

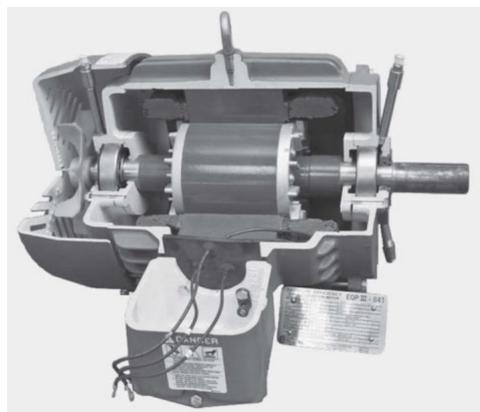
2.1 MÁQUINAS ELÉTRICAS

Segundo Umans (2014), existem dois tipos de máquinas de corrente alternada (CA): síncrona e de indução. Nas máquinas síncronas, circula uma corrente pelo enrolamento do rotor que serão geradas diretamente no estator por meio de contatos rotativos. Já nas máquinas de indução, as correntes são impulsionadas nos enrolamentos do rotor variando no tempo em relação as correntes do estator gerando o movimento do rotor em relação ao estator.

Máquinas síncronas geralmente tem o enrolamento de armadura localizado no estator e o enrolamento de campo no rotor. É gerado no enrolamento de campo por meio de corrente contínua (CC) e levado através de escovas estacionárias de carvão que estabelecem contato com anéis coletores. O enrolamento de armadura constitui-se em uma bobina com espíras localizadas no interior do estator. São formados por condutores, ligados paralelamente aos lados da bobina e em série com os terminais das conexões. O rotor gira de forma constante através de uma fonte de potência mecânica conectado ao eixo (UMANS 2014).

Nas máquinas de indução, o rotor é eletricamente curto-circuitado. Suas características são parecidas com a das máquinas síncronas. O rotor é constituído por barras sólidas de alumínio ligadas nas ranhuras do motor e por intermédio de anéis de alumínio, que são colocados em curtos circuitos localizados nas extremidades do rotor. Esse tipo de rotor resulta em motores de valor de mercado mais baratos e com nível elevado de confiabilidade (UMANS 2014). A figura a seguir apresenta um motor de indução:

Figura 2: Motor de indução



Fonte: UMANS (2014)

As máquinas de indução necessitam de CA para excitar o rotor, diferentemente das máquinas síncronas, que necessitam de CC. A máquina de indução não é excitada por uma fonte

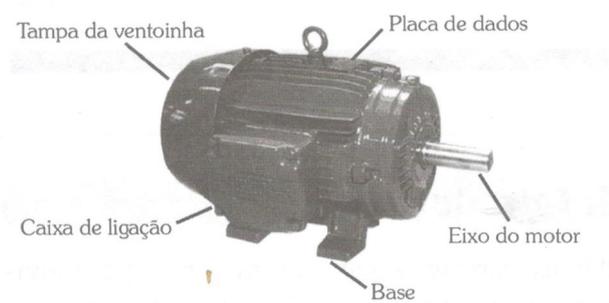
externa, pelo contrário, há uma indução de corrente no enrolamento curto-circuitado do rotor (UMANS 2014).

2.2 MOTORES TRIFÁSICOS

Segundo Nascimento Junior (2011), os motores de indução trifásicos são divididos em duas categorias: assíncronos e síncronos. Por sua robustez, facilidade na manutenção e torque de partida, os motores trifásicos assíncronos são amplamente usados por atenderem a maioria das necessidades na indústria. Justifica-se o estudo de seu funcionamento para compreender suas funções e limitações. Existem dois tipos de aspectos construtivos: Motor trifásico com rotor gaiola e com rotor bobinado.

O motor trifásico com rotor gaiola, possui o enrolamento que é responsável pelo campo girante e possui um rotor gaiola de esquilo que, em contato com o campo girante, sofre uma indução. É chamado de assíncrono, pois a velocidade do campo girante é maior que a do rotor e a diferença entre os dois é chamado de escorregamento. A montagem do enrolamento é feita com relação entre o número de polos, ranhuras e potência (NASCIMENTO JUNIOR 2011). A figura a seguir mostra um motor trifásico com rotor gaiola:

Figura 3: Motor trifásico com rotor gaiola

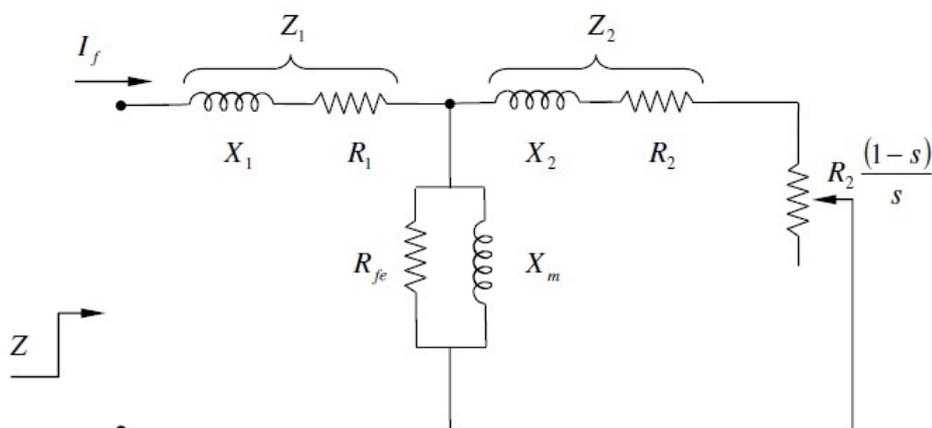


Fonte: NASCIMENTO JUNIOR (2011)

O motor trifásico com rotor bobinado tem uma partida suave devido ao fato de poder inserir resistências em série com enrolamento. Com esse tipo de rotor, é possível controlar a velocidade imposta sobre o motor. A impedância do rotor bobinado é superior a impedância do rotor gaiola pois são utilizados fios de cobre em sua construção (NASCIMENTO JUNIOR 2011).

Segundo Nascimento Junior (2015), o motor de indução trifásico é composto por um cilindro laminado com algumas ranhuras na superfície. É o mais utilizado devido sua construção resistente, reduzido custo de fabricação, necessidade de manutenção relativamente baixa e funcionamento eficiente.

O motor de indução trifásico também pode ser representado por um circuito equivalente como mostra a figura a seguir:

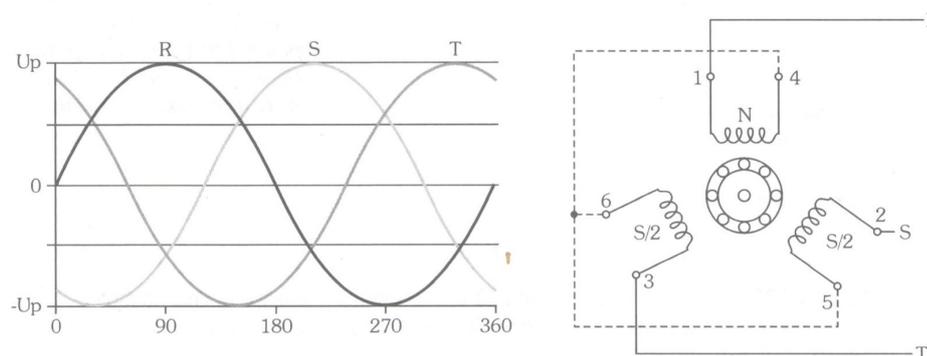
Figura 4: Circuito equivalente motor trifásico

Fonte: GONÇALVEZ 2007

Segundo WEG (2016), quando utilizado de maneira adequada, os motores de indução trabalham dentro da frequência adequada, com fator de potência relativamente elevado e com aproveitamento máximo de sua potência, por exemplo. Já quando o motor é operado de forma errônea, acarreta em diversos danos ou falhas elétricas. Estas são exemplificadas como: aumento na temperatura, bloqueio do rotor, desbalanceamento, sobrecarga, falta de fase, entre outros.

2.3 CAMPO GIRANTE

Segundo Nascimento Junior (2011), os motores trifásicos de indução necessitam de um campo magnético para dar movimento ao rotor. O campo magnético é induzido nas bobinas e depende da quantidade de corrente que passa por ela. A tensão da rede não é gerada ao mesmo tempo nas três fases, pois não há a mesma intensidade de campo criado nos enrolamentos do motor. O campo circula nas bobinas de acordo com o formato de onda senoidal trifásica. A fase é conectada na bobina que gera um campo magnético produzido pela corrente que circula no circuito. A figura a seguir mostra a onda trifásica e como são ligadas as bobinas e as fases em um motor:

Figura 5: Onda trifásica e ligação das bobinas

Fonte: NASCIMENTO JUNIOR (2011)

Quando uma bobina chega a sua intensidade máxima, as outras duas estarão em sua intensidade mínima. Quando a fase R atinge seu estado máximo, as fases S e T tem tensões menores.

2.4 ESCORREGAMENTO

Segundo Umans (2014), o escorregamento é a diferença que há entre a a velocidade síncrona e a velocidade do rotor. É definido pela equação:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.1)$$

Onde:

s = escorregamento;

n_s = velocidade síncrona do campo;

n = velocidade constante.

Para definir o escorregamento em relação a velocidade do rotor, podemos utilizar a equação:

$$n = (1 - s).n_s \quad (2.2)$$

Onde:

n = velocidade constante;

s = escorregamento;

n_s velocidade síncrona do campo.

Geralmente, o escorregamento é definido em porcentagem (%), ou seja, se s for igual a 0,13 logo $s = 1,3\%$.

2.5 TORQUE

Segundo Nascimento Junior (2011), os motores são escolhidos de acordo com sua tensão, potência e pela forma que é montado para visar vantagens para na hora da utilização não desperdiçar potência e energia elétrica. Para que o motor atenda as necessidades e tenha torque suficiente para trabalhar com uma determinada carga, deve-se levar em consideração que o conjugado do motor é superior a força que vai ser imposta sobre ele. O torque é dado pela relação entre força e distância. Para determinar CV, usa-se a seguinte equação:

$$P(CV) = \frac{T(N.m).RPM}{7024} \quad (2.3)$$

Onde:

T = Torque;

N.m = Newton metro;

RPM = Rotações por minuto.

Para calcular a rotação com uma velocidade, utilizamos:

$$N = \frac{V}{\pi.d} \quad (2.4)$$

Onde:

V = Velocidade em metro por minuto;

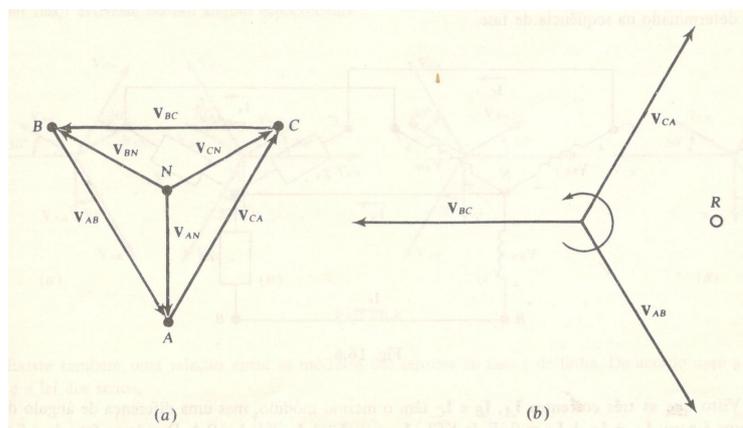
d = Diâmetro do eixo.

Vale ressaltar que para calcular e dimensionar a potência, é necessário levar em consideração os dados construtivos do motor elétrico.

2.6 SEQUÊNCIA DE FASE

Segundo O'Malley (1983), sequência de fase ocorre quando uma fase atinge seu pico máximo de corrente ou tensão. Em um circuito trifásico, tem defasamento em 120° entre as tensões de linha em um sistema equilibrado. Sua sequência pode ser positiva ou negativa. A representação das letras é definida por cada autor, podendo ser: ABC, RST, entre outros. A figura a seguir mostra a representação fasorial de uma sequência de fase:

Figura 6: Diagrama de fase

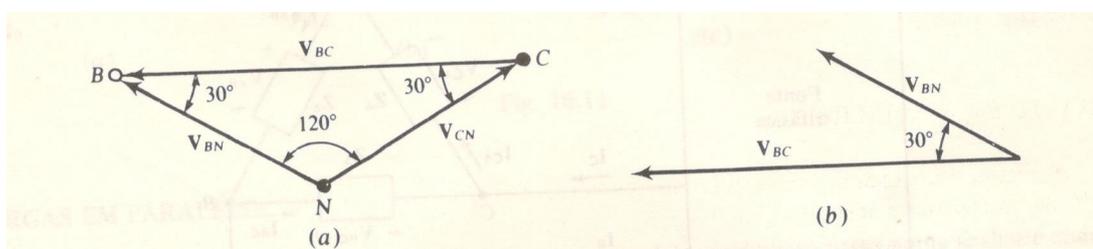


Fonte: O’MALLEY (1983)

Na figura 5(a), podemos perceber que estão girando no sentido horário onde a sequência de fase é ACB, que também pode ser denominado como sequência de fase negativo. Também mostra um diagrama onde são incluso as tensões de fase, neste caso representados por \$V_{AN}\$, \$V_{BN}\$, \$V_{CN}\$ para a sequência de fase ABC. Já na figura 5(b), o fasor está girando no sentido anti-horário onde a fase \$V_{AB}\$ passará atingirá primeiro o pico máximo, dando a sequência de ABC que também é denominada como sequência de fase positivo. O ponto R é uma referência para definir a ordem da sequência (O’MALLEY 1983).

Um circuito em estrela (Y) equilibrado possui neutro e contém tensões de fase (\$V_{AN}\$, \$V_{BN}\$, \$V_{CN}\$) e tensões de linha (\$V_{AB}\$, \$V_{BC}\$, \$V_{CA}\$). Entre as tensões de linha, o maior valor de sequência será \$120^\circ\$. Considerando um triângulo com tensões de fase, o maior ângulo é \$120^\circ\$, restando \$180^\circ - 120^\circ = 60^\circ\$, tendo em vista que são opostos e tem o mesmo comprimento, restam \$30^\circ\$ entre as tensões de fase. Portanto, a sequência de fase entre as tensões de fase é de \$30^\circ\$ (O’MALLEY 1983). A figura a seguir mostra a relação entre a tensão de fase a tensão de linha:

Figura 7: Relação entre tensões



Fonte: O’MALLEY (1983)

A relação entre as tensões de fase e tensões de linha podem ser definidas pela lei dos senos:

$$\frac{V_{BC}}{V_{BN}} = \frac{\text{sen}120}{\text{sen}30} = \frac{\sqrt{3}/2}{1/2} = \sqrt{3} \tag{2.5}$$

Portanto, podemos definir que a tensão de linha é $\sqrt{3}$ maior que a tensão de fase.

