

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL SIMÕES DOS SANTOS

**DISTÚRBIOS NAS PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

VIÇOSA
2011

RAFAEL SIMÕES DOS SANTOS

**DISTÚRBIOS NAS PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos.

VIÇOSA
2011

RAFAEL SIMÕES DOS SANTOS

**DISTÚRBIOS NAS PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO
TRIFÁSICOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em DD de MMMM de 20YY.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Tarcísio Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Ms. Mauro Prates - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Para se ter sucesso, é necessário amar de verdade o que se faz. Caso contrário, levando em conta apenas o lado racional, você simplesmente desiste. É o que acontece com a maioria das pessoas.”

(Steve Jobs)

Agradecimentos

A Deus, por me ouvir, iluminar meus pensamentos e guiar meus passos.

Aos meus pais, Nilson e Teresinha, minha irmã, Lilian, meu irmão, Marcelo, minha namorada, Mariana, minha prima, Beatriz e a todos os meus familiares e parentes pelo apoio, torcida, carinho e paciência em todos os momentos desta caminhada.

À Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica – (DEL) UFV, pela oportunidade e pela estrutura oferecida para a realização deste trabalho.

À Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos, pela orientação, paciência e oportunidade de aprendizado.

A todos os membros da banca examinadora, pelas valiosas sugestões e correções, que muito contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Professor José Tarcísio de Rezende por ter me concedido livros e materiais para realizar este trabalho.

Ao estudante Felipe e ao José de Oliveira Marques Neto do laboratório, pela ajuda todas as vezes que precisei, na utilização de equipamentos.

Aos amigos e companheiros de Viçosa, Rodrigo, Klaus, Mariana, Advânio, Cleber, Mateus, Tico, Rafael, Paulista, Max, Lívia Conceição e República Fecha Bar por toda amizade, conselhos, ajuda, correções, paciência e compreensão nas muitas horas de desespero.

Aos amigos de Volta Redonda (Guillermo, Padinha, Marco Antônio, Agessandro e Clério) por, apesar da distância, estarem sempre presentes de alguma forma, e mostrar que amizade verdadeira existe.

Resumo

Os motores elétricos, durante a partida, solicitam da rede de alimentação uma corrente de valor elevado, de ordem de 6 a 10 vezes a sua corrente nominal. Nessas condições, o circuito, que inicialmente fora projetado para transportar a potência requerida pelo motor, é solicitado agora pela corrente de acionamento, que em média o tempo de partida de um motor varia entre 0,5 a 10 segundos. Consequentemente, o sistema fica submetido a uma queda de tensão normalmente superior aos limites estabelecidos para o funcionamento em regime, podendo provocar distúrbios operacionais nos equipamentos de comando e proteção, além de afetar o desempenho de outros equipamentos. A adoção de um sistema de partida eficiente pode ser considerada uma das regras básicas para se obter do motor uma vida útil prolongada e custos operacionais reduzidos, além de dar à equipe de manutenção tranquilidade no desempenho das tarefas. Os critérios para seleção do método de partida adequado envolvem considerações quanto à capacidade da instalação, requisitos da carga a ser considerada, além da capacidade do sistema gerador. Os principais tipos de partida são: direta; através da chave estrela-triângulo; através de chave compensadora e através de chaves estáticas que são o caso de softstarter e/ou inversores de frequência. Este trabalho propõe verificar os distúrbios gerados na rede elétrica pelos diferentes métodos de partida e comparar esses distúrbios gerados com o motor partindo em vazio e com carga. Esses fenômenos ocorrem em uma curta duração de tempo, porém são de grande relevância para este trabalho, uma vez que compromete a qualidade de energia e pode ocasionar prejuízos aos clientes, até mesmo interrompendo processos nas fábricas. As medições das grandezas elétricas para o estudo da qualidade da energia foram feitas em ensaios realizados em laboratório. A coleta dos dados foi feita através do analisador de qualidade de energia Fluke 435. Os métodos de partida, direta, chave compensadora e estrela-triângulo apresentaram índices de THD abaixo do permitido na norma IEEE 1531-2003, não havendo necessidade de métodos de mitigação. Já o inversor de frequência apresentou índices acima do permitido, chegando a 120% de THD em uma das fases, necessitando assim de métodos de mitigação, como filtros.

Sumário

1	Motores de Indução Trifásicos.....	12
1.1	Introdução	12
1.1.1	O Motor de Indução Trifásico	12
1.1.2	Potência Nominal	15
1.1.3	Frequência	17
1.1.4	Tensão Nominal.....	17
1.1.5	Corrente Nominal	19
1.1.6	Métodos de Partida	19
2	Qualidade de Energia	23
2.1	Introdução	23
2.2	Afundamento de tensão	24
2.3	Harmônicos e Interharmônicos.....	25
2.4	Distorção Harmônica Total	27
2.5	Ruído ou Noise:	28
2.6	Variações de Curta-Duração.....	29
2.7	Resumo dos principais tipos de distúrbios	29
3	Ensaio no Laboratório.....	32
3.1	Introdução	32
3.2	Descrição dos materiais utilizados	33
3.2.1	Motor de Indução Trifásico	33
3.2.2	Gerador Síncrono.....	33
3.2.3	Auto-transformador	33
3.2.4	Analisador de Qualidade de energia Fluke 435.....	33
3.2.5	Painel para partida estrela-triângulo	33
3.3	Resultados Experimentais.....	34
3.3.1	Partida Direta	34
3.3.2	Partida Chave Estrela-Triângulo	40
3.3.3	Partida Chave Compensadora.....	44
3.3.4	Partida com Inversor de Frequência	46
4	Conclusões.....	52
	Referências Bibliográficas	54

Lista de Figuras

Figura 1: Utilização da energia elétrica no Brasil, no setor industrial [01].....	12
Figura 2: Construção do Motor de Indução Trifásico [02].....	13
Figura 3: Estator de uma máquina de indução trifásica.....	14
Figura 4: Rotor Gaiola de Esquilo [4].	15
Figura 5: Triângulo das Potências [03].....	16
Figura 6: (a) Bobinas do motor com 6 terminais. (b) Ligação Estrela (Y). (c) Ligação Triângulo (Δ) [02]	18
Figura 7: (a) Série Estrela. (b) Paralelo Estrela. (c) Série Triângulo. (d) Paralelo Triângulo. [02].....	18
Figura 8: (a) Ligação triangulo paralelo, (b) ligação estrela paralela e (c) ligação estrela série [02].....	19
Figura 9: Caracterização de um afundamento de tensão.	25
Figura 10: Forma de onda senoidal, distorcida com harmônicas de 3a., 5a, e 7a ordem e total [12].....	26
Figura 11: Estrutura dos ensaios realizados nos laboratórios.....	32
Figura 12: Painel Estrela-Triângulo.	34
Figura 13: Espectro Harmônico de Tensão Fase B situação de partida direta a vazio.....	35
Figura 14: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação de partida direta a vazio.	35
Figura 15: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação de partida direta a vazio.	36
Figura 16: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação de partida direta a vazio.	36
Figura 17: Espectro Harmônico de Tensão Fase C situação partida direta com carga.	37
Figura 18: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida direta com carga.....	38
Figura 19: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação partida direta com carga.....	38
Figura 20: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida direta com carga.....	38
Figura 21: Afundamento na tensão, partida direta com carga.	39
Figura 22: Espectro Harmônico de Tensão Fase B, partida Estrela-Triângulo sem carga.....	40
Figura 23: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida estrela-triângulo sem carga.	41
Figura 24: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação partida estrela-triângulo sem carga.	41
Figura 25: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida estrela-triângulo sem carga.	41
Figura 26: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida estrela-triângulo com carga.	42

Figura 27: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida estrela-triângulo com carga.....	43
Figura 28: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida chave compensadora com carga.....	44
Figura 29: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação partida chave compensadora com carga.....	45
Figura 30: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida chave compensadora com carga.....	45
Figura 31: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação a vazio 1690rpm [17].....	46
Figura 32: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação a vazio 1690rpm [17].....	46
Figura 33: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação a vazio 1690rpm [17].....	47
Figura 34: Forma de onda de tensão e corrente situação a vazio 1690rpm [17].....	48
Figura 35: Espectro Harmônico de Tensão Fase A situação com carga 1690rpm [17].	49
Figura 36: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação com carga 1690rpm [17].....	50
Figura 37: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação com carga 1690rpm [17].	50
Figura 38: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação com carga 1690rpm [17].	50
Figura 39: Forma de onda de tensão e corrente situação com carga 1690RPM [17].....	51

Lista de Tabelas

Tabela 1: Limites da tensão percentual e seus efeitos no sistema.[07]	20
Tabela 2: Limites de distorção harmônica da tensão em % da componente da tensão	27
Tabela 3: Limites de distorção harmônica da corrente em %, para consumidores.	28
Tabela 4: Itens de Qualidade de Energia [16]	30
Tabela 5: Distorções Harmônicas de corrente na partida direta a vazio.	36
Tabela 6: Distorções Harmônicas de corrente na partida direta com carga.	39
Tabela 7: Coparação do método de partida direta, com e sem carga.	39
Tabela 8: Distorções Harmônicas de corrente na partida chave estrela-triângulo sem carga. .	42
Tabela 9: Distorções Harmônicas de corrente na partida chave estrela-triângulo com carga..	43
Tabela 10: Comparação entre Distorções Harmônicas de corrente na partida chave estrela- triângulo com e sem carga	43
Tabela 11: Distorções Harmônicas de corrente na partida chave compensadora com carga...	45
Tabela 12: Distorções Harmônicas de corrente na partida com inversor de frequência sem carga.....	48
Tabela 13: Distorções Harmônicas de corrente na partida com inversor de frequência com carga.....	51
Tabela 14: Coparação do método de partida direta, com e sem carga.	51

1 Motores de Indução Trifásicos

1.1 Introdução

Um motor elétrico é um conversor eletromecânico, baseado em princípios eletromagnéticos, que converte energia elétrica em energia mecânica. Os motores, independente do tipo, são os equipamentos que mais consomem energia dentro do setor industrial, como pode ser observado na Figura 1 que apresenta o resultado de uma pesquisa realizada no Brasil da distribuição do consumo de energia dentro deste setor [01]. O motor de indução trifásico (MIT) é, hoje, o mais utilizado na indústria entre todos os tipos de motores existentes, devido a diversas vantagens, tais como baixo custo, construção simples, grande versatilidade, alto rendimento, simplicidade de comando entre outras.

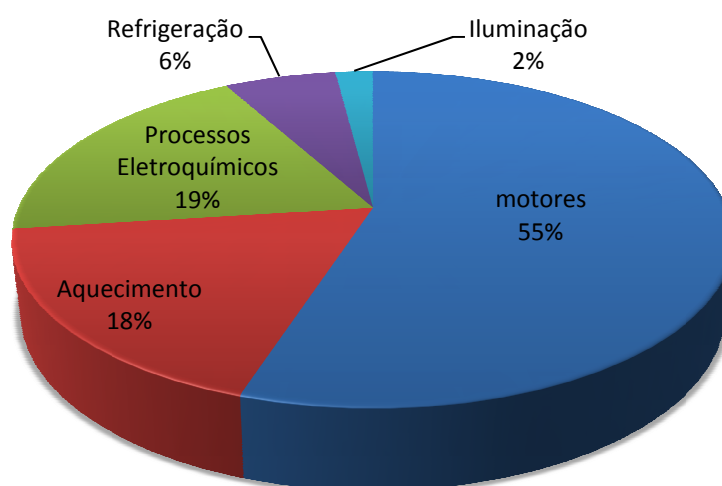


Figura 1: Utilização da energia elétrica no Brasil, no setor industrial [01].

1.1.1 O Motor de Indução Trifásico

A máquina de indução trifásica funciona pelo princípio da indução eletromagnética, baseado no campo magnético girante, produzido por três bobinas defasadas geometricamente de 120° , alimentadas por tensões trifásicas balanceadas de frequência F , defasadas no tempo de 120° elétricos. A máquina de indução tem dois circuitos elétricos independentes, estator e rotor, e um circuito magnético, podendo ser dividida em algumas partes, de acordo com a Figura 2. O estator e o rotor possuem grande importância, pois o estator, parte fixa, recebe a

alimentação da rede elétrica alternada trifásica, enquanto o rotor, a parte móvel, pode ser de dois tipos: bobinado ou gaiola de esquilo. Uma grande vantagem do MIT tipo gaiola de esquilo é a sua capacidade de operar sem necessidade de contato com os enrolamentos do rotor. Isso reduz significativamente os custos e a manutenção [02].

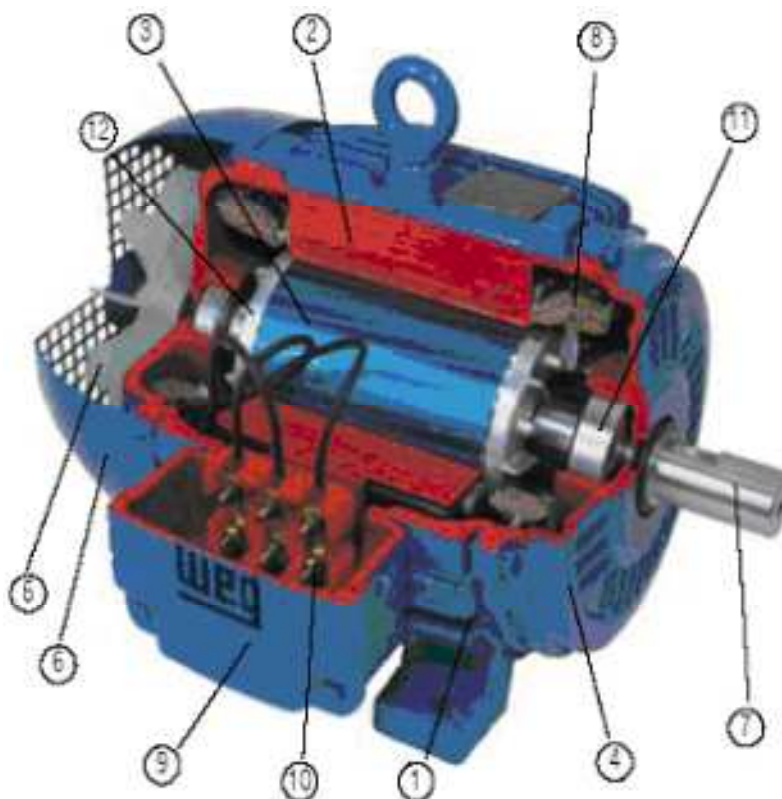


Figura 2: Construção do Motor de Indução Trifásico [02].

Estator

O estator é feito de material ferromagnético laminado (geralmente aço silício). Nas ranhuras do estator (furos ou canais na parte da superfície interna) são alojadas as bobinas dos enrolamentos, de acordo com a Figura 3. A laminação ajuda a aumentar a isolamento, evitar as correntes de fuga e parasitas, aumentando o rendimento da máquina.

De acordo com a Figura 2, as partes constituintes do estator são:

- (1) Carcaça - é a estrutura suporte do conjunto, de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas.
- (2) Núcleo de chapas - as chapas são de aço magnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas no ferro;

(8) Enrolamento trifásico - três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação.



Figura 3: Estator de uma máquina de indução trifásica.

Rotor

Como já citado, o rotor pode ser construído de duas formas, rotor bobinado e rotor em gaiola de esquilo.

De acordo com a Figura 2, as partes constituintes do rotor são:

- (7) Eixo - transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor. É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga;
- (3) Núcleo de chapas - as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator;
- (12) Barras e anéis de curto-circuito - são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

O rotor em gaiola de esquilo é constituído de barras de cobre ou alumínio, encaixadas nas diversas ranhuras existentes no circuito magnético do rotor ao longo do comprimento do eixo e curto-circuitadas nas extremidades por anéis terminais. As barras de cobre são para potências maiores e as de alumínio para motores de pequenas potências. Na Figura 4, tem-se um exemplo do rotor gaiola de esquilo [03].

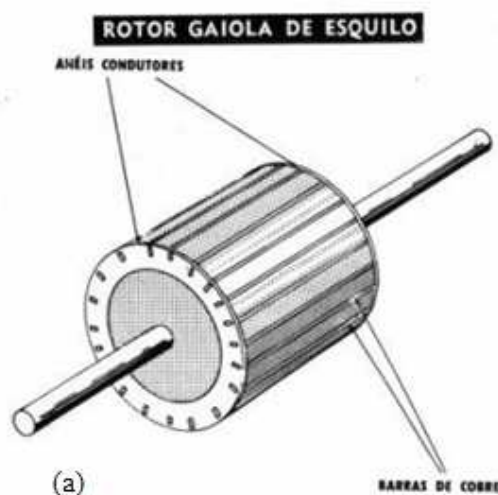


Figura 4: Rotor Gaiola de Esquilo [4].

Outras Partes do Motor de Indução Trifásico

De acordo com a Figura 2 outras partes constituintes do motor:

- (4) Tampa;
- (5) Ventilador;
- (6) Tampa defletora;
- (8) Caixa de ligação;
- (9) Terminais;
- (11) Rolamentos.

1.1.2 Potência Nominal

O motor elétrico é um conversor eletromecânico, que converte a potência elétrica de entrada P_{EL} , dada em Watts (W), em potência mecânica de saída P_M , dada em cavalo-vapor (cv) ou (hp). Como não é um sistema ideal, há perdas de potência por diversos efeitos P_d . A Equação 1 mostra a relação entre as potências. A potência nominal do motor é a máxima potência útil na saída do seu eixo, quando está sendo alimentado com tensão e frequência nominal. Para efetuar a conversão de unidades, 1 cv equivalem a 736 W [03]. Existem motores das mais variadas potências, de 0,16 a 500 cv, e dos mais diversos tipos de carcaça, para adequar aos diferentes tipos de utilização [03]. O rendimento η do motor é dado pela relação entre a potência de saída no eixo e a potência de entrada, de acordo com a Equação 2.

Como um motor nem sempre opera em plena carga, foi criado o percentual de plena carga (k) para expressar o quanto dessa está sendo utilizada, de acordo com a Equação 3 [06].

$$P_{EL} = P_M + P_d \quad (1)$$

$$\eta = P_M / P_{EL} \quad (2)$$

$$k = P_u / P_n \quad (3)$$

Onde:

P_u = potência que está sendo usada (CV, HP ou W)

P_n = potência nominal do motor (CV, HP ou W).

A máquina precisa da potência ativa (P) para transformar em trabalho e de potência reativa (Q) para excitar o campo magnético, a soma vetorial dessas é chamada de potência aparente, denominada por (S). A equação 4 demonstra a soma das potências, também mostrada pela Figura 5. O ângulo formado entre a potência ativa e aparente é dado por (Θ), que relaciona a diferença de fase entre tensão e corrente. O fator de potência (FP) relaciona a potência ativa e a aparente, conforme é observado na Equação 5.