Em um circuito em delta ou triângulo (Δ) não há neutro. Portanto, existe apenas tensão da linha.

É extremamente importante que o sistema seja equilibrado, pois assim, as tensões e correntes serão as mesmas em cada fase. Em um sistema desequilibrado, nenhuma das análises dos circuitos trifásicos podem ser usadas para analisá-lo. Para este tipo de sistema, é aconselhável usar o método de análise de malhas (O'MALLEY 1983).

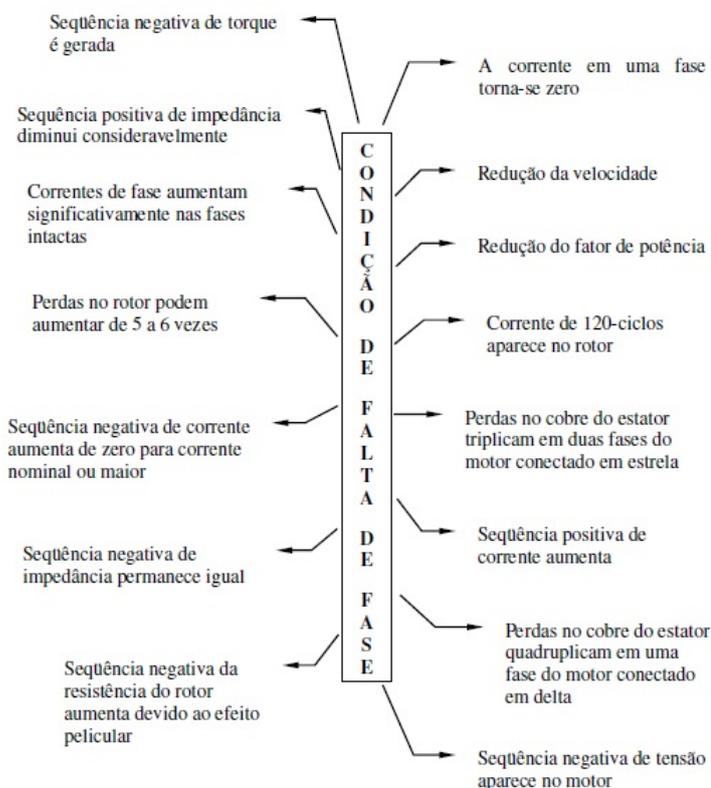
2.7 FALTA DE FASE

Segundo Gonçalves (2007), a falta de fase é uma das principais causas de queima em motores elétricos. Pode ser causada por uma abertura de fase na linha que o motor está conectado, pela abertura de um fusível ou algum dano nos cabos de alimentação.

Caso o motor não esteja em funcionamento e há falta de fase, não dará partida. No caso do mesmo estar em operação, sofrerá redução no torque, assim como na velocidade e no aumento da corrente, por exemplo. O tempo máximo que poderá operar com falta de fase está relacionado ao tempo em que o motor pode trabalhar sem a mesma, não causando danos. Desconectado ou trabalhando com falta de uma fase, o motor sofrerá uma frenagem brusca, pelo fato de não ter condições para fornecer o conjugado e queda na rotação como consequência da carga estar abaixo do conjugado. O aumento da corrente é considerável perante a falha. Motores trifásicos têm quedas bruscas na faixa de operação quando há falta de uma fase, que é cerca de 40% a 60% da carga nominal. Falhas como esta destruirão a isolação do enrolamento. Além disso, diversas reações mecânicas e elétricas podem aparecer quando a alimentação de um motor trifásico se transforma em bifásica (GONÇALVES 2007).

Um motor de indução trifásico está passível de condições adversas devido a um desbalanceamento na tensão de alimentação. Com a falta de fase o fluxo girante é gerado no motor em uma direção oposta à rotação do rotor. Operando nessa condição, gera um aumento de temperatura no rotor e, conseqüentemente, superaquecimento dos enrolamentos do estator. Ao operar nessas condições, a corrente é elevada não levando em consideração o tipo de ligação do motor (GONÇALVES 2007). A figura a seguir descreve o comportamento de um motor trifásico na condição de falta de fase:

Figura 8: Condição falta de fase



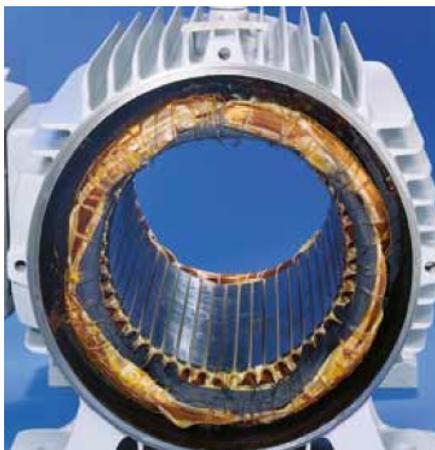
Fonte: GONÇALVEZ (2007)

Segundo WEG (2012), danos por falta de fase em motores elétricos podem ser causados por mau contato em chaves, contatores ou disjuntores; mau contato em conexões; queima de uma fase do transformador; queima de fusível. Esse tipo de dano pode acontecer tanto em ligações em Y ou Δ . As figuras a seguir mostram os danos causados pela falta de fase no enrolamento do motor.

Figura 9: Danos no enrolamento em Y



Fonte: WEG (2012)

Figura 10: Danos no enrolamento em Δ 

Fonte: WEG (2012)

2.8 ENERGIA ATIVA, REATIVA E APARENTE

Segundo WEG (2016), a energia é uma só, porém, podem ser apresentadas de uma outras formas. Um exemplo comum é ao ligar um motor a rede elétrica, transforma a energia elétrica em energia mecânica que dá movimento ao eixo. A unidade de medida utilizada para medir a potência elétrica é Watt (W) que implica a 1 volt (V) multiplicado por 1 ampere (A). Para medir a energia consumida, utiliza-se a unidade quilo watt hora (kWh) para ser cobrada do consumidor.

2.8.1 Energia Ativa

Segundo WEG (2016), energia ativa (P) é aquela que realiza trabalho. Tudo que é absorvido por ela, é transformado em energia. Sua unidade de medida é watt (W). Pode ser calculada pela fórmula:

$$P = \sqrt{3}.V.I.\cos\theta \quad (2.6)$$

$$P = S.\cos\theta \quad (2.7)$$

Onde:

P = Energia Ativa;

V = Tensão;

I = Corrente;

θ = Cosseno do ângulo

2.8.2 Energia Reativa

Segundo WEG (2016), energia reativa (Q) é a aquela que não realiza trabalho. Porém, é necessária para magnetização dos motores e armazenada em elementos como capacitores e indutores. Sua unidade de medida é dada em volt ampere reativo (VAr). É calculada pela fórmula:

$$Q = \sqrt{3}.V.I.\text{sen}\theta \quad (2.8)$$

$$Q = S.\text{sen}\theta \quad (2.9)$$

Onde:

Q = Energia reativa;

V = Tensão;

I = Corrente;

θ = Seno do ângulo

2.8.3 Energia Aparente (total)

Segundo WEG (2016), a energia aparente é o resultado da multiplicação da tensão pela corrente. Sua unidade de medida é dada em volt ampere (VA). Em sistemas monofásicos é calculado pela fórmula:

$$S = V.I \quad (2.10)$$

Em sistemas trifásicos, calcula-se pela fórmula:

$$S = \sqrt{3}.V.I \quad (2.11)$$

Onde:

S = Energia aparente;

V = Tensão;

I = Corrente.

Quando não há informação sobre a corrente do sistema, calcula-se:

$$S = \frac{P}{\cos\theta} \quad (2.12)$$

Onde:

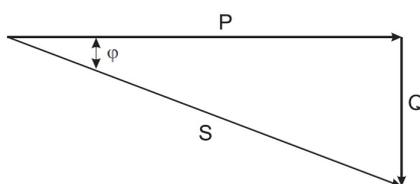
S = Energia aparente;

P = Energia ativa;

θ = Cosseno do ângulo.

Podemos representar as três energias pelo triângulo de potências indutivas. A figura a seguir representa o triângulo de potências:

Figura 11: Triângulo de potência



Fonte: WEG (2016)

2.9 FATOR DE POTÊNCIA

Segundo Mamede Filho (2017), o fator de potência é a relação entre a energia aparente (total) e a energia ativa. É definido pela equação:

$$Fp = \frac{P_{at}}{P_{ap}} \quad (2.13)$$

Onde:

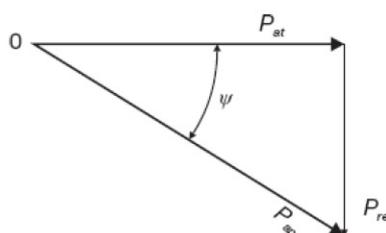
Fp = Fator de potência da carga;

Pat = Energia Ativa (kW);

Pap = Energia Aparente (kVA).

Também pode ser definido pelo cosseno do ângulo (θ) que é formado pela energia ativa e energia reativa (MAMEDE 2017). A figura a seguir mostra a relação entre eles:

Figura 12: Fator de potência



Fonte: MAMADE FILHO (2017)

Existem dois tipos de fator de potência: indutivo e capacitivo. Quando a corrente está atrasada, o fator de potência é considerado indutivo. Quando está adiantado, o fator de potência é capacitivo. Quando a corrente passa pelo mesmo ponto, ou seja, não está atrasada e nem adiantada, o fator de potência é unitário (MAMEDE FILHO, 2017).

O baixo fator de potência pode ser causado por motores trabalhando a vazio, transformadores operando a vazio, máquinas de solda, equipamentos eletrônicos, etc. Quando baixo, aumenta a circulação de energia reativa no sistema, podendo aumentar a corrente que circula na rede de distribuição (MAMEDE 2017).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou o consumo e a geração de energia reativa. No decreto nº 479 de 20 de março de 1992, estabeleceu que o fator de potência mínimo seja de 0,92 para unidades que demandam grande energia elétrica (MAMEDE FILHO 2017). Segundo Mamede Filho (2017) e de acordo com a Resolução 414 de 09/10/2010 alterada pela Resolução 569 de 23/07/2013, que define sobre os limites do fator de potência e a cobrança das taxas. Sendo assim, foi estabelecido que de 00 horas às 06 horas, será faturado o fator de potência capacitivo e de 06 horas às 24 horas, será faturado o fator de potência indutivo.

2.10 CAPACITORES

Segundo O'Malley (1983), os capacitores são capazes de armazenar energia elétrica quando alimentado por uma tensão. São formados por dois condutores e um isolador. Geralmente, quanto maior o dielétrico, maior o tamanho físico de um capacitor. Para medir a capacidade de um capacitor de armazenar energia, utilizamos a capacitância. A unidade de medida da capacitância é dada em farad (F). Geralmente, utilizamos a grandeza de microfarad (μF) ou picofarad (pF). Para calcular a capacitância usa-se:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.14)$$

Onde:

C = Capacitância;

Q = Carga em coulomb;

V = Tensão

Em um circuito formado por capacitores em paralelo, podemos encontrar a capacitância total (equivalente) através da fórmula:

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 \dots \quad (2.15)$$

Segundo Boylestad (2012), existem duas categorias de capacitores: fixo e variáveis. Capacitores fixos possuem apenas um valor de capacitância. Um exemplo de capacitor fixo, é o eletrolítico. O capacitores eletrolíticos são identificados por terem suas informações descritas no corpo físico do mesmo. Apesar do nível de tensão ser limitado, fornecem os valores mais altos de capacitância. Variam entre $0,1 \mu F$ a $15.000 \mu F$. Para variar a capacitância, utiliza-se os capacitores variáveis.

Segundo MKN, em motores monofásicos é comum o uso de capacitores de partida. Justifica-se seu uso pois ele cria uma diferença entre as fases que é necessária entre os campos magnéticos para criar um torque na partida do motor. São usados em duas configurações básicas: uso permanente e uso instantâneo. Em uso permanente, o capacitor é diretamente usado nas bobinas do motor sem a utilização de relé. Quando ligado, o capacitor sustenta a partida e continua ligado. Já em uso instantâneo, é ligado a um relé que após o motor atingir cerca de 75% da rotação nominal, desliga a chave. Os capacitores armazenam energia elétrica conforme a tensão que é aplicada. Não são utilizados capacitores para dar partida em motores trifásicos.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho trata-se de um estudo de caso. Foi desenvolvido com a máxima busca de informações relacionados ao tema e foi criado um referencial teórico para comprovar a eficácia do tema em questão.

Foram feitos levantamentos de estudos de caso; levantamento bibliográfico de artigos em bases de dados como: Google Acadêmico, Scielo e Dialnet, selecionando artigos no idioma português entre 2007 a 2017, utilizando-se das palavras-chave: Motor de indução trifásico, capacitores e falta de fase em motores elétricos, a fim de solidificar e somar conhecimento sobre o assunto. Também foram utilizados livros com conteúdos pertinentes ao tema.

Para análise prática, foi utilizado o motor de indução trifásico da marca Eberle (Apêndice B) como mostra a figura a seguir:

Figura 13: Motor de indução trifásico Eberle 5 CV



Fonte: Próprio autor

Para as medições das grandezas elétricas, utilizou-se o alicate wattímetro da marca Minipa modelo ET-4055, disponibilizado pela instituição Faculdades Doctum de Caratinga. Foram feitas medições na oficina e no laboratório de máquinas elétricas da faculdade para obter o máximo de dados possíveis. Para simular o circuito, utilizou-se o software Psim. Analisou-se o conversor, extraindo informações do circuito equivalente e de comando.

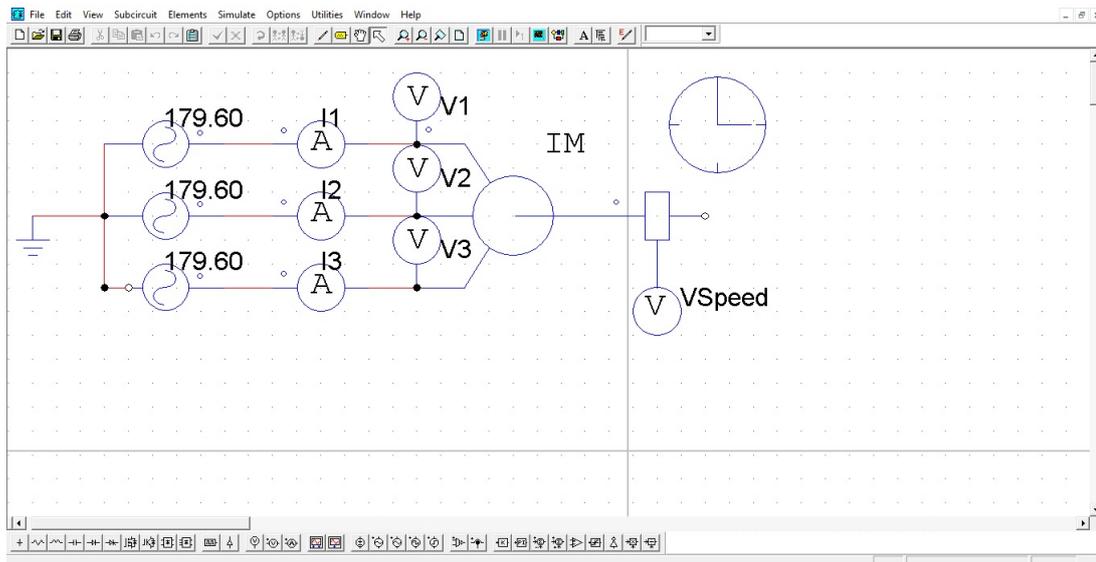
4 RESULTADOS

Este capítulo abordará sobre os resultados obtidos através das simulações e medições feitas na oficina e no laboratório das Faculdades Doctum de Caratinga.

4.1 CIRCUITO EQUILIBRADO

Basicamente, para um circuito ser equilibrado, são necessárias fontes iguais com defasamento de 120° entre elas, assim como as cargas, também necessariamente iguais. A figura a seguir mostra o circuito equilibrado montado no software Psim.

Figura 14: Circuito equilibrado Psim



Fonte: Próprio autor

Para se obter o valor de pico das fontes, multiplicaremos o valor nominal por $\sqrt{2}$. Ou seja:

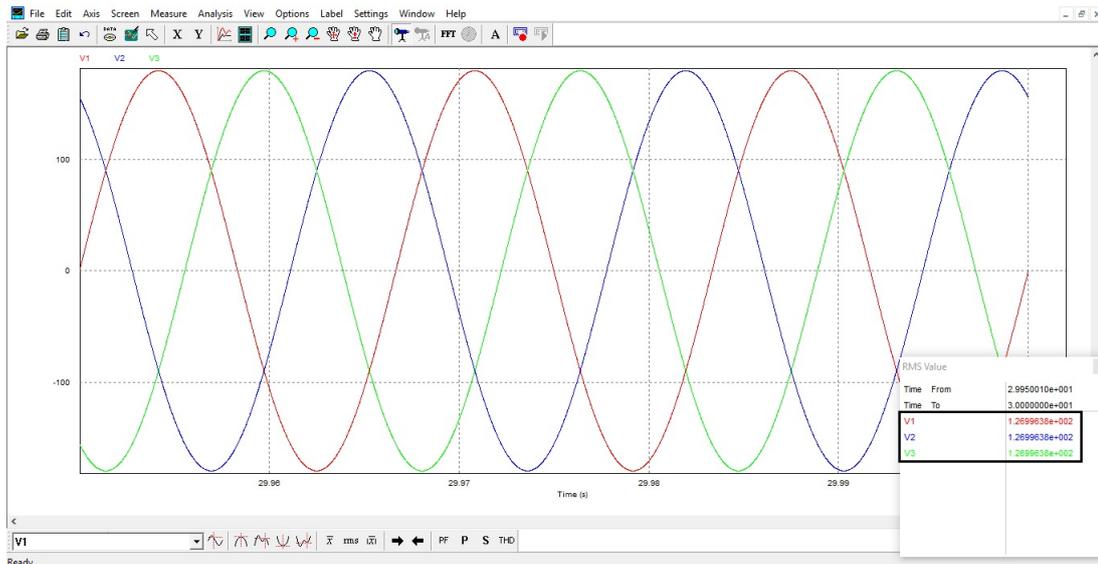
$$V_p = V_n \cdot \sqrt{2} \quad (4.1)$$

$$V_p = 127 \cdot \sqrt{2} \quad (4.2)$$

$$V_p = 179,60V \quad (4.3)$$

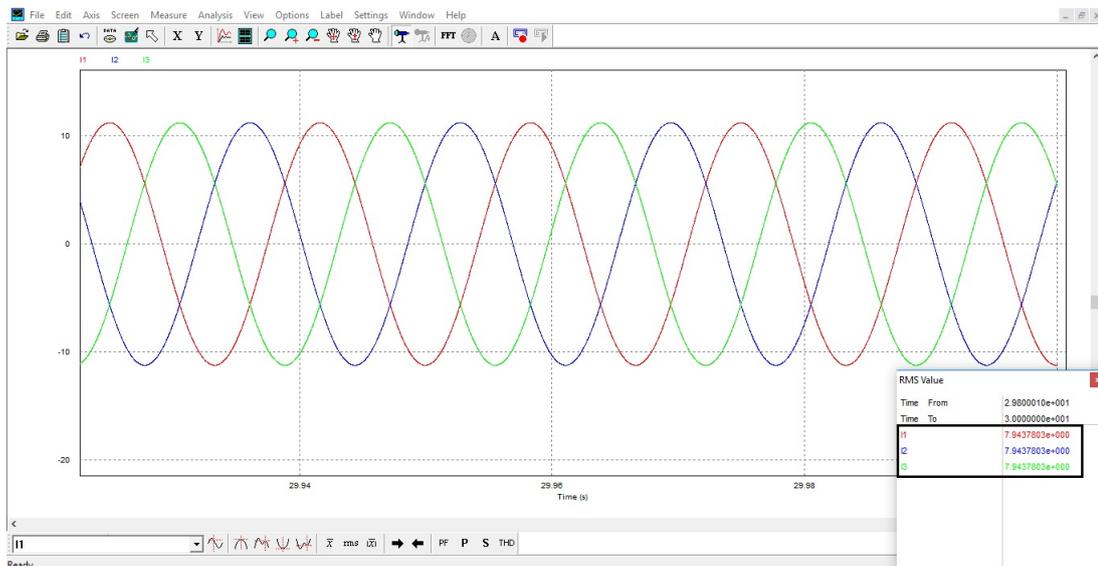
Como resultado das simulações, obtiveram-se os valores das tensões e correntes, como mostram as figuras e a tabela a seguir:

Figura 15: Tensões



Fonte: Próprio autor

Figura 16: Correntes



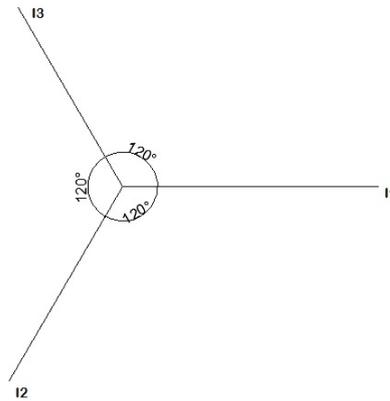
Fonte: Próprio autor

Tabela 1: Tensões e correntes circuito equilibrado

	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
FASE 1	126,9	7,94
FASE 2	126,9	7,94
FASE 3	126,9	7,94

Fonte: Próprio autor

Nota-se que as tensões e correntes por fase são iguais. Nessa configuração, as correntes possuem defasagem de 120° entre elas, o que define um circuito equilibrado. A figura a seguir representa um diagrama fasorial equilibrado:

Figura 17: Diagrama fasorial corrente

Fonte: Próprio autor

Pode-se obter os valores da potência ativa, reativa, aparente e o fator de potência (Apêndice C) utilizando os dados gerados pelo software Psim representado na tabela a seguir:

Tabela 2: Potências e fator de potência circuito equilibrado

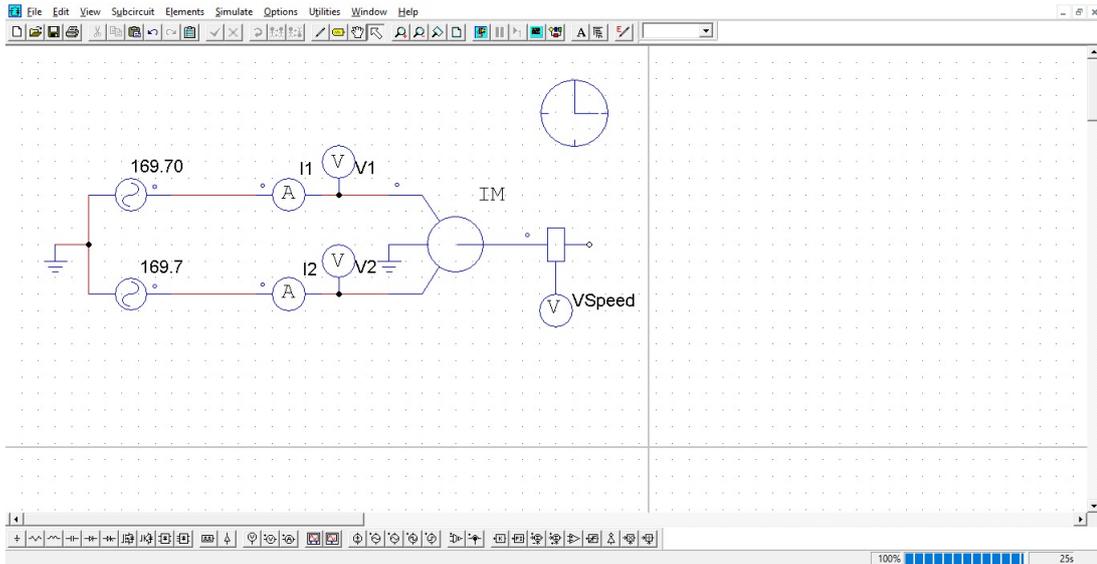
	P (W)	Q (Var)	S (Va)	Fp
FASE 1	18,13	1.007,41	1.007,58	0,018
FASE 2	18,13	1.007,41	1.007,58	0,018
FASE 3	18,13	1.007,41	1.007,58	0,018
TOTAL	54,39	3.022,23	3.022,74	0,018

Fonte: Próprio autor

4.2 FALTA DE FASE

Nesta etapa, será simulado o motor ligado a rede monofásica com falta de uma fase. A figura a seguir representa o circuito com falta de fase:

Figura 18: Circuito falta de fase Psim



Fonte: Próprio autor

Neste caso, as fontes estão defasadas em 180°. Para se obter o valor de pico da fonte, multiplicaremos a tensão nominal por $\sqrt{2}$. Ou seja:

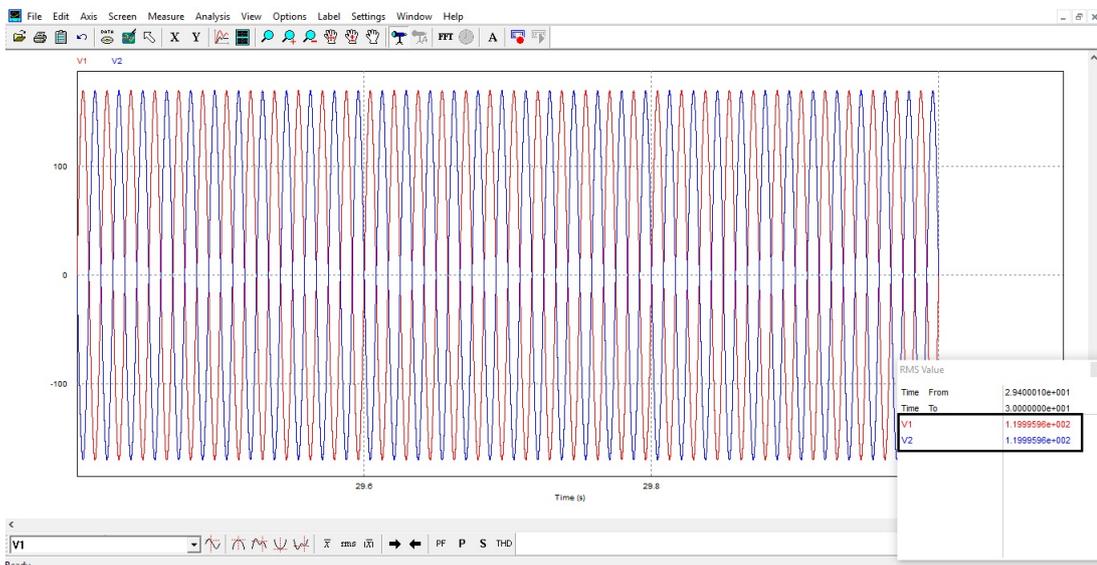
$$V_p = V_n \cdot \sqrt{2} \tag{4.4}$$

$$V_p = 120 \cdot \sqrt{2} \tag{4.5}$$

$$V_p = 169,7V \tag{4.6}$$

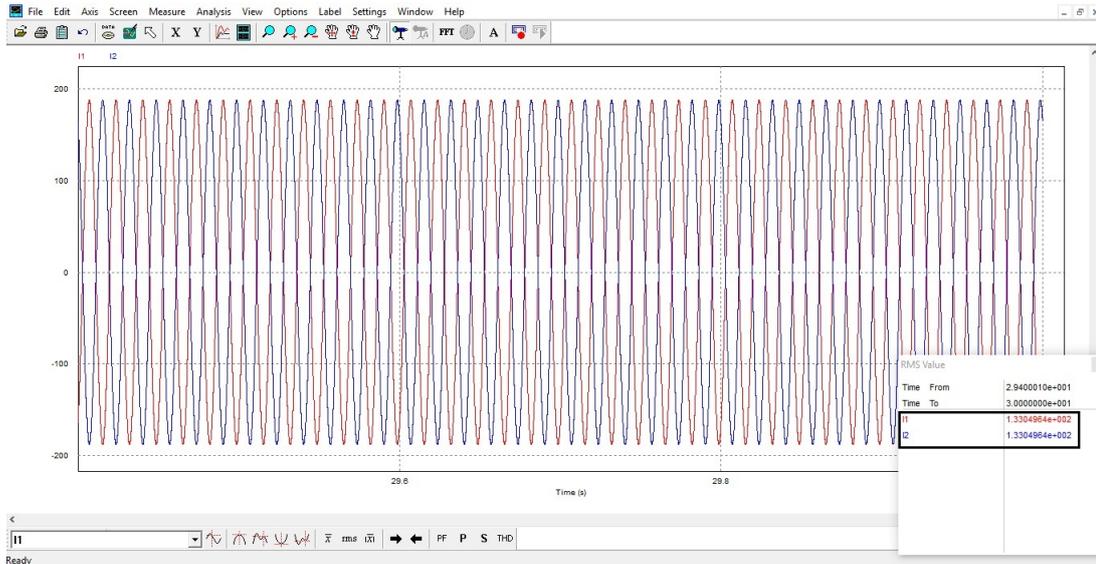
Foram gerados pelo software os gráficos referentes a tensão e corrente, como mostram as figuras e a tabela a seguir:

Figura 19: Tensões



Fonte: Próprio autor

Figura 20: Correntes



Fonte: Próprio autor

Tabela 3: Tensões e correntes circuito falta de fase

	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
FASE 1	119,9	133,04
FASE 2	119,9	133,04

Fonte: Próprio autor

Como mostrado nos gráficos, a corrente de pico mantém-se constante durante o tempo de simulação.