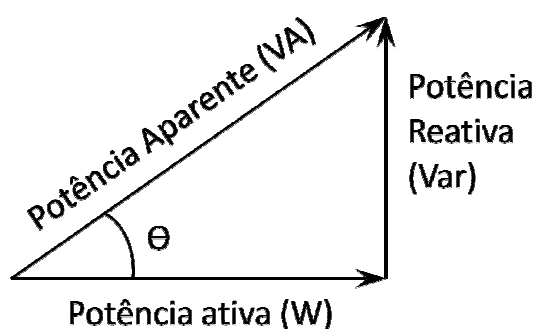


Figura 5: Triângulo das Potências [03]

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q} \text{ ou } S = P * \cos \Theta = Q * \sin \Theta \quad (4)$$

$$FP = \cos \Theta = P/S \quad (5)$$

É interessante conhecer o percentual a plena carga, porque tanto o rendimento (η) como o fator de potência ($\cos \Theta$) variam com esta grandeza. Quando a máquina está operando a plena carga ocorrem os maiores valores de η e de $\cos \Theta$. Os fabricantes de motores costumam fornecer estes valores para alguns percentuais de plena carga (50%, 75% e 100%). O fator de serviço (FS) é a capacidade de sobrecarga que pode ser aplicada ao motor, ou seja, carga aplicada além da potência nominal, que indica carga permissível, podendo ser

submetida continuamente ao motor, sob condições especificadas. Este valor está na faixa de 1,0 a 1,35 e, de maneira geral, pode-se dizer que motores menores têm maior FS [06].

1.1.3 Frequência

A frequência é o número de vezes por segundo que a tensão muda de sentido e volta à condição inicial. É expressa em “ciclos por segundo” ou “hertz”, simbolizada por Hz. As bobinas dos motores são projetadas para trabalhar com uma determinada frequência, referente à rede de alimentação assim essa é chamada de frequência nominal. No Brasil, a frequência padronizada é 60 Hz, mas em outros países há padrões diferentes, tais como de 50 Hz. Os motores trifásicos bobinados para 50 Hz podem ser ligados também em rede de 60 Hz. Desta forma, haverá um aumento na velocidade nominal em 20% e diminuição da corrente de partida em 17%. Adiante será abordado o inversor de frequência, com ele é possível efetuar o controle de velocidade, corrente de partida e torque a partir da variação da frequência de operação [05].

1.1.4 Tensão Nominal

Tensão nominal é a tensão a qual as bobinas do estator foram projetadas para que o motor opere em plena carga. Dependendo da quantidade de grupos de enrolamentos do motor, esse poderá ser alimentado por mais de uma tensão, porém, caso tenha apenas três terminais constituído por um grupo de enrolamentos, poderá ser ligado apenas em uma tensão. As tensões, que os motores geralmente são alimentados, são as tensões padronizadas da rede, que podem ser de 220 V, 380 V, 440 V, 760 V [03]. Um motor de indução trifásico trabalhará em qualquer sentido, dependendo da conexão com a fonte elétrica. Para inverter o sentido de rotação, inverte-se qualquer par de conexões entre motor e fonte elétrica. Os motores podem ser construídos com 3, 6, 9 ou 12 terminais de acordo com a necessidade de versatilidade na tensão nominal, dependendo apenas do tipo de ligação que é feita. Em seguida, são apresentados os principais tipos de ligações.

Ligação Triângulo

Em um motor com seis terminais e 3 grupos de enrolamentos, podem-se efetuar dois tipos de ligações, com duas tensões diferentes. Caso o motor seja ligado em triângulo, cada fase receberá a tensão de linha, se as bobinas forem para tensão de 220 V, a tensão de linha também terá que ser de 220 V. Poder-se-á juntar os terminais 1 e 6, 2 e 4, 3 e 5 e ligar as fases R, S e T. Visualiza-se essa ligação na Figura 8 (c) [02].

Ligação Estrela

Caso o motor seja ligado em estrela, as bobinas que suportam 220 V poderão ser ligadas a uma linha com tensão de 380 V. Para realizar essa ligação basta juntar os terminais 4, 5 e 6 e ligar as fases R, S e T em 1, 2 e 3 respectivamente, verificada na Figura 6 (b).

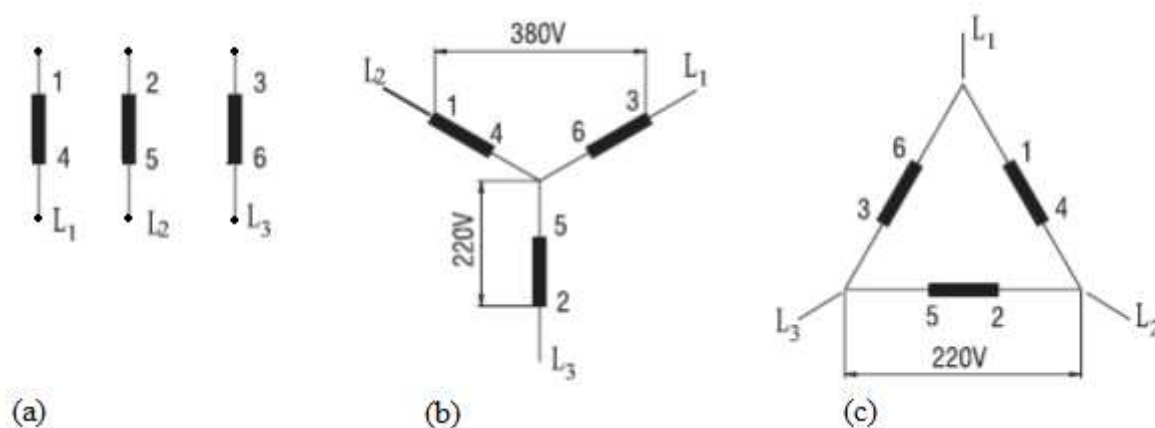


Figura 6: (a) Bobinas do motor com 6 terminais. (b) Ligação Estrela (Y). (c) Ligação Triângulo (Δ) [02]

Ligação Série-Paralela

O tipo de ligação série-paralelo pode efetuar tanto ligação em triângulo quanto em estrela. Para ser realizado precisa de um motor com pelo menos 9 terminais, podendo ser ligado cada enrolamento em série, para aumentar a tensão nos terminais ficando cada bobina com metade da tensão de fase nominal. Quando ligadas em paralelo, o motor poderá ser ligado com metade da tensão anterior, mantendo, assim, a tensão em cada bobina sempre igual. A Figura 7 demonstra os tipos de ligações [03].

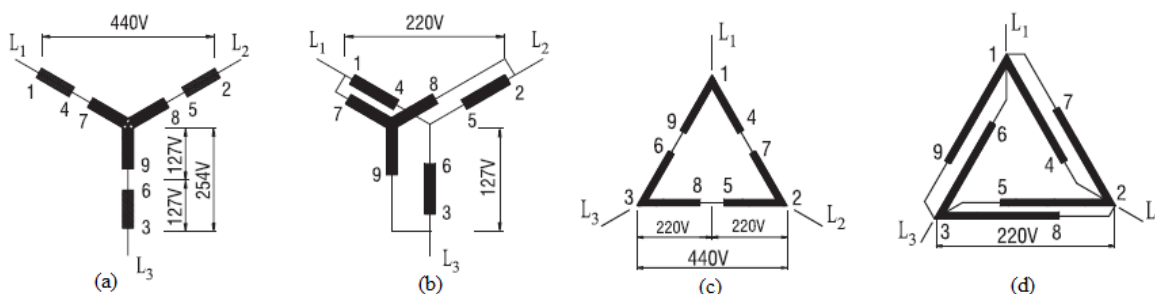


Figura 7: (a) Série Estrela. (b) Paralelo Estrela. (c) Série Triângulo. (d) Paralelo Triângulo. [02]

Ligação tripla tensão nominal

A ligação tripla tensão nominal, só é possível em motores com 12 terminais, podendo combinar os casos anteriores e proporcionando quatro combinações de tensão nominal. O motor suportaria as tensões de 220/380/440/760 V, sendo que 760 V é apenas para partida. A

Figura 8 mostra os três tipos de ligações feitas nesse motor, ligação triângulo paralelo, estrela paralela e estrela série [02].

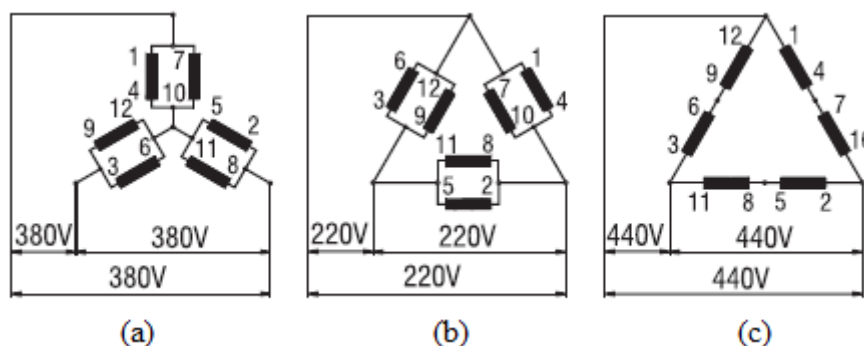


Figura 8: (a) Ligação triângulo paralelo, (b) ligação estrela paralela e (c) ligação estrela série [02].

1.1.5 Corrente Nominal

Corrente nominal é a corrente de entrada no motor quando este está operando em plena carga, sendo alimentado com tensão e frequência nominais. Fazendo $P_s = P_n$, a corrente nominal de motores trifásicos é dada por [05]:

$$I_n = (P_n \times 736) / (\sqrt{3} \times \eta \times U_n \times \cos \Theta) \quad (6)$$

Onde:

P_n = potência nominal (CV);

η = rendimento do motor a plena carga ($\kappa = 100\%$)

U_n = tensão nominal (V)

$\cos \Theta$ = fator de potência do motor a plena carga ($\kappa = 100\%$).