Os valores das potências ativa, reativa, aparente e o fator de potência (Apêndice D) foram fornecidos pelo software como mostra a tabela a seguir:

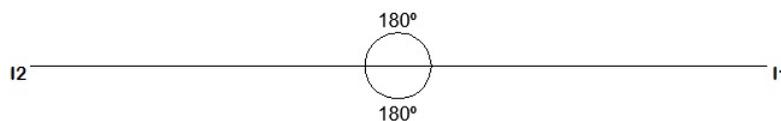
Tabela 4: Potências e fator de potência circuito falta de fase

	P (W)	Q (Var)	S (Va)	FP
FASE 1	7.494,94	14.075,61	15.946,7	0.47
FASE 2	7.494,94	14.075,61	15.946,7	0.47
TOTAL	14.989,89	28.151,23	31.893,4	0,47

Fonte: Próprio autor

Também pode-se representar o diagrama fasorial demonstrado na figura a seguir:

Figura 21: Diagrama fasorial corrente



Fonte: Próprio autor

Com a falta de uma fase, teoricamente, há uma defasagem de 180° entre as correntes considerando o circuito equilibrado.

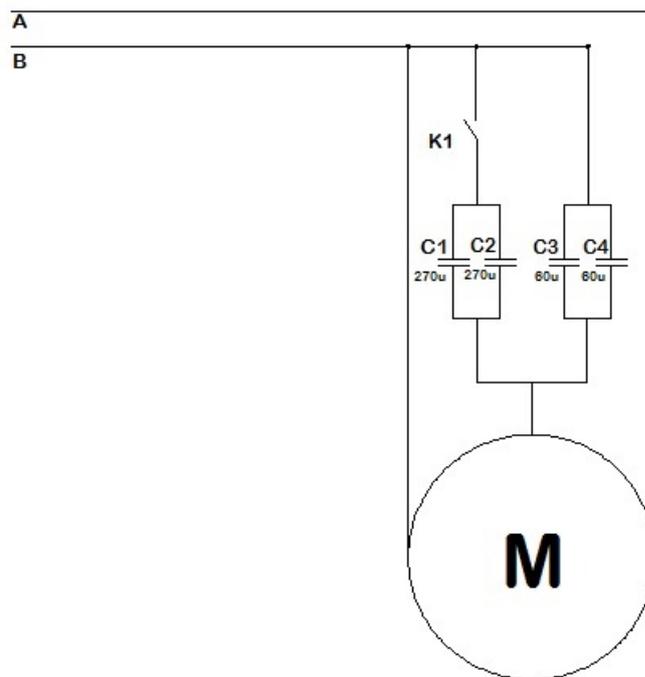
4.3 CONVERSOR

O conversor é composto por:

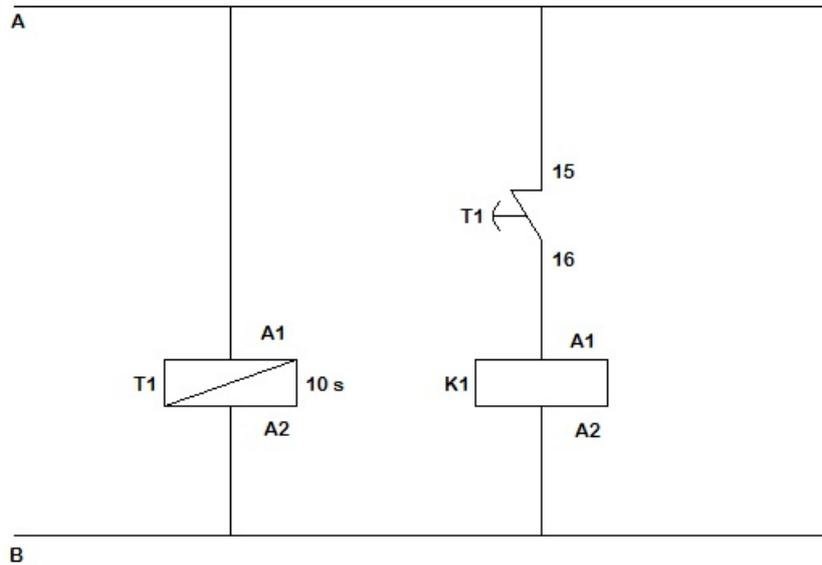
- 1 Relé temporizado Digimec modelo DTE-01;
- 1 Contator CJX2 modelo 1210;
- 2 Capacitores Epcos polipropileno de $60\mu\text{F}$;
- 2 Capacitores JL eletrolítico 270 - $324\mu\text{F}$.

As figuras a seguir mostram o circuito de carga e comando do conversor:

Figura 22: Circuito de carga conversor



Fonte: Próprio autor

Figura 23: Circuito de comando conversor

Fonte: Próprio autor

O conversor tem a função de gerar uma fase no motor. Ele adiciona uma capacitância em série em um dos terminais do motor, gerando uma defasagem na corrente para criar o campo magnético girante e dar partida no motor. As simulações foram feitas desconsiderando o momento da partida. Analisou-se apenas o estado de regime permanente. Os capacitores responsáveis por gerar corrente para a fase em regime permanente são os de $60\mu\text{F}$.

Neste caso, as fontes estão defasadas em 180° . Para se obter o valor de pico da fonte, multiplicaremos a tensão nominal por $\sqrt{2}$. Ou seja:

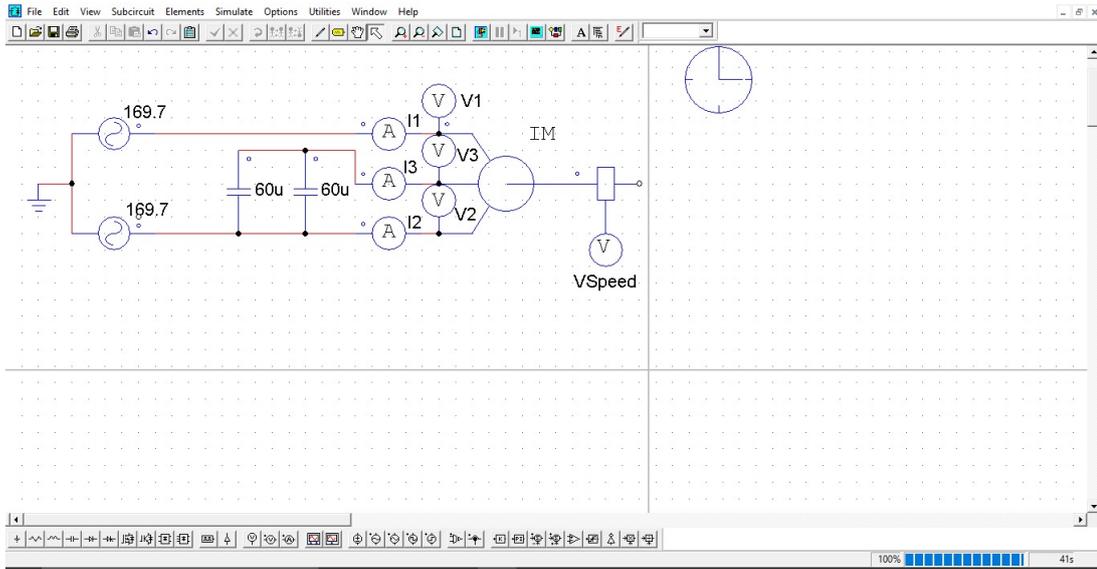
$$V_p = V_n \cdot \sqrt{2} \quad (4.7)$$

$$V_p = 120 \cdot \sqrt{2} \quad (4.8)$$

$$V_p = 169,7V \quad (4.9)$$

A figura a seguir mostra o circuito com conversor montado no software Psim:

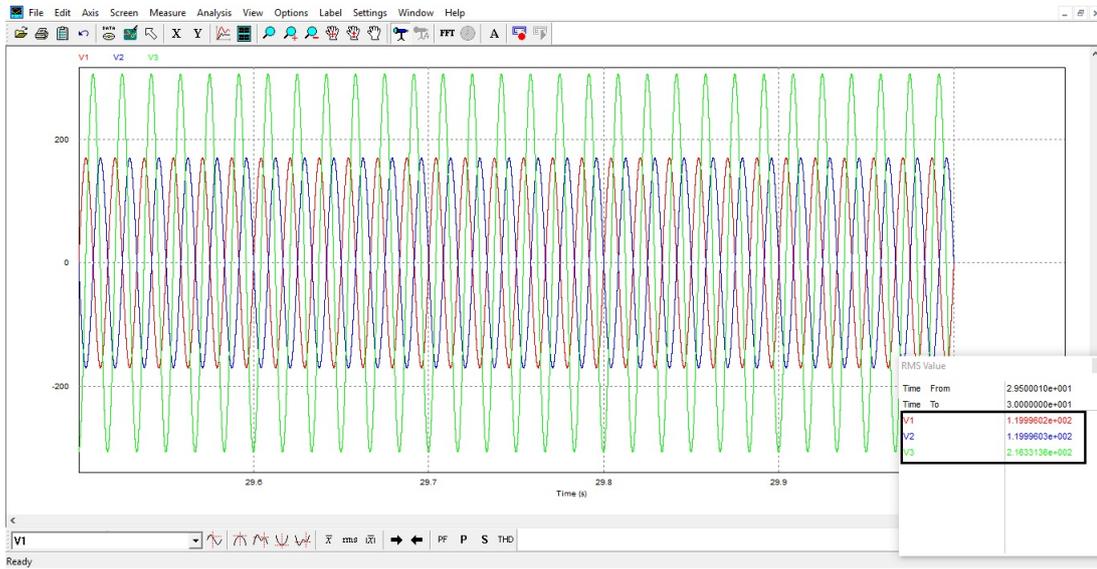
Figura 24: Circuito com conversor Psim



Fonte: Próprio autor

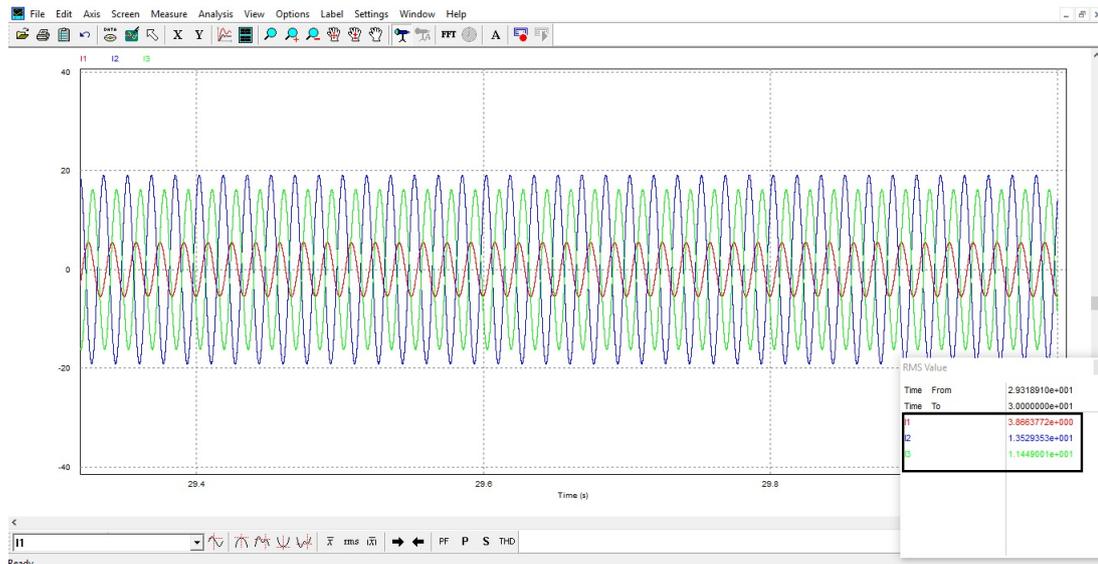
Os valores de tensão e corrente foram gerados pelo software, como mostram as figuras e tabela a seguir:

Figura 25: Tensões



Fonte: Próprio autor

Figura 26: Correntes



Fonte: Próprio autor

Tabela 5: Tensões e correntes circuito conversor

	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
FASE 1	119,9	3,86
FASE 2	119,9	13,52
FASE 3	216,33	11,44

Fonte: Próprio autor

Como pode-se perceber, as correntes e tensões estão em total desequilíbrio. Um circuito desequilibrado pode gerar vibrações e aumento na temperatura do motor.

A tabela a seguir mostra os valores das potências ativa, reativa, aparente e o fator de potência (Apêndice E) gerados pelo software:

Tabela 6: Potências e fator de potência circuito conversor

	P (W)	Q (Var)	S (Va)	Fp
FASE 1	50,90	460	462,81	0,11
FASE 2	-1.102,30	1.188,56	1.621,04	-0,68
FASE 3	1.163,16	2.184,43	2.474,81	0,47
TOTAL	2.316,36	3.832,99	4.478,54	0,51

Fonte: Próprio autor

4.3.1 Conversor prática

Na prática, os valores de corrente e tensão obtidos através das medições foram:

Também obtiveram-se os valores das potências ativa, reativa, aparente e o fator de potência (Apêndice F). A tabela a seguir retrata esses valores:

Tabela 7: Tensões e correntes prática

	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
FASE 1	124	5
FASE 2	129	12
FASE 3	105,1	10,5

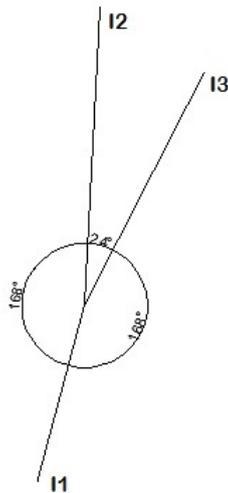
Fonte: Próprio autor

Tabela 8: Potências e fator de potência prática

	P (W)	Q (Var)	S (Va)	FP
FASE 1	601,4	150,72	620	0,97
FASE 2	-665,64	1.397,57	1.548	-0,43
FASE 3	463,49	1.001,49	1.103,55	0,42
TOTAL	1.730,53	2.549,76	3.081,57	0,56

Fonte: Próprio autor

A figura a seguir representa o diagrama fasorial:

Figura 27: Diagrama fasorial

Fonte: Próprio autor

4.3.2 Conversor prática com carga

O motor é ligado à máquina, chamada "Plaina desempenadeira", como mostra a figura a seguir:

Figura 28: Plaina desempenadeira

Fonte: Próprio autor

Essa máquina é usada para desempenar e dar acabamento a madeiras. É constantemente acionada durante o dia e tem tempo de uso de mais ou menos 10 minutos após ligada.

Para medições, foi utilizada uma peça de madeira como carga para uma situação real do uso da máquina. Foram medidas as tensões e correntes, como mostra a tabela a seguir:

Tabela 9: Tensão e corrente prática com carga

	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
FASE 1	127	7,5
FASE 2	136	15,8
FASE 3	145	11,8

Fonte: Próprio autor

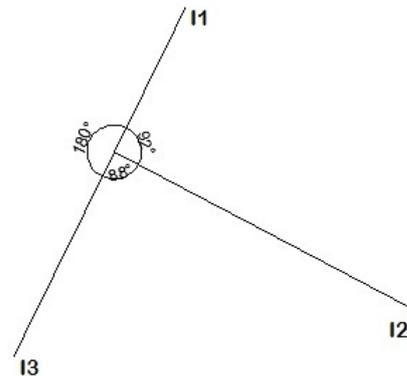
Através desses valores medidos, foram obtidos os valores das potências e do fator de potência (Apêndice G), como mostra a tabela a seguir:

Tabela 10: Potências e fator de potência prática com carga

	P (W)	Q (Var)	S (Va)	Fp
FASE 1	942,97	134,36	952,5	0,99
FASE 2	1.998,38	789,81	2.148,8	0,93
FASE 3	804,17	1.510,24	1.711	0,47
TOTAL	3.745,52	2.437,41	4.468,76	0,83

Fonte: Próprio autor

A figura a seguir mostra o diagrama fasorial obtido através das medições:

Figura 29: Diagrama fasorial

Fonte: Próprio autor

4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A tabela a seguir mostra os resultados obtidos na prática e na simulação:

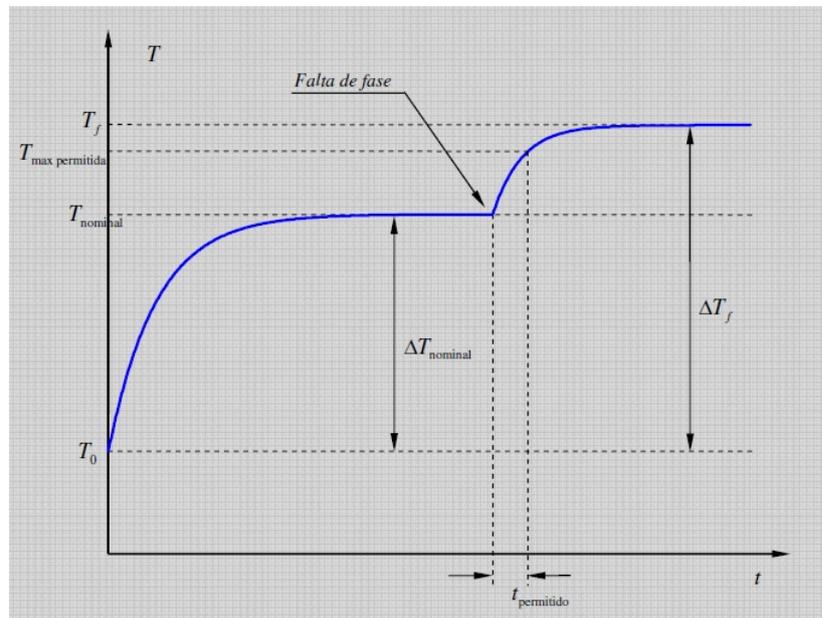
Tabela 11: Comparação das tensões e correntes

	V1	V2	V3	I1	I2	I3
Equilibrado	126,9	126,9	126,9	7,94	7,94	7,94
Falta de fase	119,9	119,9	-	133,04	133,04	-
Conversor	119,9	119,9	216,33	3,86	13,52	11,44
Conversor (Prática)	124	129	105,1	5	12	10,5
Conversor (Carga)	127	136	145	7,5	15,8	11,8

Fonte: Próprio autor

No sistema equilibrado, pode-se perceber que todas as fases têm o mesmo valor de tensão, corrente e têm defasamento de 120° entre elas. Os motores trifásicos foram considerados pelo ponto de vista econômico, o mais viável. São mais potentes em relação aos monofásicos e possuem versatilidade na escolha das tensões.

Uma das maiores causas de queima de motor de indução trifásico, é a falta de fase. As tensões e correntes também são iguais nas fases. Porém, como percebemos, a corrente de pico se mantém constante durante todo o tempo. Na prática, esse motor não partiria, pois não existe campo magnético girante. Como consequência, a temperatura do motor é elevada como mostra a figura a seguir:

Figura 30: Aumento de temperatura em condição de falta de fase

Fonte: GONÇALVES (2017)

Após a queda de uma fase no circuito, a temperatura aumentou em relação a temperatura em um circuito equilibrado.

O circuito desequilibrado tem correntes e cargas diferentes. Utilizando o conversor, pode-se perceber que a fase 1 tem corrente baixa, a fase 2 corrente alta e a fase 3 (do conversor), corrente média em relação às fases 1 e 2. Esse desequilíbrio causa excesso de corrente em uma das fases, gerando o aumento da temperatura de operação. Na prática, quando é dado partida no motor, o desequilíbrio entre as fases gera uma vibração, pois a força radial é diferente de zero. Ligado ao conversor, não se pode configurar o relé com tempo alto, pois os capacitores eletrolíticos tem tensão limitada de uso. Ao usar, durante um certo tempo de partida alto, o capacitor pode abrir, causando frenagem brusca do motor. Pode-se perceber que há uma sobretensão na fase 2. Com o tempo de uso, foi relatado pelo empresário que houve bloqueio do rotor do motor.

Com carga, houve aumento de tensão na fase 2 que vem da rede de distribuição e na fase 3 onde estão ligados os capacitores. Houve aumento de corrente devido a carga imposta sobre o motor. Isso acontece pois, ao atribuir a carga na máquina, o motor demanda de mais potência para que se possa realizar a operação em questão. Também houve uma sobretensão na fase 2 e 3.

Também houve diferenças entre os resultados das potências e fator de potência como mostra a tabela a seguir:

Tabela 12: Potências e fator de potência

	Pt (W)	Qt (Var)	St (Va)	Fp
Equilibrado	54,39	3.022,23	3.022,74	0,018
Falta de fase	14.989,89	28.151,23	31.893,4	0,47
Conversor	2.316,36	3.832,99	4.478,54	0,51
Conversor prática	1.730,53	2.549,76	3.081,57	0,56
Conversor carga	3.745,52	2.434,41	4.468,76	0,83

Fonte: Próprio autor

No circuito equilibrado, o motor está operando a vazio. Consequentemente, há uma maior circulação de energia reativa e pouca circulação de energia ativa, gerando baixo fator de potência. Se estivesse com carga, a circulação energia reativa diminuiria e o aproveitamento da energia ativa seria maior, aumentando o fator de potência.

Com falta de uma fase, esse motor queimaria após instantes ligados. Percebemos que as potências estão acima da sua potência nominal. Isso causaria uma sobrecarga no motor e na rede de distribuição de energia interna da oficina.

Ligando o motor com conversor a vazio, percebemos que a demanda de potência do motor aumentou. Comparando com o circuito equilibrado, o circuito onde há o conversor sofre um aumento nas potências. Isso é causado pelo desequilíbrio entre as tensões e correntes no circuito. Vale ressaltar que, no circuito onde há o conversor, a potência P2 está fornecendo potência para P3. Denomina-se potência ativa fundamental de sequência negativa.

Na prática, quando é operado a vazio, há maior circulação de energia reativa gerando um baixo fator de potência.

Com carga, pode-se observar que houve uma melhora momentânea na energia ativa e diminuição da energia reativa, consequentemente melhorando o fator de potência, no instante que a carga passa pela máquina. A maior parte do tempo, esse motor opera a vazio.

Houve perdas na rotação do motor, como mostra a tabela a seguir:

Tabela 13: RPM

	RPM
Equilibrado	1.770
Falta de fase	$0,7 \times 10^{-7}$
Conversor	1.570

Fonte: Próprio autor

No sistema equilibrado, o motor estabiliza em sua rotação nominal. Já com falta de fase, fica comprovado que o mesmo não partiria porque falta tensão e corrente para fazer a magnetização necessária para dar movimento. Ligado ao conversor, o motor parte, porém, quando estabiliza, perde rotação. Isso reflete também quando há carga sobre ele. Por isso o aumento das correntes no circuito.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um sistema equilibrado é importante para a operação dos motores elétricos. Nessa configuração, os motores trabalham com tensões, correntes, potências e fator de potência dentro das especificações. Não é possível dar partida em um motor de indução trifásico com falta de uma fase. O mesmo teria seus enrolamentos queimados e danificados.

Portanto, conclui-se que a utilização de capacitores para suprimento de fase em motores de indução trifásico é inviável. As tensões e correntes não são uniformes nas fases como em um sistema trifásico equilibrado. A defasagem angular em redes monofásicas rurais é de 180° , entretanto, nessa configuração, não chega a dar 120° entre as fases. Com uso do conversor a temperatura do motor é elevada além da nominal. Por conta do desequilíbrio, é gerada uma vibração na partida do motor. O fator de potência é baixo, tanto a vazio quanto com carga, e não estão dentro da norma da ANEEL. Há mais circulação de energia reativa do que energia ativa. Houve perda na velocidade do motor.

Utilizando o conversor, o motor não terá a mesma vida útil como se estivesse ligado em um sistema trifásico equilibrado. Nesse configuração há um consumo maior de energia elétrica, pois exige mais potência do motor. Também há consumo de energia pelo superaquecimento do motor e condutores, já que os mesmos não estão devidamente dimensionados.

O problema principal foi analisado e representado através deste estudo. Uma das dificuldades encontradas durante a análise foi a aquisição de biografias relacionadas ao objetivo principal do trabalho. Por não se tratar de uma prática do meio acadêmico, não foram encontrados bibliografias que falam especificamente sobre o tema, o que dificultou a análise dos dados e que evidencia a necessidade de maiores estudos e pesquisas sobre conteúdo supracitado.

O estudo foi eficaz no que foi proposto. A hipótese foi comprovada teoricamente pelo referencial, porém havia a necessidade de se comprovar na prática e através de softwares. O estudo em questão proporcionou desafios pela limitação de conteúdos sobre o assunto. A presente análise comprovou-se a hipótese tanto na teoria quanto na prática.

Como objetivo principal, foi comprovado que os capacitores não proporcionam uma boa opção para quem deseja suprir uma fase no motor de indução trifásico. Para que os motores trabalhem dentro de suas respectivas especificações, sugere-se ao empresário um estudo sobre aumento de carga (aumento de fase para transformar o sistema em trifásico) ou implantação de inversor de frequência para controlar e usar os motores dentro de suas especificações.

Para trabalhos futuros, podem ser feitas análises bloqueando o rotor para se obter o máximo de dados internos possíveis do motor do estudo em questão, adquirindo os valores exatos entre simulação/prática. Outra opção, é analisar motores de 7,5 CV em que os valores dos capacitores de partida e permanentes são dobrados. As cargas impostas sobre esses motores são

maiores e exigem maior potência da rede de distribuição interna da oficina. Também podem ser feitos projetos para melhoria da qualidade de energia elétrica e da proteção dos equipamentos existentes na oficina.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOYLESTAD, Robert L. *Introdução a análise de circuitos*. São Paulo: Pearson, 2012. p. 334-377.
- Consumo de energia elétrica no Brasil cai 0,9% em 2016*. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumodeenergiael%C3%A9tricoBrasilcai0,9em2016.aspx>>. Acesso em: 19 de agosto de 2017.
- ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A. *Motor Elétrico*. Disponível em: <https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/Motor_eletrico.pdf>. Acesso em: 20 de março 2017.
- GONÇALEZ, Fábio Gonçalves. *Estudo do motor de indução trifásico e desenvolvimento de um dispositivo de proteção efetiva de motores operando em condições anormais: Rotor bloqueado e falta de fase*. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/89869>>. Acesso em: 22 de março 2017.
- MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas industriais*. São Paulo: GEN - Grupo Editorial Nacional Participações S/A, 2017.
- Manutenção em Motores Elétricos*. Disponível em: <<http://www.dee.ufrn.br/joao/manut/10%20-%20Cap%EDtulo%208.pdf>>. Acesso em: 21 de março 2017.
- MKN. *Capacitor de partida*. Disponível em: <<http://www.mkn.com.br/manuais/capacitor.pdf>>. Acessado em: 22 de março de 2017.
- Motor de Indução Trifásico*. Disponível em: <<http://www.ifba.edu.br/professores/castro/MIT.pdf>>. Acesso em: 21 de março 2017.
- NASCIMENTO JUNIOR, Geraldo Carvalho do. Motores de indução trifásico CA. *Máquinas elétricas: Teoria e Ensaio*. São Paulo: Érica, 2011. p. 187-195.
- O'MALLEY, John. Circuitos trifásicos. *Análise de circuitos*. São Paulo: MacGraw-Hill do Brasil, 1983. p. 336-345.
- PSIM, Software for Power Electronics Simulation for Windows 2010. *PSIM Version 9.0.3*. Powersim Corporation, 2017.
- UMANS, Stephen D. *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. Alegre: AMGH, 2014. p. 262-403.
- UNESP, Universidade Estadual Paulista. *Motores Elétricos*. Disponível em: <<http://www.mario loureiro.net/tecnica/electrif/motores.pdf>>. Acesso em: 20 de março 2017.
- WEG S.A. *Danos em Enrolamentos*. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-danos-em-enrolamentos-motores-trifasicos-50009255-guia-de-instalacao-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 21 de março 2017.