1.1.6 Métodos de Partida

Os motores quando ligados diretamente na rede elétrica com tensão e frequência nominais, durante a partida, chegam a solicitar uma corrente elevada, podendo chegar entre 6 a 10 vezes da sua corrente nominal. O tempo de partida de um motor pode variar de 0,5 a 10 segundos [07]. As instalações elétricas normalmente são projetadas para seu funcionamento em regime permanente, conseqüentemente, o sistema fica submetido a uma queda de tensão superior aos limites estabelecidos, reduzindo a qualidade de energia e podendo provocar distúrbios operacionais nos equipamentos de comando, proteção, iluminação, eletrônicos entre outros. Equipamentos de comando, como contadores, podem operar até uma determinada

queda de tensão. Motores síncronos e assíncronos, quando submetidos a tensões inferiores aos limites estabelecidos na Tabela 1, podem parar de funcionar por perder o sincronismo ou por influência do conjugado. A Tabela 1 fornece os valores percentuais de tensão sob os quais os motores e diversos dispositivos de comando podem operar indevidamente.

Tabela 1: Limites da tensão percentual e seus efeitos no sistema.[07]

Tensão de V_{nm} (%)	Conseqüências
85	Tensão abaixo da qual os contadores da classe 600 V não operam. Lâmpadas fluorescentes não funcionam.
76	Tensão em que os motores de indução e síncronos deixam de operar, quando funcionam a 115% de sua potencia nominal.
71	Tensão em que os motores de indução deixam de operar, quando em funcionamento a plena carga.
67	Tensão em que motores síncronos deixam de operar.

Segundo a norma NBR 5410/04, a queda de tensão durante a partida de um motor não deve ultrapassar 10% de sua tensão nominal no ponto de instalação do dispositivo de partida correspondente. Pequenos motores de indução, de baixa potência, podem partir diretamente na rede, pois não apresentam quedas de tensão significativas, nem aumento do período de aceleração [07].

Em virtude dos motivos expostos, durante a elaboração de um projeto de instalações elétricas ou para ligação de motores elétricos de potência elevada, devem ser previstos métodos de partida que reduzem a corrente de partida. A adoção de um sistema de partida eficiente ajuda a prolongar a vida útil do motor e reduzir gastos operacionais, envolvendo considerações da capacidade da instalação elétrica, do conjugado, da inércia das massas e até da capacidade do sistema gerador.

Partida Direta

O método de partida direta é considerado o método de partida de motores mais simples, pois não emprega nenhum dispositivo especial, são utilizados apenas contadores,

disjuntores ou chaves interruptoras. Não impõe restrições às características de conjugado e rotação, podendo ser utilizado tanto em motores com carga ou a vazio quando satisfazem as condições. As condições para partida direta de um motor são: corrente de partida do motor não é relevante em relação à corrente nominal da rede; baixa potência do motor. Os fatores que impedem a utilização desse método são: a potência nominal do motor ser superior a permitida pela concessionária local, normalmente estabelecida em até 5 cv, quando alimentada em baixa tensão; a carga alimentada precisa de um acionamento lento e progressivo [07].

Partida Chave Estrela–Triângulo

O método de partida estrela-triângulo é um método simples e muito utilizado nas indústrias, pois suaviza os efeitos de partida dos motores elétricos. Os motores precisam possuir no mínimo seis terminais acessíveis e de dupla tensão nominal, tal como 220/380 V ou 380/660 V. O procedimento de funcionamento ocorre ligando inicialmente o motor em estrela, até que este atinja uma velocidade próxima da nominal, posteriormente, o mesmo é ligado na configuração em triângulo. Há necessidade da correta parametrização do tempo de partida em estrela, para que o motor chegue próximo da velocidade síncrona e não ocorra uma grande elevação na corrente quando comutada a ligação para triângulo. Só pode ser utilizado esse método quando o conjugado de partida do motor for superior ao conjugado da carga. A corrente de partida e o conjugado ficam reduzidos a $1/3$ do nominal quando ligados em estrela, devido a essa redução esse método é muito utilizado em partidas a vazio [07].

As vantagens apresentadas nesse método são: custo reduzido, elevado número de manobras, corrente de partida reduzida a $1/3$ da nominal e baixas quedas de tensão durante a partida. As desvantagens são: aplicações específicas a motores com dupla tensão nominal e que disponham de pelo menos seis terminais acessíveis; conjugado de partida reduzido a $1/3$ do nominal; tensão da rede, que deve coincidir com a tensão em triângulo do motor; e o motor deve alcançar, pelo menos, 90% de sua velocidade nominal para evitar um pico de corrente elevada durante a comutação da chave.

Partida Chave Compensadora

A chave compensadora possui a vantagem de permitir vários ajustes de tensão e corrente, pois é composta por um autotransformador com várias derivações. Esse método é muito utilizado em motores de potência elevada e acionamento com cargas. As derivações normalmente encontradas nos autotransformadores das chaves compensadoras são de 65% e

85%. As vantagens são: a derivação de 65%, a corrente de partida na linha se aproxima do valor da corrente de acionamento quando utilizado chave estrela-triângulo; não acarreta elevação da corrente quando ocorre a comutação entre tensão reduzida para nominal; variações gradativas de tape para que possa aplicar a chave adequadamente à capacidade do sistema de suprimento. Já as desvantagens são: custo e dimensão superiores ao da chave estrela-triângulo [07].

Partida com Inversor de Frequência

A utilização de inversores de frequência na indústria tem aumentado significativamente nos últimos anos devido à facilidade de uso, operação, controle e economia de energia. São capazes de partir grandes motores com carga plena, sem gerar grandes quedas de tensão e elevadas correntes. Além disso, são capazes de variar a velocidade de acordo com a frequência aplicada. Uma vez que a frequência da rede é fixa em 60 Hz, o princípio do inversor é converter a corrente alternada em contínua, através de uma ponte retificadora, formando o chamado barramento DC. A partir disso, em uma segunda etapa controlada por microprocessadores, realiza-se o chaveamento do transistor IGBT's, de modo a alternar o sentido da corrente que circula pelo motor, circulando uma corrente alternada que pode variar a frequência de acordo com o chaveamento dos transistores [03].

Nos inversores de frequência existem duas filosofias de comando: controle escalar de velocidade e controle vetorial. O controle escalar varia a tensão e frequência do motor para manter constante a relação tensão-frequência, responsável por manter a capacidade de torque do motor. Já o controle vetorial possui alta precisão de controle de velocidade e torque, através da decomposição vetorial da corrente do motor [03].

2 Qualidade de Energia

2.1 Introdução

Quando ocorre um fenômeno que afeta a qualidade de energia elétrica, surgem dificuldades tais como: conceituação apropriada, nomenclatura adequada, definição de assuntos pertinentes, simbologia padronizada, regulamentação alicerçada. É natural e até imprescindível a priorização do tema, sobretudo em projetos de novas unidades industriais, bem como nos de modernização das já existentes. Em geral, soluções em qualidade de energia só são passíveis de serem alcançadas quando o fornecedor de energia, o consumidor e os fabricantes de equipamentos conscientizam-se da necessidade de entendimento mútuo para tal [08].

Qualidade de energia é um termo que pode ser usado para descrever os limites de variação das correntes e tensões de um sistema elétrico. A maior parte dos distúrbios pode ser originada em qualquer consumidor que tenha equipamentos classificados como não lineares. A ocorrência simultânea deste tipo de distúrbio em vários consumidores, ou mesmo internamente em um único consumidor, agrava a ultrapassagem dos limites impostos a certos valores de correntes e tensões dos sistemas de energia, aceitos como toleráveis dentro de um quadro de Qualidade de Energia. Os efeitos produzidos pela má qualidade de energia nos equipamentos elétricos são variáveis, indo desde ligeiros aquecimentos até falha total. Cada tipo de equipamento sensível aos distúrbios, principalmente os eletrônicos, difere em seu comportamento em relação às quantidades e intensidades das variações das grandezas elétricas, antes que ocorra uma falha [08].

As distorções provenientes de cargas não lineares, geram correntes não senoidais e distorcem as tensões. Estes são largamente utilizadas tanto em residências quanto na indústria. Cargas com conversores estáticos, como TV, PC, impressoras, acionamento de velocidade variável e lâmpadas de descarga, afetam as outras cargas conectadas ao barramento, sofrendo com essas distorções. As distorções podem ser diferenciadas em seqüência positiva, seqüência negativa e seqüência zero, e normalmente são medidas comparando a contribuição total das harmônicas com a componente fundamental. As distorções provocam vários problemas nos motores de indução trifásicos, tais como: sobreaquecimento do estator que pode ocasionar

redução da eficiência da isolação; perda de eficiência; queda do fator de potência verdadeira; vibrações mecânicas na máquina, as quais aumentam as perdas por fricção nos mancais dos rolamentos, reduzindo a vida útil, podendo provocar o roçamento entre o rotor e o estator e ocasionando a elevação da temperatura devido ao atrito; sobreaquecimento do rotor, sendo este o principal problema causado pelos distúrbios; variações no escorregamento; diminuição devido a variações de seqüências positivas e aumento devido as seqüências negativas [09].

Nestes anos recentes, o número de equipamentos, aparelhos e controles sensíveis à qualidade de energia tem aumentado consideravelmente, assim como tem-se verificado também um aumento no número de sistemas de cargas que produzem distúrbios (tais como harmônicas causadas pelo controle de velocidade variável de um motor). Cargas como computadores, controles de processo e equipamentos de comunicação são mais sensíveis à qualidade da energia do que as tradicionais cargas dos sistemas de energia elétrica [08].

2.2 Afundamento de tensão

Afundamentos de tensão e interrupções momentâneas é uma curta redução na magnitude da tensão, constituindo provavelmente os problemas de qualidade de energia mais importantes e afetando o funcionamento de indústrias e grandes clientes comerciais. Esses eventos são geralmente associados a uma falha em algum lugar no sistema de alimentação elétrica. A análise do afundamento de tensão exige alguns conhecimentos de suas características e da probabilidade de sua ocorrência. A Figura 9, caracteriza um caso de afundamento de tensão [10]. Ela é definida pela redução entre 0,9 a 0,1 pu da sua tensão nominal. Valores abaixo de 0,1 pu são considerados como falta.