APÊNDICE A AUTORIZAÇÃO COORPORATIVA



OFÍCIO DE SOLICITAÇÃO

Ilustríssimo Sr. Wemerson Machado

Empresário da oficina Carrocerias Manhuaçu

Solicitamos a autorização para citar informações que venham contribuir para pesquisa de cunho científico (TCC – Trabalho de conclusão de curso), que será desenvolvido pelo Sr. Filipe Thuler Heringer, brasileiro, solteiro, estudante, inscrito no CPF sob o número 088.129.596-52, residente e domiciliado à Rua Mary Coelho Campos, 92, Alfa Sul, Manhuaçu/MG.

Os dados necessários à pesquisa citada acima, referem-se ao uso do conversor para suprimento de uma fase nos motores trifásicos da oficina.

Wemerson Machado

Manhuaçu/MG, 22/11/2017

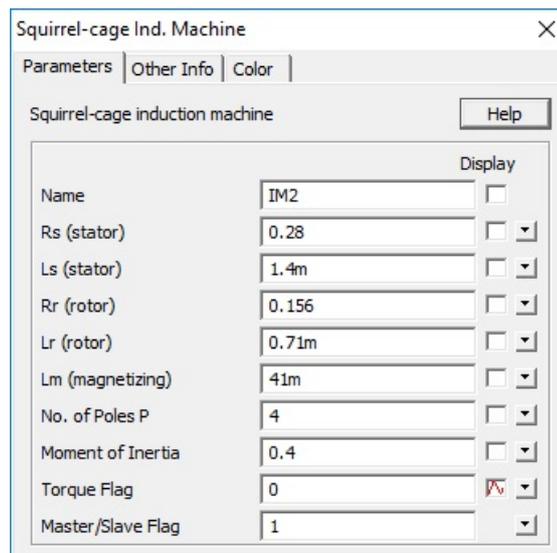
APÊNDICE B ESPECIFICAÇÕES DO MOTOR E DO SOFTWARE

Figura 31: Placa especificações do motor Eberle



Fonte: Próprio autor

Figura 32: Especificação motor software Psim

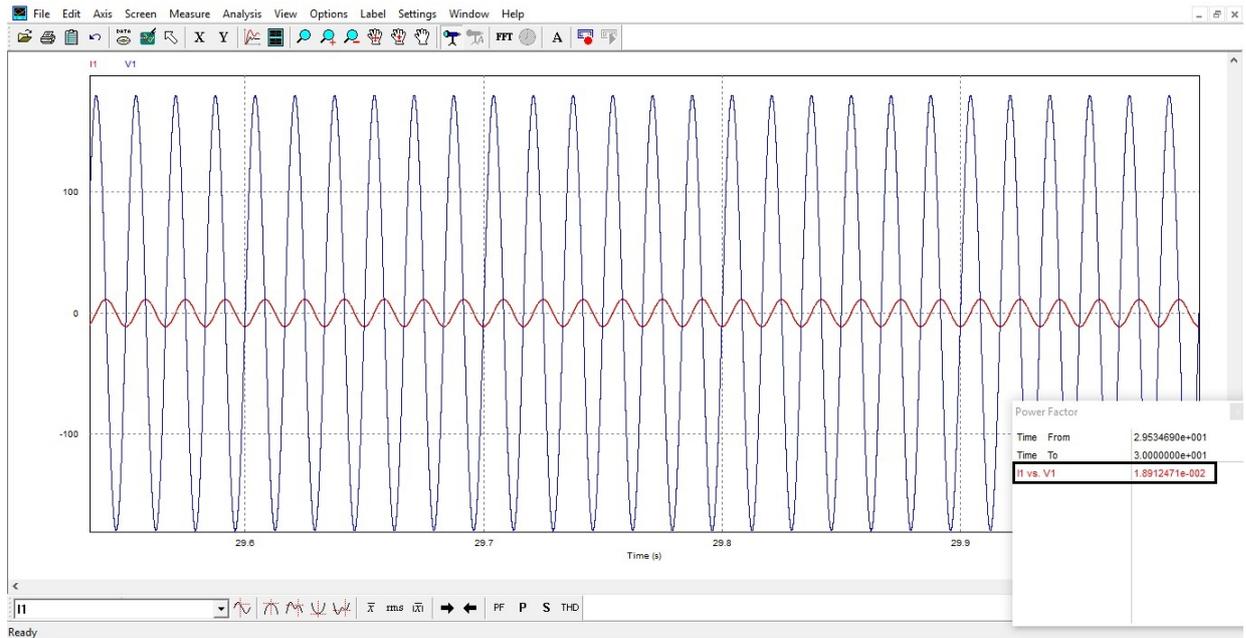


Fonte: Próprio autor

APÊNDICE C EQUILBRADO

C.0.1 Fase 1

Figura 33: Fator de potência fase 1



Fonte: Próprio autor

$$S = V.I \quad (C.1)$$

$$S = 126,9.7,94 \quad (C.2)$$

$$S = 1.007,58Va \quad (C.3)$$

$$P = S.\cos\theta \quad (C.4)$$

$$P = 1.007,58.0,018 \quad (C.5)$$

$$P = 18,13W \quad (C.6)$$

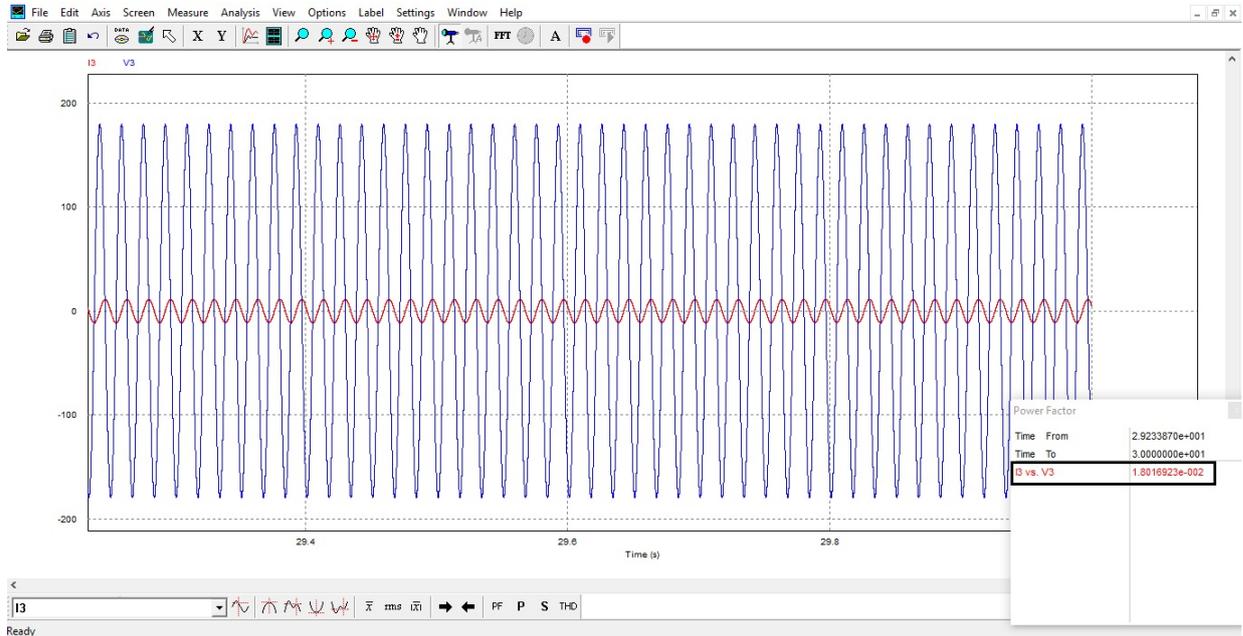
$$Q = S.\sen\theta \quad (C.7)$$

$$Q = 1.007,58.099 \quad (C.8)$$

$$Q = 1.007,41Var \quad (C.9)$$

C.0.2 Fase 2

Figura 34: Fator de potência fase 2



Fonte: Próprio autor

$$S = V.I \tag{C.10}$$

$$S = 126,97,94 \tag{C.11}$$

$$S = 1.007,58Va \tag{C.12}$$

$$P = S.cos\theta \tag{C.13}$$

$$P = 1.007,58.0,018 \tag{C.14}$$

$$P = 18,13W \tag{C.15}$$

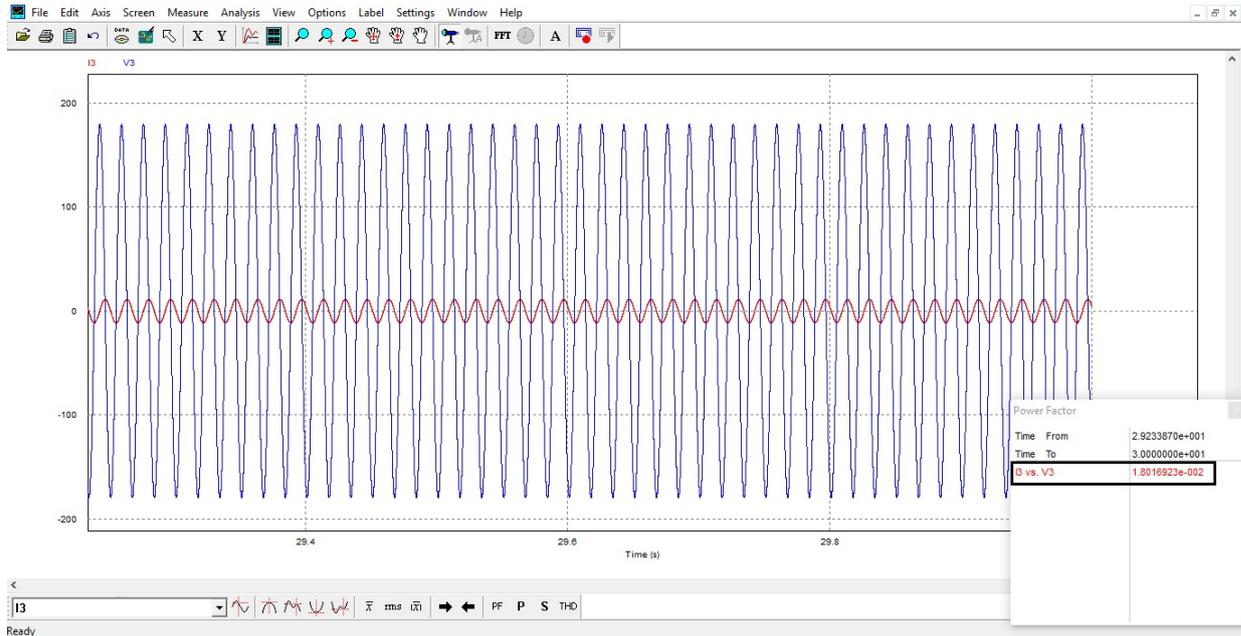
$$Q = S.sen\theta \tag{C.16}$$

$$Q = 1.007,58.099 \tag{C.17}$$

$$Q = 1.007,41Var \tag{C.18}$$

C.0.3 Fase 3

Figura 35: Fator de potência fase 3



Fonte: Próprio autor

$$S = V.I \tag{C.19}$$

$$S = 126,97,94 \tag{C.20}$$

$$S = 1.007,58Va \tag{C.21}$$

$$P = S.\cos\theta \tag{C.22}$$

$$P = 1.007,58.0,018 \tag{C.23}$$

$$P = 18,13W \tag{C.24}$$

$$Q = S.\sen\theta \tag{C.25}$$

$$Q = 1.007,58.099 \tag{C.26}$$

$$Q = 1.007,41Var \tag{C.27}$$

C.0.4 Potências

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 \quad (\text{C.28})$$

$$P_t = 18,13 + 18,13 + 18,13 \quad (\text{C.29})$$

$$P_t = 54,39W \quad (\text{C.30})$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{C.31})$$

$$Q_t = 1.007,41 + 1.007,41 + 1.007,41 \quad (\text{C.32})$$

$$Q_t = 3.022,23Var \quad (\text{C.33})$$

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3 \quad (\text{C.34})$$

$$S_t = 1.007,58 + 1.007,58 + 1.007,58 \quad (\text{C.35})$$

$$S_t = 3.022,74Va \quad (\text{C.36})$$

C.0.5 Fator de Potência

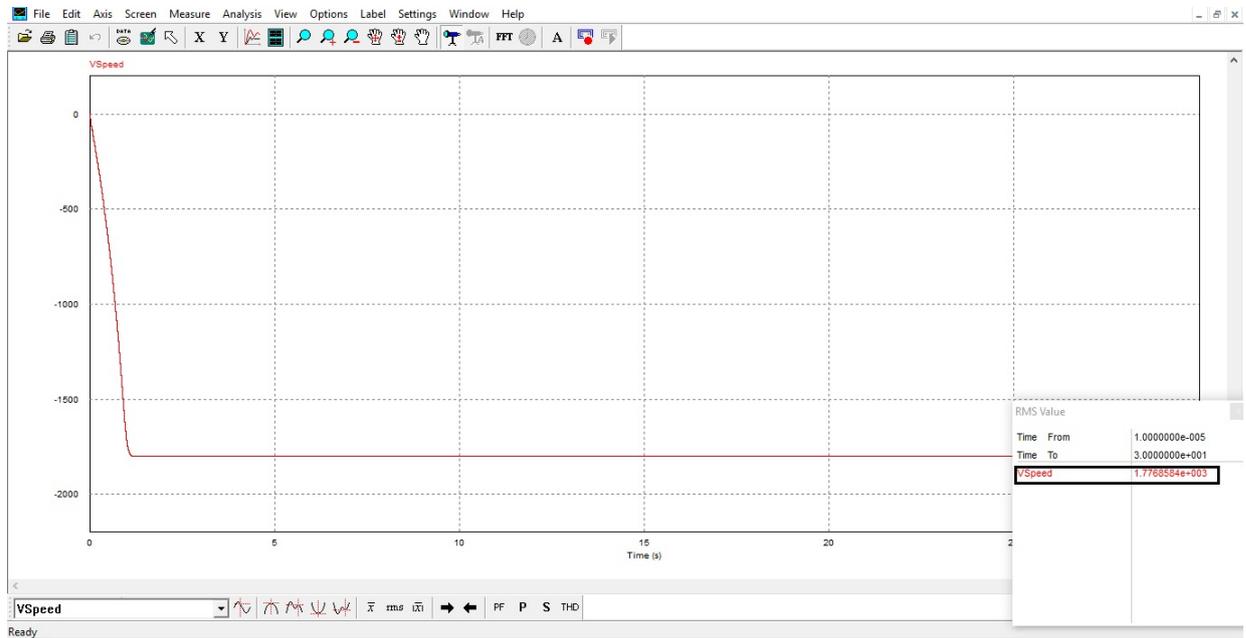
$$Fp = \frac{P}{S} \quad (\text{C.37})$$

$$Fp = \frac{54,39}{3.022,74} \quad (\text{C.38})$$

$$Fp = 0,018 \quad (\text{C.39})$$

C.0.6 RPM

Figura 36: RPM equilibrado

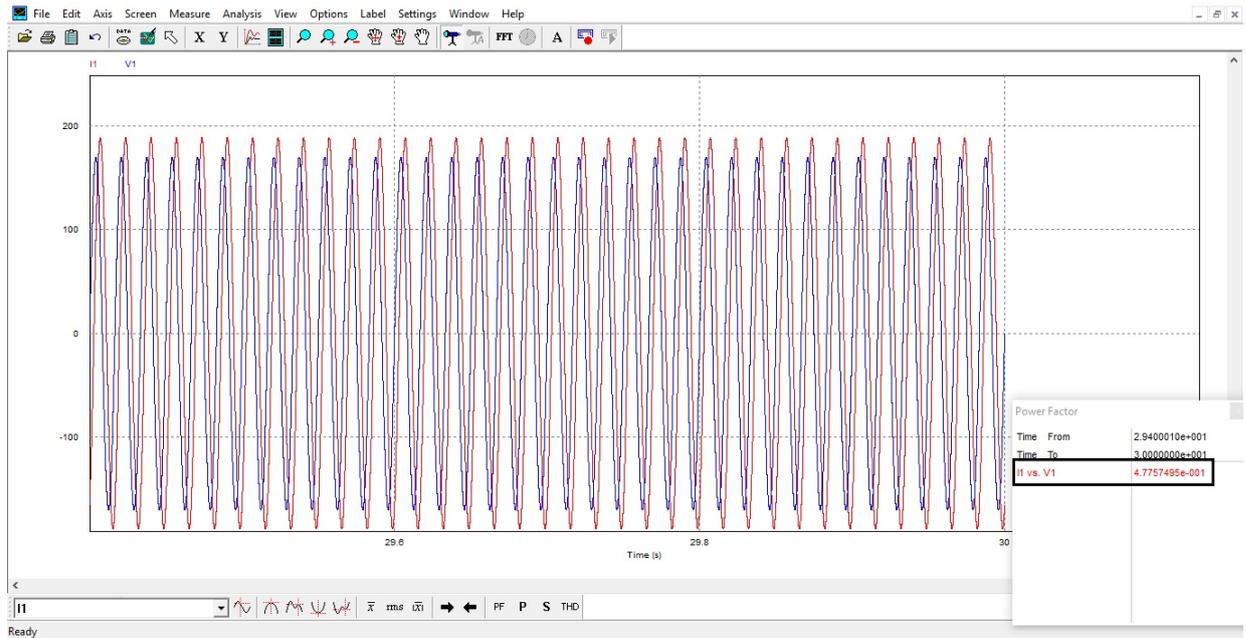


Fonte: Próprio autor

APÊNDICE D FALTA DE FASE

D.0.1 Fase 1

Figura 37: Fator de potência fase 1



Fonte: Próprio autor

$$S = V.I \quad (D.1)$$

$$S = 119,9.133 \quad (D.2)$$

$$S = 15.946,7Va \quad (D.3)$$

$$P = S.\cos\theta \quad (D.4)$$

$$P = 15.946,7.0,47 \quad (D.5)$$

$$P = 7.494,94W \quad (D.6)$$

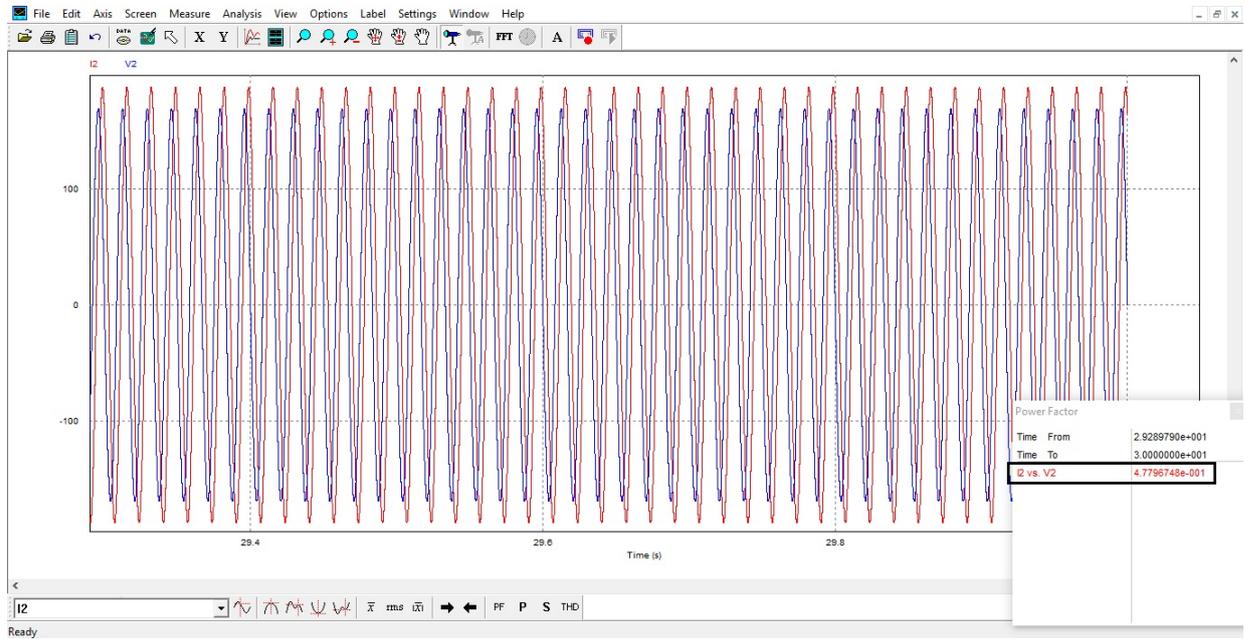
$$Q = S.\sen\theta \quad (D.7)$$

$$Q = 15.946,7.0.88 \quad (D.8)$$

$$Q = 14.075,61Var \quad (D.9)$$

D.0.2 Fase 2

Figura 38: Fator de potência fase 2



Fonte: Próprio autor

$$S = V.I \tag{D.10}$$

$$S = 119,9.133 \tag{D.11}$$

$$S = 15.946,7Va \tag{D.12}$$

$$P = S.\cos\theta \tag{D.13}$$

$$P = 15.946,70,47 \tag{D.14}$$

$$P = 7.494,94W \tag{D.15}$$

$$Q = S.\sen\theta \tag{D.16}$$

$$Q = 15.946,70.88 \tag{D.17}$$

$$Q = 14.075,61Var \tag{D.18}$$

D.0.3 Potências

$$P_t = P_1 + P_2 \quad (\text{D.19})$$

$$P_t = 7.494,94 + 7.494,94 \quad (\text{D.20})$$

$$P_t = 14.989,89W \quad (\text{D.21})$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2 \quad (\text{D.22})$$

$$Q_t = 14.075,61 + 14.075,61 \quad (\text{D.23})$$

$$Q_t = 28.151,23Var \quad (\text{D.24})$$

$$S_t = S_1 + S_2 \quad (\text{D.25})$$

$$S_t = 31.893,4Va \quad (\text{D.26})$$

D.0.4 Fator de potência

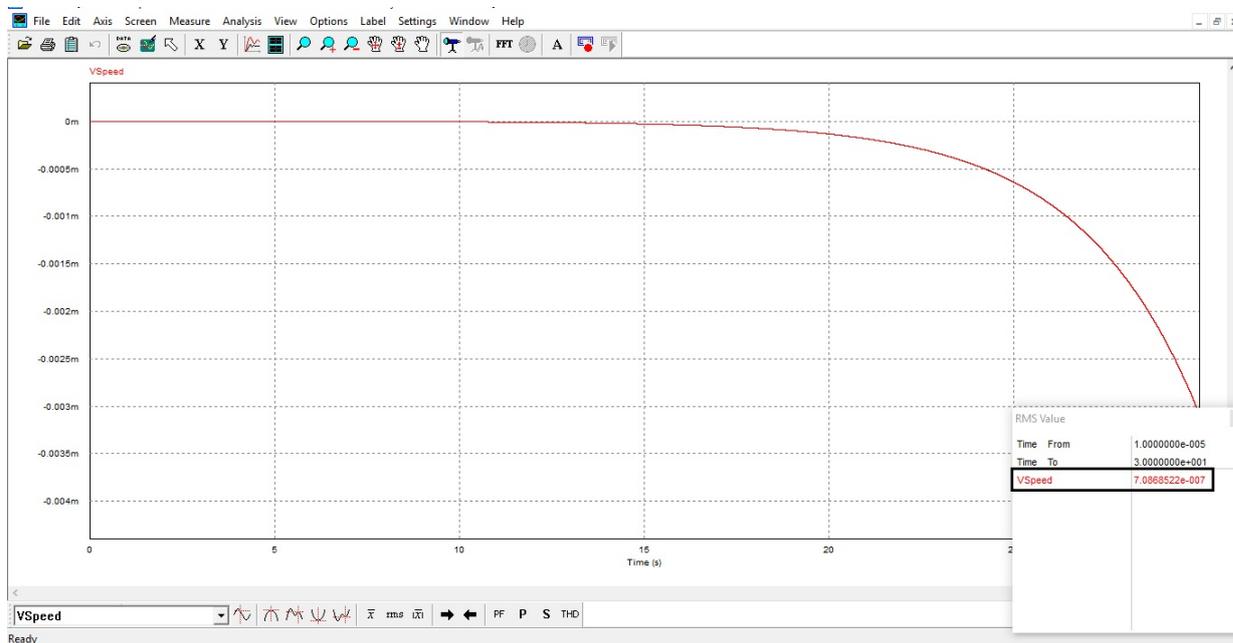
$$Fp = \frac{P}{S} \quad (\text{D.27})$$