Causas dos afundamentos de tensão

Os afundamentos de tensão são normalmente causados por condições de falha. A partida do motor também pode resultar em subtensões, no entanto as magnitudes de tensão não são tão baixas. Falhas resultando em quedas de tensão podem ocorrer dentro de uma planta ou em uma concessionária. A condição de afundamento de tensão persistirá até que sua causa seja eliminada por um dispositivo de proteção. No sistema da concessionária, a falha pode ser eliminada por um fusível ou disjuntor de uma subestação [11].

Conseqüências dos afundamentos de tensão

A curta interrupção na tensão da rede pode afetar significativamente a máquina de indução. Através da realização de simulações numéricas, Zlomek e Drápela afirmam que

afundamentos de tensão causam picos de torque, picos de corrente e perdas mecânicas, que diminuem a velocidade do gerador. Os picos de corrente podem acionar o sistema de proteção da máquina, e os picos de torque podem danificar seu sistema mecânico [12].

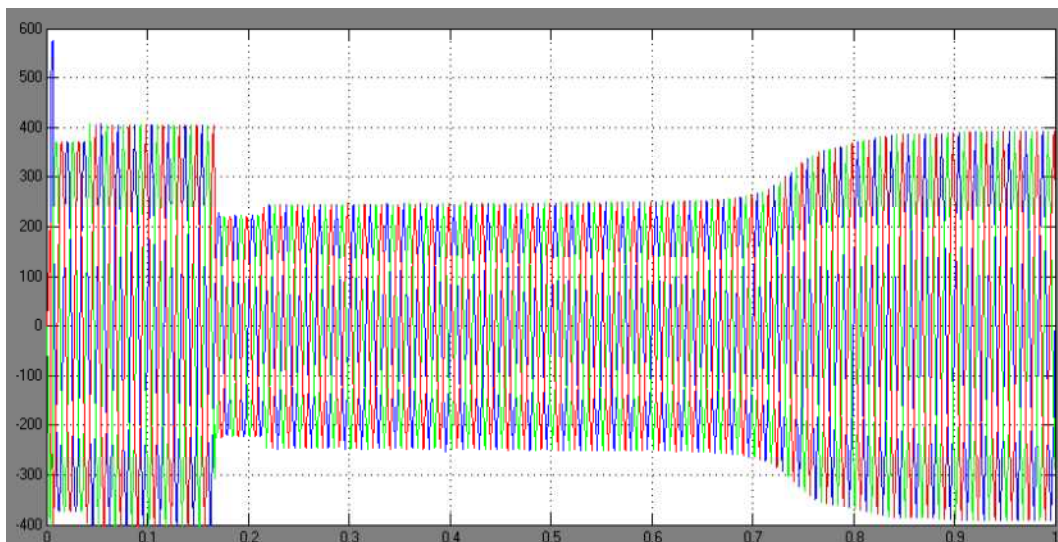


Figura 9: Caracterização de um afundamento de tensão.

2.3 Harmônicos e Interharmônicos

Os interharmônicos (harmônicos não múltiplos de 60 Hz) costumam originar-se em cargas com formas de corrente não periódicas em 60 Hz (por exemplo, cicloconversores e fornos a arco). Os harmônicos são originados por cargas eletrônicas que consomem correntes periódicas de 60 Hz não senoidais (por exemplo, um retificador trifásico de onda completa a diodos). As distorções harmônicas são um tipo específico de energia “suja” (poluída ou contaminada) que, diferentemente dos transientes de corrente e tensão, estão presentes de forma contínua, associadas ao crescente número de acionamentos estáticos (inversores de frequência, variadores de velocidade, etc.), fontes chaveadas, e outros dispositivos eletrônicos de acionamento (lâmpadas eletrônicas, por exemplo) [11].

Um componente harmônica em um sistema de alimentação CA é definido como um componente senoidal de uma onda periódica, que tem uma frequência igual a um inteiro múltiplo da frequência fundamental do sistema. Harmônicos em formas de onda de tensão ou corrente podem então ser concebidos com componentes senoidais de frequências múltiplas da frequência fundamental, demonstrado na Equação 7 [13]

$$f_h = (h) \times (f_{fundamental}) \quad (7)$$

Onde:

f_h = Freqüência da harmônica.

h , = Ordem harmônica

$f_{fundamental}$ = Freqüência fundamental da rede.

As distorções harmônicas vêm crescendo a cada dia no ambiente industrial, devido ao aumento de cargas não lineares. Portanto, a redução dos harmônicos vem se tornando cada vez mais necessário. As harmônicas são divididas em três tipos: de seqüência positiva, de seqüência negativa e de seqüência zero. Correntes harmônicas de seqüência positiva compreendem as harmônicas de ordem 7°, 13° e 19°. As de seqüência negativa são as de ordem 5°, 11° e 17° e contribuem para o aumento do índice THD (Distorção Harmônica Total) do sistema. Já as correntes harmônicas de seqüência zero são da ordem múltipla de três como 3°, 9° e 15°, que fluem pelo condutor neutro e podem causar superaquecimento do fio [12].

A Figura 10 mostra a forma de onda senoidal da freqüência fundamental (I1) e freqüências múltiplas de 3 (I3), de 5 (I5) e de 7 (I7) da fundamental e a corrente total (I_{total}) após a soma.

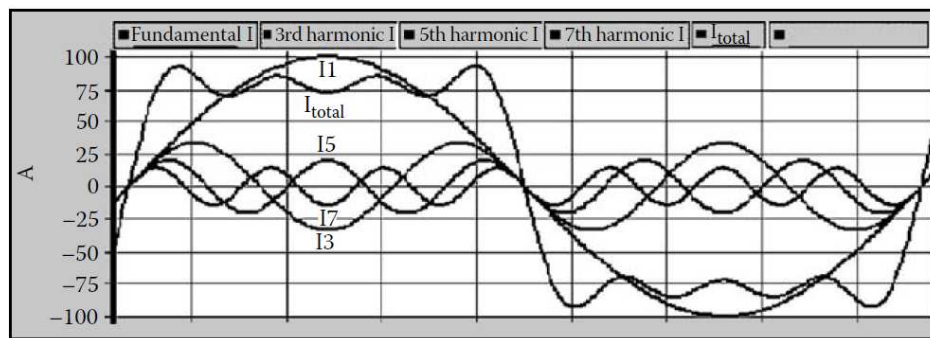


Figura 10: Forma de onda senoidal, distorcida com harmônicas de 3a., 5a, e 7a ordem e total [12].

As formas de onda acima podem ser expressadas pelas seguintes equações:

$$i_1 = I m_1 \sin \omega t \quad (8)$$

$$i_3 = I m_3 \sin(3\omega t - \delta_3) \quad (9)$$

$$i_5 = I m_5 \sin(5\omega t - \delta_5) \quad (10)$$

$$i_7 = I m_7 \sin(7\omega t - \delta_7) \quad (11)$$

$$I_{total} = I m_1 \sin \omega t + I m_3 \sin(3\omega t - \delta_3) + I m_5 \sin(5\omega t - \delta_5) + I m_7 \sin(7\omega t - \delta_7) \quad (12)$$

Onde:

I_{m_k} é a corrente RMS harmônica de pico, e na Equação 12 tem-se a corrente resultante no sistema, devido ao somatório de todas as correntes.

Desta forma, um somatório de formas de onda perfeitamente senoidal pode dar origem a uma forma de onda distorcida. Por outro lado, uma forma de onda distorcida pode ser representado como a superposição de uma onda de frequência fundamental com outras formas de onda de diferentes frequências harmônicas e amplitudes [11].

2.4 Distorção Harmônica Total

Distorção harmônica total (THD) do inglês Total Harmonic Distortion é um importante índice amplamente utilizado para descrever problemas de qualidade de energia em sistemas de transmissão e distribuição. Esta considera a contribuição de cada componente harmônica individual presente no sinal e é definida para sinais de tensão e corrente, respectivamente nas Equações 13 e 14:

$$THD_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} / V_1 \quad (13)$$

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} / I_1 \quad (14)$$

Onde:

V_h = amplitude dos componentes harmônicos individuais (valores eficazes) (V)

h = ordem harmônica

V_1 = Valor eficaz da tensão fundamental (V)

I_h = amplitude dos componentes harmônicos individuais (valores eficazes) (A)

I_1 = Valor eficaz da corrente fundamental (A)

Na Tabela 2 estão os limites das distorções harmônicas de tensão recomendados pela IEEE519-1996, já na Tabela 3 estão os limites das distorções harmônicas de corrente [08].

Tabela 2: Limites de distorção harmônica da tensão em % da componente da tensão

Barra de Tensão	Distorção Harmônica Individual de Tensão	Distorção Harmônica Total de Tensão THD(%)
$V_n \leq 69\text{kV}$	3,0	5,0

$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V_n > 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

Tabela 3: Limites de distorção harmônica da corrente em %, para consumidores.

Icc/ I carga	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7
100-1000	12	5,5	5	2	1
> 1000	15	7	6	2,5	1,4

Para essa tabela valem as seguintes definições:

Valores em % da corrente nominal. h = ordem da harmônica.

Icc = corrente de curto-circuito. I carga = Corrente da carga.

2.5 Ruído ou Noise:

O ruído é a distorção da tensão senoidal, através da superposição de um sinal de alta frequência (da ordem de MHz). Pode-se classificar em dois tipos de ruídos, o de modo comum e o de modo normal, sendo definidos como:

- Ruído de Modo Comum – *Common Mode Noise*: Diferença da tensão que ocorre entre o condutor neutro e a terra.
- Ruído de Modo Normal – *Normal Mode Noise*: Diferença da tensão que ocorre entre o condutor fase e neutro.