$$Fp = \frac{14.989,89}{31.893,4} \quad (\text{D.28})$$

$$Fp = 0,47 \quad (\text{D.29})$$

D.0.5 RPM

Figura 39: RPM falta de fase

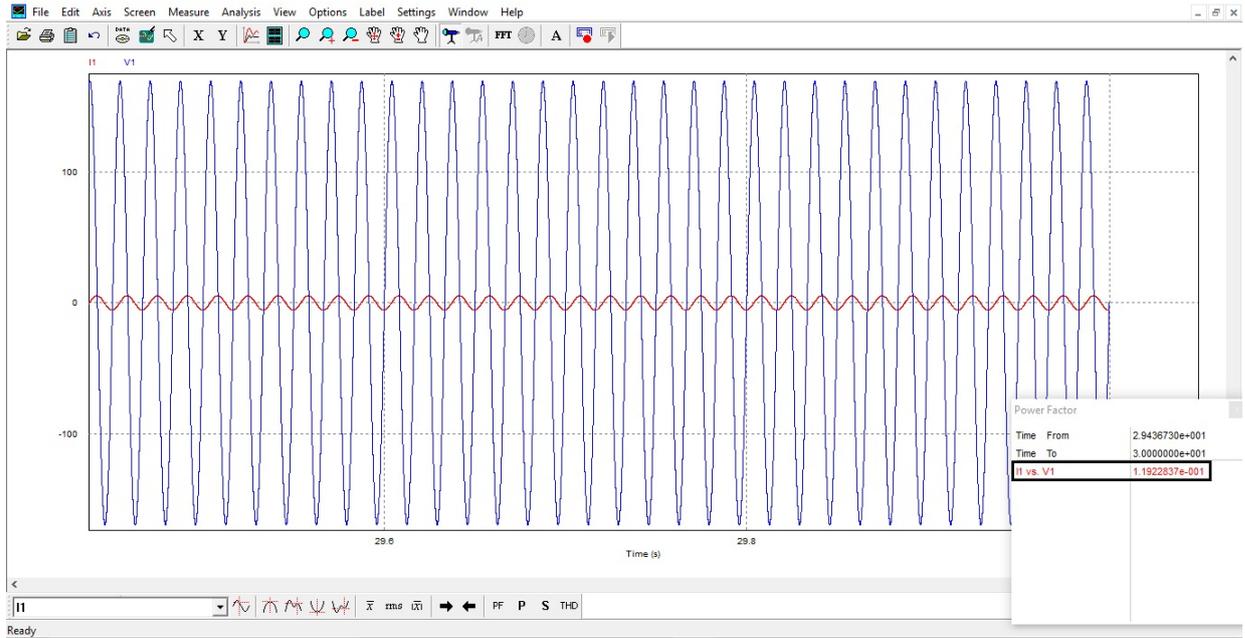


Fonte: Próprio autor

APÊNDICE E CONVERSOR

E.0.1 Fase 1

Figura 40: Fator de potência fase 1



Fonte: Próprio autor

$$S = V.I \quad (\text{E.1})$$

$$S = 119,93,86 \quad (\text{E.2})$$

$$S = 462,81Va \quad (\text{E.3})$$

$$P = S.\cos\theta \quad (\text{E.4})$$

$$P = 462,81.0,11 \quad (\text{E.5})$$

$$P = 50,90W \quad (\text{E.6})$$

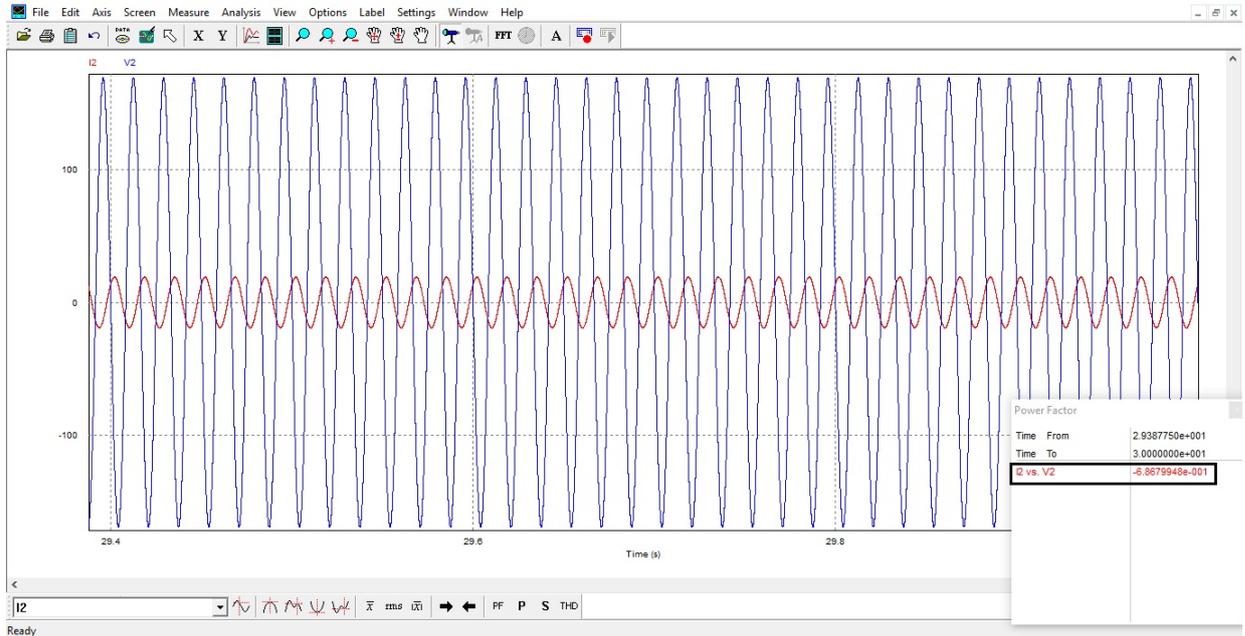
$$Q = S.\sen\theta \quad (\text{E.7})$$

$$Q = 462,81.0,99 \quad (\text{E.8})$$

$$Q = 460Var \quad (\text{E.9})$$

E.0.2 Fase 2

Figura 41: Fator de potência fase 2



Fonte: Próprio autor

$$S = V.I \tag{E.10}$$

$$S = 119,9.13,52 \tag{E.11}$$

$$S = 1.621,04Va \tag{E.12}$$

$$P = S.\cos\theta \tag{E.13}$$

$$P = 1.621,04.(-0,68) \tag{E.14}$$

$$P = -1.102.30W \tag{E.15}$$

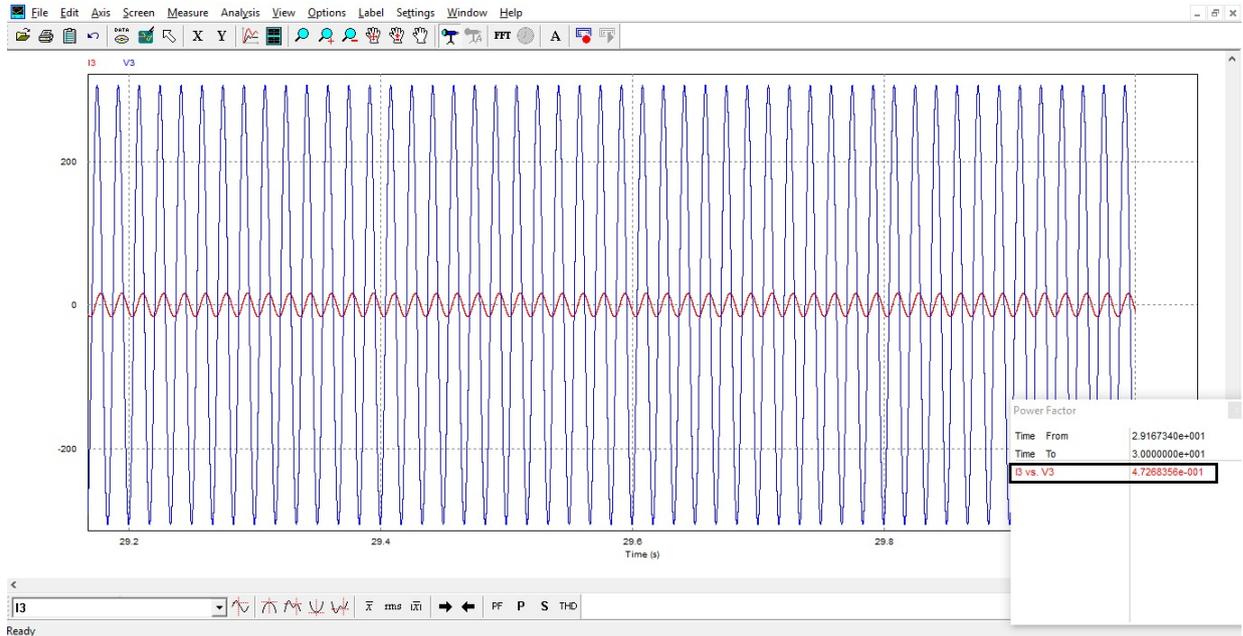
$$Q = S.\sen\theta \tag{E.16}$$

$$Q = 1.621,04.0,73 \tag{E.17}$$

$$Q = 1.188,56Var \tag{E.18}$$

E.0.3 Fase 3

Figura 42: Fator de potência fase 3



Fonte: Próprio autor

$$S = V.I \tag{E.19}$$

$$S = 216,33.11,44 \tag{E.20}$$

$$S = 2.474,81Va \tag{E.21}$$

$$P = S.\cos\theta \tag{E.22}$$

$$P = 2.474,81.0,47 \tag{E.23}$$

$$P = 1.163,16W \tag{E.24}$$

$$Q = S.\sen\theta \tag{E.25}$$

$$Q = 2.474,81.0,88 \tag{E.26}$$

$$Q = 2.184,43Var \tag{E.27}$$

E.0.4 Potências

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 \quad (\text{E.28})$$

$$P_t = 50,90 + 1.102,30 + 1.163,16 \quad (\text{E.29})$$

$$P_t = 2.316,36W \quad (\text{E.30})$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{E.31})$$

$$Q_t = 460 + 1.188,56 + 2.184,43 \quad (\text{E.32})$$

$$Q_t = 3.832,99Var \quad (\text{E.33})$$

$$S_t = |P|^2 + |Q|^2 \quad (\text{E.34})$$

$$S_t = 2.316,36^2 + 3.832,99^2 \quad (\text{E.35})$$

$$S_t = \sqrt{5.365.523,65 + 14.691.812,32} \quad (\text{E.36})$$

$$S_t = 4.478,54Va \quad (\text{E.37})$$

E.0.5 Fator de Potência

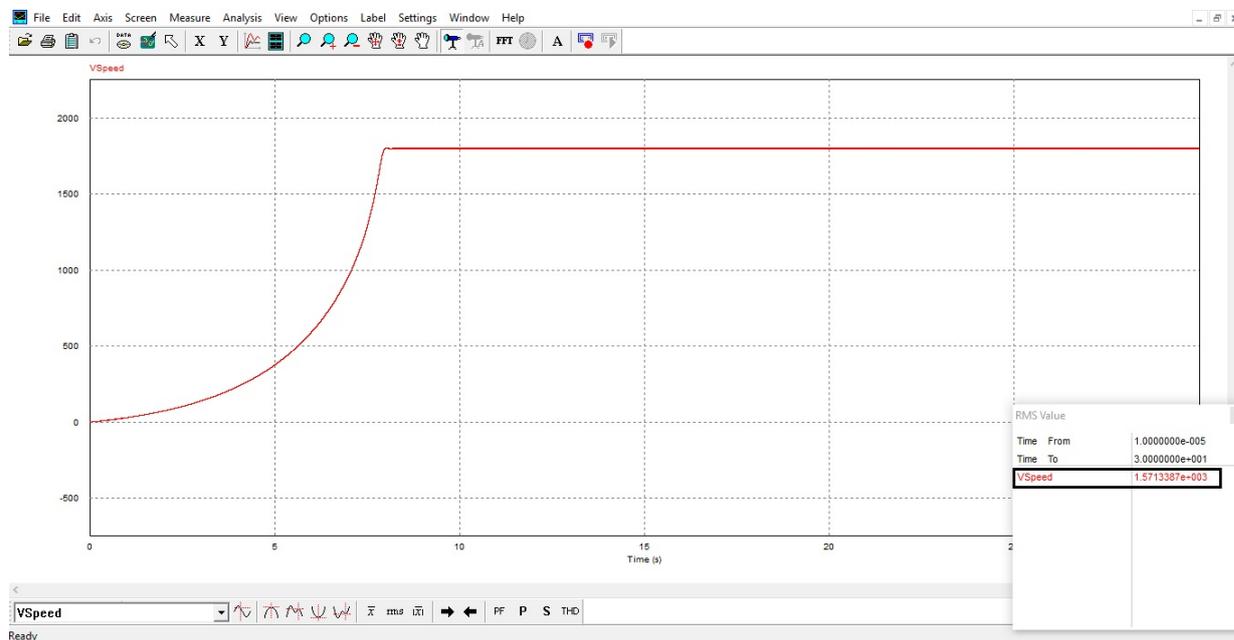
$$Fp = \frac{P}{S} \quad (\text{E.38})$$

$$Fp = \frac{2.316,36}{4.478,54} \quad (\text{E.39})$$

$$Fp = 0,51 \quad (\text{E.40})$$

E.0.6 RPM

Figura 43: RPM Conversor



Fonte: Próprio autor

APÊNDICE F CONVERSOR PRÁTICA

F.0.1 Fase 1

$$F_p = 0,97$$

$$S = V.I \quad (\text{F.1})$$

$$S = 124.5 \quad (\text{F.2})$$

$$S = 620V_a \quad (\text{F.3})$$

$$P = S.\cos\theta \quad (\text{F.4})$$

$$P = 620.0,97 \quad (\text{F.5})$$

$$P = 601,4W \quad (\text{F.6})$$

$$Q = S.\sen\theta \quad (\text{F.7})$$

$$Q = 620.0,24 \quad (\text{F.8})$$

$$Q = 150,72Var \quad (\text{F.9})$$

F.0.2 Fase 2

$$F_p = -0,43$$

$$S = V.I \quad (\text{F.10})$$

$$S = 129.12 \quad (\text{F.11})$$

$$S = 1.548V_a \quad (\text{F.12})$$

$$P = S.\cos\theta \quad (\text{F.13})$$

$$P = 1.548.(-0,43) \quad (\text{F.14})$$

$$P = -665,64W \quad (\text{F.15})$$

$$Q = S.\sen\theta \quad (\text{F.16})$$

$$Q = 1.548.0,90 \quad (\text{F.17})$$

$$Q = 1.397,57Var \quad (\text{F.18})$$

F.0.3 Fase 3

$$F_p = 0,42$$

$$S = V.I \quad (\text{F.19})$$

$$S = 105, 1.10, 5 \quad (\text{F.20})$$

$$S = 1.103, 55Va \quad (\text{F.21})$$

$$P = S.\cos\theta \quad (\text{F.22})$$

$$P = 1.103, 55.0, 42 \quad (\text{F.23})$$

$$P = 463, 49W \quad (\text{F.24})$$

$$Q = S.\sen\theta \quad (\text{F.25})$$

$$Q = 1.103, 55.0, 90 \quad (\text{F.26})$$

$$Q = 1.001, 49Var \quad (\text{F.27})$$

F.0.4 Potências

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 \quad (\text{F.28})$$

$$P_t = 601, 4 + 665, 64 + 463, 49 \quad (\text{F.29})$$

$$P_t = 1.730, 53W \quad (\text{F.30})$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{F.31})$$

$$Q_t = 150, 72 + 1.397, 57 + 1.001, 49 \quad (\text{F.32})$$

$$Q_t = 2.549, 76Var \quad (\text{F.33})$$

$$S_t = |P|^2 + |Q|^2 \quad (\text{F.34})$$

$$S_t = 1.730, 53^2 + 2.549, 78^2 \quad (\text{F.35})$$

$$S_t = \sqrt{2.994.734, 08 + 6.501.378, 04} \quad (\text{F.36})$$

$$S_t = 3.081, 57Va \quad (\text{F.37})$$

F.0.5 Fator de Potência

$$Fp = \frac{P}{S} \quad (\text{F.38})$$

$$Fp = \frac{1.730,53}{3.081,57} \quad (\text{F.39})$$

$$Fp = 0,56 \quad (\text{F.40})$$

APÊNDICE G CONVERSOR COM CARGA

G.0.1 Fase 1

$$F_p = 0,99$$

$$S = V.I \quad (G.1)$$

$$S = 127,7,5 \quad (G.2)$$

$$S = 952,5Va \quad (G.3)$$

$$P = S.\cos\theta \quad (G.4)$$

$$P = 952,5.0,99 \quad (G.5)$$

$$P = 942,97W \quad (G.6)$$

$$Q = S.\sen\theta \quad (G.7)$$

$$Q = 952,5.0,14 \quad (G.8)$$

$$Q = 134,36Var \quad (G.9)$$

G.0.2 Fase 2

$$F_p = 0,93$$

$$S = V.I \quad (G.10)$$

$$S = 136,15,8 \quad (G.11)$$

$$S = 2.148,8Va \quad (G.12)$$

$$P = S.\cos\theta \quad (G.13)$$

$$P = 2.148,8.0,93 \quad (G.14)$$

$$P = 1.998,38W \quad (G.15)$$

$$Q = S.\sen\theta \quad (G.16)$$

$$Q = 2.148,8.0,36 \quad (G.17)$$

$$Q = 789,81Var \quad (G.18)$$

G.0.3 Fase 3

$$F_p = 0,47$$

$$S = V.I \quad (\text{G.19})$$

$$S = 145.11,8 \quad (\text{G.20})$$

$$S = 1.711Va \quad (\text{G.21})$$

$$P = S.\cos\theta \quad (\text{G.22})$$

$$P = 1.711.0,47 \quad (\text{G.23})$$

$$P = 804,17W \quad (\text{G.24})$$

$$Q = S.\sen\theta \quad (\text{G.25})$$

$$Q = 1.711.0,88 \quad (\text{G.26})$$

$$Q = 1.510,24Var \quad (\text{G.27})$$

G.0.4 Potências

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 \quad (\text{G.28})$$

$$P_t = 942,97 + 1.998,38 + 804,17 \quad (\text{G.29})$$

$$P_t = 3.745,52W \quad (\text{G.30})$$

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{G.31})$$

$$Q_t = 134,36 + 789,81 + 1.510,24 \quad (\text{G.32})$$

$$Q_t = 2.434,41Var \quad (\text{G.33})$$

$$S_t = |P|^2 + |Q|^2 \quad (\text{G.34})$$

$$S_t = 3.745,52^2 + 2.437,41^2 \quad (\text{G.35})$$

$$S_t = \sqrt{14.028.920,07 + 5.940.967,50} \quad (\text{G.36})$$

$$S_t = 4.468,76Va \quad (\text{G.37})$$

G.0.5 Fator de Potência

$$Fp = \frac{P}{S} \quad (\text{G.38})$$

$$Fp = \frac{3.745,52}{4.468,76} \quad (\text{G.39})$$

$$Fp = 0,83 \quad (\text{G.40})$$