O ruído nos sistemas de energia elétrica pode ser causado pelos dispositivos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamento a arco, cargas com retificadores de estado sólido e alimentadores de potência com chaveamentos. Os problemas de ruído são freqüentemente

agravados pelo aterramento inadequado. Basicamente, o ruído consiste em qualquer distorção indesejável do sinal de potência que não pode ser classificado como distorção harmônica nem como transitória [13].

2.6 Variações de Curta-Duração

As variações de curta duração da tensão são quase sempre causadas por condições de falta de energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida ou pela perda intermitente das conexões com o sistema elétrico. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode causar aumentos temporários da tensão, afundamentos de tensão, ou completa perda de tensão (interrupção). A condição de falta pode estar perto ou longe do ponto de interesse. Em ambos os casos, o impacto sobre a tensão durante a condição de falta efetiva é uma variação de curta duração. As mudanças na corrente que caem dentro das categorias de duração e amplitude também estão incluídas na variação de curta duração [08].

A situação mais crítica associada com as interrupções, afundamentos e elevações é a paralisação de equipamento. Em muitos ambientes industriais com um processo contínuo de fabricação, como exemplo as fábricas de papel, ainda que ocorra uma duração instantânea dos fenômenos, estes podem causar uma paralisação dos equipamentos, cujo religamento pode acontecer por um período de horas, devido a complexidade deste processo industrial. Portanto, pode-se considerar que o efeito provocado em determinados processos de fabricação é o mesmo, tanto para fenômenos de curta-duração como longa-duração [08].

2.7 Resumo dos principais tipos de distúrbios

A Tabela 4 mostra os principais tipos de distúrbios encontrados no setor industrial os itens de qualidade de energia, com a suas causas, efeitos nos equipamentos e também possíveis mitigações [16].

Tabela 4: Itens de Qualidade de Energia [16]

Tipos de Distúrbios	Causas	Efeitos	Soluções
Transitórios Impulsivos	- Descargas atmosféricas; - Chaveamentos de cargas.	- Excitação de circuitos ressonantes; - Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	- Filtros; - Supressores de surto; - Transformadores isoladores.
Transitórios Oscilatórios	- Descargas atmosféricas; - Chaveamentos de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	- Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; - Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	- Filtros; - Supressores de surto; - Transformadores isoladores.
Sub e Sobre tensões	- Partidas de motores; - Variações de cargas; - Chaveamento de capacitores.	- Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; - Falhas em equipamentos eletrônicos; - Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP's e TC's; - Operação indevida de relés de proteção.	- Reguladores de tensão; - Fontes de energia de reserva; - Chaves estáticas; - Geradores de energia.
Harmônicos	- Cargas não lineares.	- Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; - Danificação de capacitores.	- Filtros; - Transformadores isoladores.
Interharmônicos	- Conversores estáticos de potência;	- Interferência na transmissão de sinais "carrier"; - Indução de "flicker" visual	- Filtros;

	- Cicloconversores; - Motores de indução; - Equipamentos a arco, etc.	no “display” de equipamentos.	
Ruídos	- Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência; - Radiações eletromagnéticas.	- Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	- Aterramento das instalações; - Filtros.
Oscilações de Tensão	- Cargas intermitentes; - Fornos a arco; - Partidas de motores.	- “Flicker”; - Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; - Queda de rendimento de equipamentos elétricos; - Interferência nos sistemas de proteção.	- Sistemas estáticos de compensação de reativos; - Capacitores série.

3 Ensaios no Laboratório

3.1 Introdução

Para estudar os fenômenos ocorridos referentes aos distúrbios da qualidade de energia elétrica, durante a partida elétrica de motores de indução trifásicos e comparar esses métodos de partida, foi utilizado o Laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa.

Os materiais utilizados para realizar os experimentos foram: Painel de energia trifásico; cabos e conectores; analisador de qualidade de energia Fluke 435; motor de indução trifásico o MIT; máquina síncrona acoplado ao eixo do MIT funcionando como gerador de energia para alimentar um conjunto de lâmpadas; conjunto de lâmpadas incandescentes (carga); fonte de corrente contínua para alimentar a corrente de campo do gerador síncrono; multímetros; disjuntor para chave partida direta; variador de tensão tipo auto-transformador, funcionando como chave compensadora e inversor de frequência da WEG CFW11. Foi montado um painel com contatores, botões e temporizadores para efetuar a chave de partida estrela-triângulo.

A estrutura da montagem desenvolvida para analisar os distúrbios está apresentada na Figura 11.

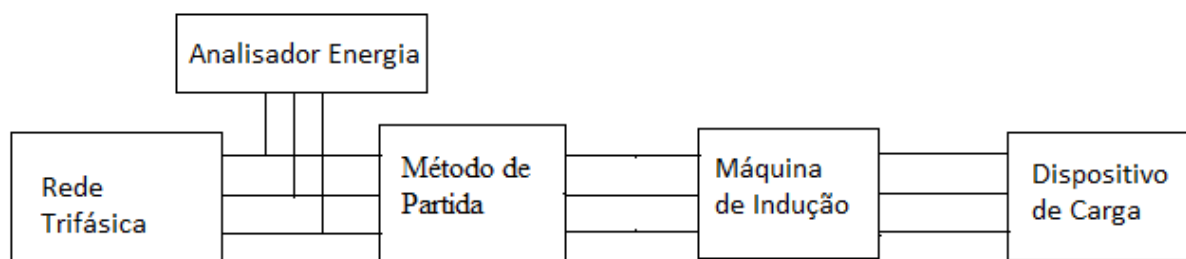


Figura 11: Estrutura dos ensaios realizados nos laboratórios.

Para realizar os estudos referentes foi conectado o método de partida do motor no painel da rede trifásica, entre eles foi colocado o analisador de qualidade de energia da Fluke 435. O método de partida aciona o motor de indução trifásico, que é acoplado em seu eixo a máquina síncrona. Esta funciona como carga e gera energia para acionar um conjunto de

lâmpadas. Foram efetuadas partidas com o motor a vazio e com carga, a fim de comparar os dois casos.

3.2 Descrição dos materiais utilizados

3.2.1 Motor de Indução Trifásico

Dados de Placa:

Potência Ativa: 2,2KW ou 3c.v

Velocidade Nominal: 1690rpm

Frequência: 60Hz

Tensão Nominal Y/ Δ : 220/380V

Corrente Nominal Y/ Δ : 9,0/5,2A

Fator de Potência: 0,8

3.2.2 Gerador Síncrono

Dados de placa:

Tensão Δ /Y: 130/230V

Potência Ativa: 1,6KW

Potência Aparente: 2,0KVA

Fator de Potência: 0,8

Frequência Nominal: 60Hz

Velocidade Nominal: 1800rpm

3.2.3 Auto-transformador

Dados de placa:

Tensão: 380V – 15 KVA – 615 V (saída)

220V - 9,1KVA – 356V (saída)

Corrente máxima de linha – 20A

Disjuntor Tripolar de 40A

3.2.4 Analisador de Qualidade de energia Fluke 435.

O aparelho da Fluke é utilizado para analisar a qualidade de energia. Tem a capacidade de monitorar e armazenar os dados referentes há vários distúrbios, entre eles: Formas de ondas de tensão e corrente, afundamentos e elevações de tensão, harmônicos e interharmônicos de todos os tipos, flickers, desequilíbrio de fases, transientes, ruídos, interrupções ou faltas entre outros.

3.2.5 Painel para partida estrela-triângulo

03 Contatores elétricos

02 Botões tipo push (contatos NA/NF), verde para ligar e vermelho para desligar.

02 Temporizadores: Um para determinar o tempo da chave em estrela, e o outro como sistema de proteção para evitar o curto-circuito trifásico.

A Figura 12, mostra o painel montado para realizar o experimento.



Figura 12: Painel Estrela-Triângulo.

3.3 Resultados Experimentais

3.3.1 Partida Direta

Partida a Vazio

Foram realizados estudos em laboratório para analisar distúrbios no método de partida direta do motor de indução. A Figura 13 mostra o espectro harmônico da tensão no momento da partida, como não há diferença significativa entre as fases ela consegue retratar o que ocorrem nas três fases. Nota-se pela análise dos espectros de tensão que os níveis harmônicos de tensão entre as fases não apresentaram diferenças e os valores de THD's estão próximos. Vale destacar apenas a harmônica de 5º ordem que possui uma magnitude de 2,7%, 2,5% e 2,9% nas fases A, B e C respectivamente, mesmo que pequena, sobressaindo em relação as demais, essa harmônica aparece devido a influência do motor e não em razão do tipo de acionamento em questão.

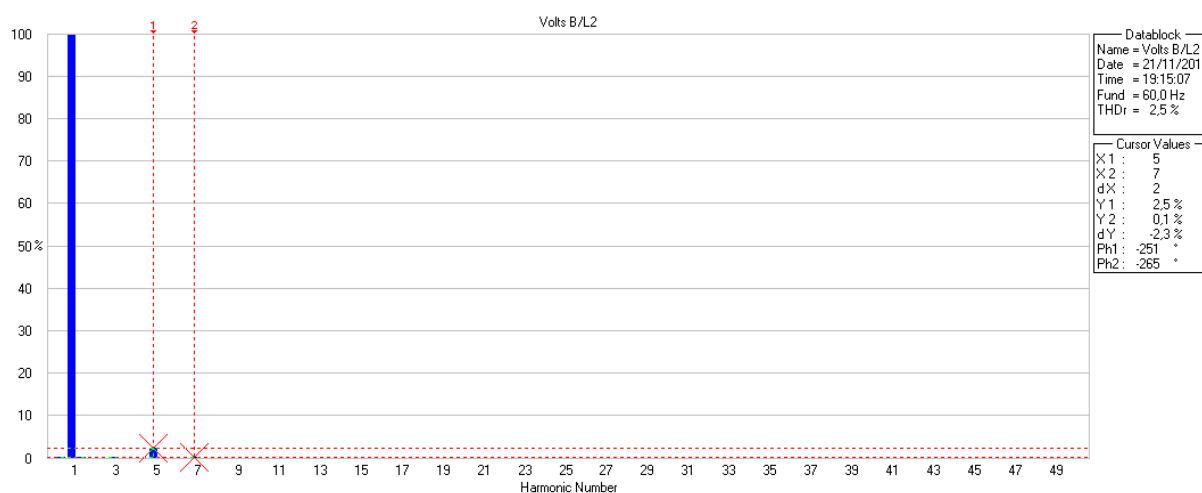


Figura 13: Espectro Harmônico de Tensão Fase B situação de partida direta a vazio.

As Figuras 14, 15 e 16 mostram os espectros das correntes de cada fase que alimentam o motor de indução trifásico. Nos espectros harmônicos de corrente nota-se uma pequena diferença nas amplitudes das componentes harmônicas e que conseqüentemente refletem em uma pequena variação no índice THD's. Outro ponto a destacar é a ordem harmônica individual nos espectros. A componente de 300Hz (5ª ordem) está com sua amplitude mais elevada, chegando a 4,0% , 4,0% e 5,5% nas fases A, B e C respectivamente e um THD de 6,0%, 5,0% e 7,0% nas fases A, B e C respectivamente. Contudo apenas a fase C apresentou uma componente de 3ª harmônica de 3,8%, enquanto as outras foram quase nulas. De acordo com a tabela 3, a fase C ficou no limite máximo permitido de THD para corrente. A Tabela 5 mostra os valores encontrados das distorções harmônicas na partida.

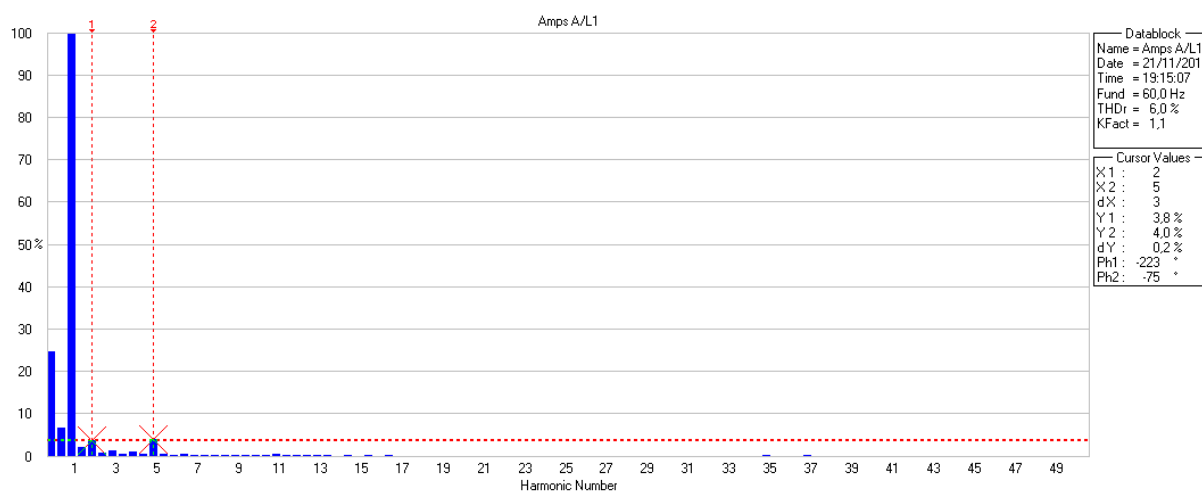


Figura 14: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação de partida direta a vazio.

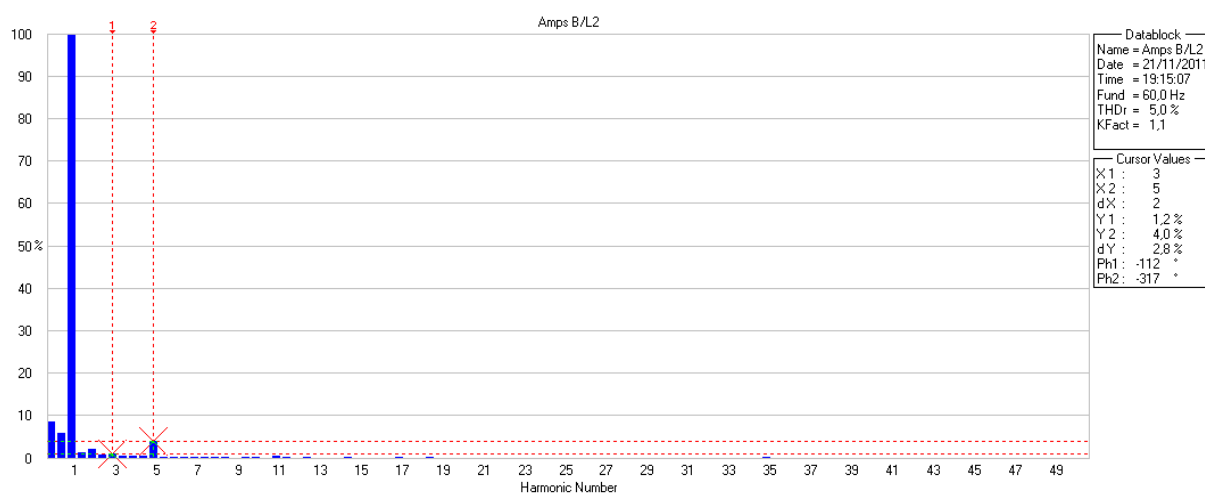


Figura 15: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação de partida direta a vazio.

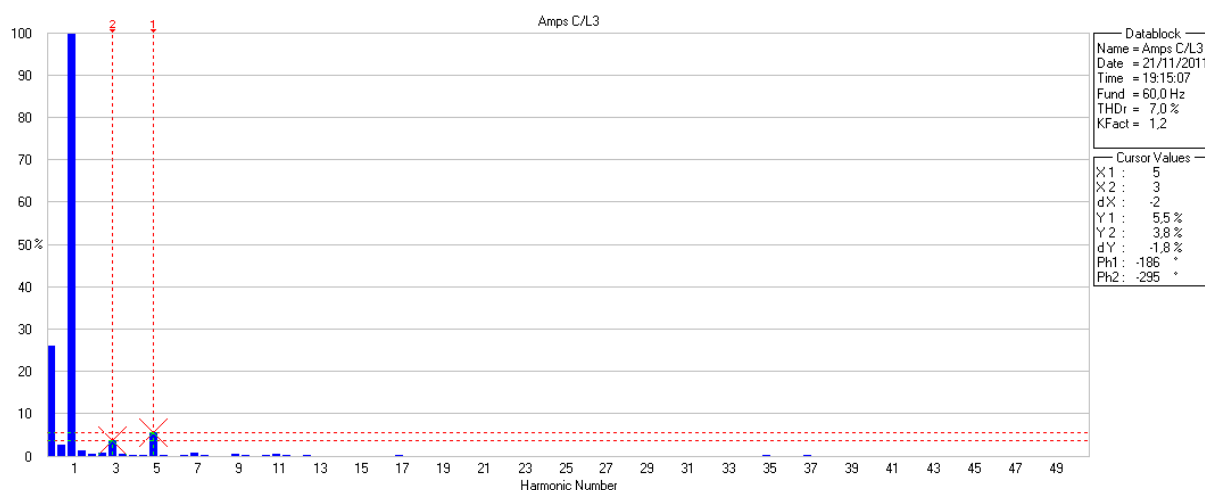


Figura 16: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação de partida direta a vazio.

Tabela 5: Distorções Harmônicas de corrente na partida direta a vazio.

Partida Direta a vazio			
Fases	3 ^a	5 ^a	THD
A	0,8 %	4 ,0%	6,0 %
B	1,2 %	4 ,0%	5,0 %
C	3,8 %	5,5 %	7,0 %

Partida com Carga

O ensaio em partida direta foi realizado adicionando uma carga trifásica linear de 900W ao sistema, com o objetivo de comparar os resultados entre a situação a vazio e com carga. Julgou-se necessário apresentar apenas o espectro harmônico de tensão de uma das fases, pois os espectros para as demais fases são análogos. Ao analisar o espectro da Figura 17 conclui-se que tanto na situação a vazio quanto na com carga acoplada ao sistema, os níveis e a ordem harmônica de tensão introduzida na rede trifásica pelo sistema são similares, pois os níveis de THD giram em torno de 2,1 a 2,2% de uma situação para a outra e a ordem harmônica que mais se pronunciou foi a harmônica de 5º ordem.

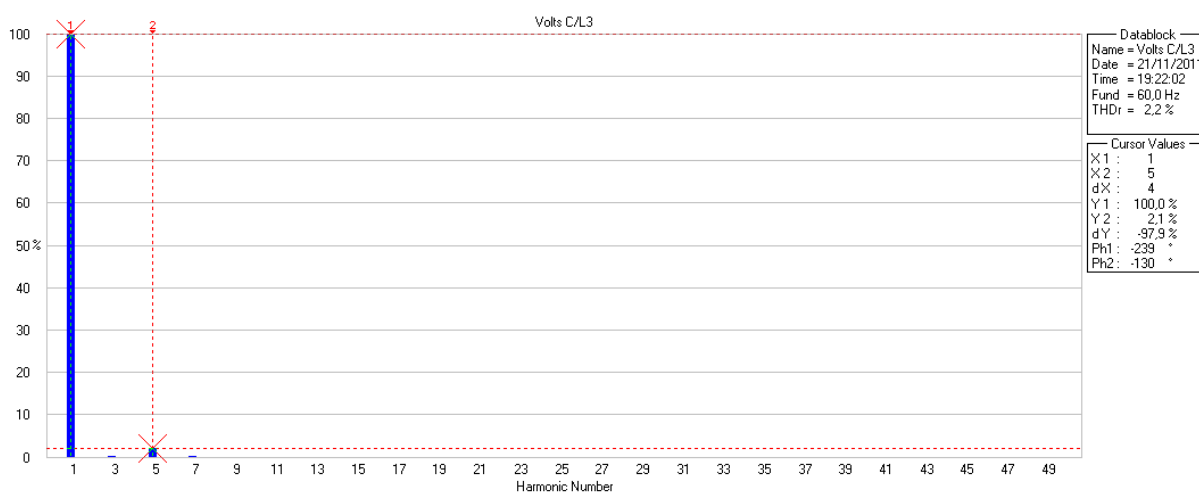


Figura 17: Espectro Harmônico de Tensão Fase C situação partida direta com carga.

Os espectros harmônicos de corrente para a situação com carga se assemelham dos espectros da situação a vazio quando analisamos as ordens harmônicas, pois em ambos os casos temos a componente de quinta ordem se destacando sobre as demais frequências do espectro, mas ao analisar o THD pode-se perceber que na situação com carga o nível deste índice reduziu chegando a um valor médio entre as três fases de 4,9% contra uma média de THD para a situação a vazio de 6,0%. Mesmo que o THD tenha diminuído 1,1% de uma situação para a outra conclui-se que ao adicionar carga no sistema os níveis harmônicos reduziram, não quer dizer que ao adicionar carga estamos filtrando as componentes harmônicas de corrente, mas sim elevando fator de potência da sistema elétrico e conseqüentemente aumentando a eficiência do sistema e reduzindo os impactos das distorções harmônicas o que reflete em THD's menores. Abaixo nas Figuras 18, 19 e 20 são mostrados os espectros harmônicos de corrente para as três fases.

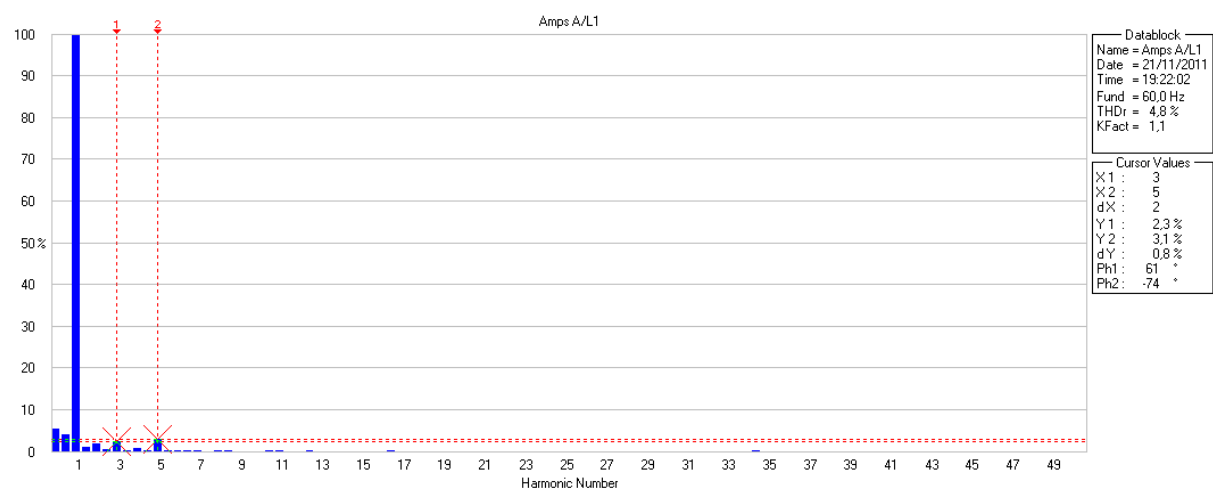


Figura 18: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida direta com carga.

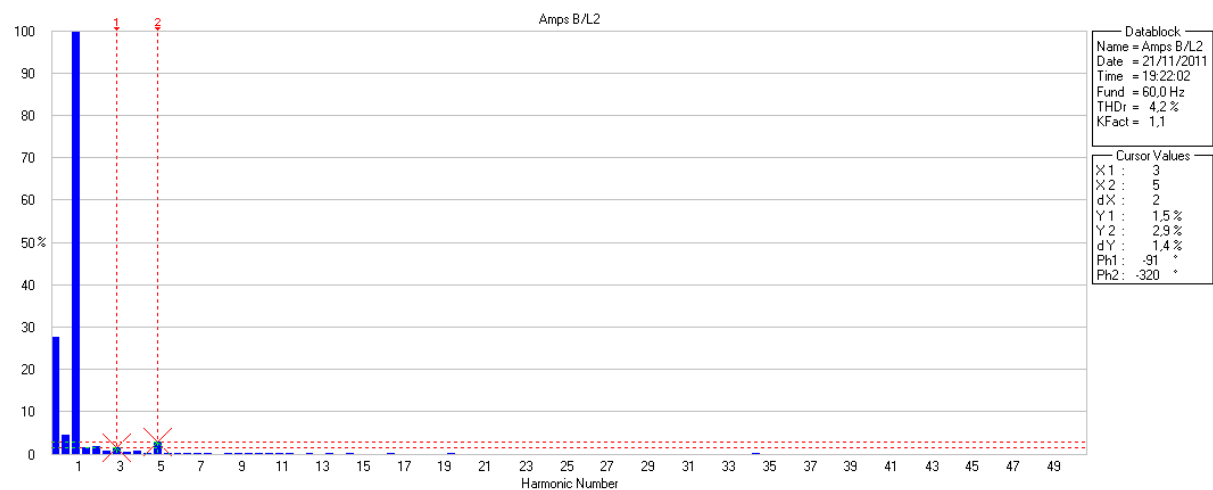


Figura 19: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação partida direta com carga.

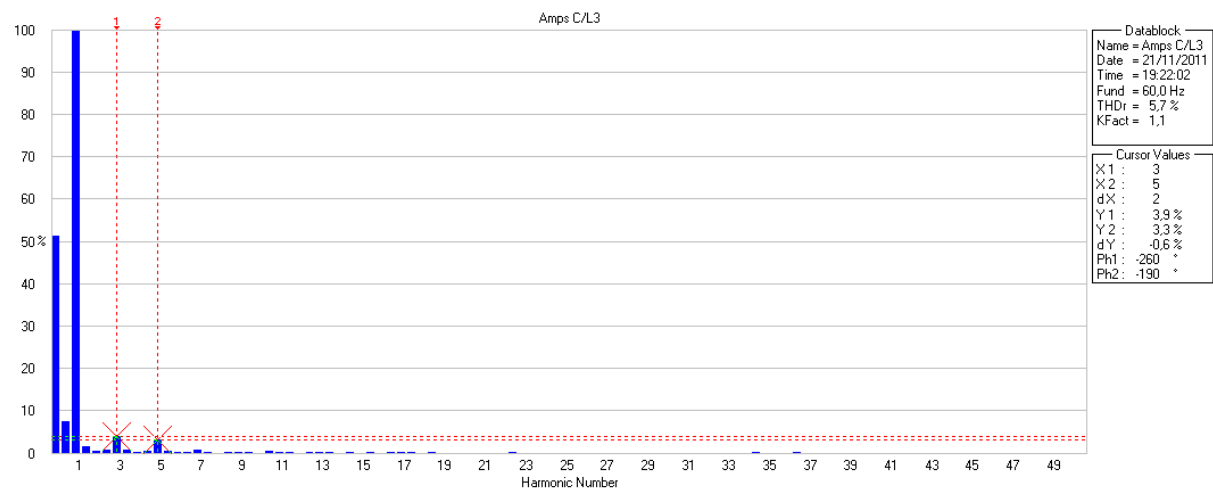


Figura 20: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida direta com carga.

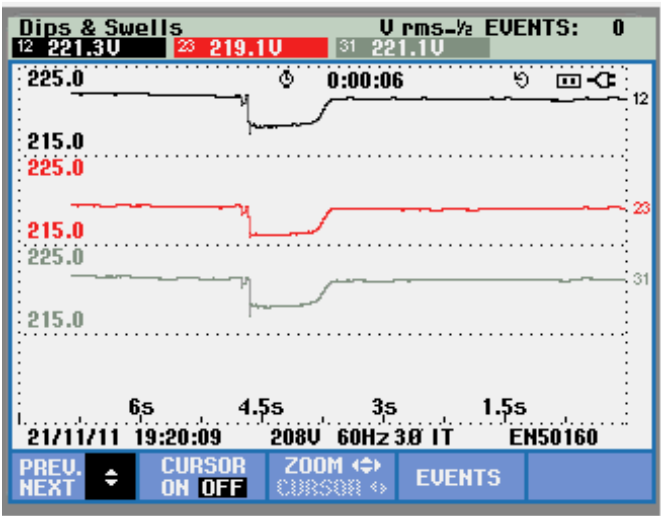


Figura 21: Afundamento na tensão, partida direta com carga.

A Figura 21 mostra o afundamento de tensão das 3 fases, há uma pequena variação da tensão inicial de 221,3 V para um pico mínimo de 215,2 V, que não caracteriza um afundamento de tensão, pois a amplitude da variação é menor do que 0,1 pu. As Tabelas 6 e 7 mostram os valores encontrados das distorções harmônicas na partida.

Tabela 6: Distorções Harmônicas de corrente na partida direta com carga.

Partida Direta com Carga			
Fases	3 ^a	5 ^a	THD
A	2,3 %	3,1 %	4,8 %
B	1,5 %	2,9 %	4,2 %
C	3,9 %	3,3 %	5,7 %

Tabela 7: Coparação do método de partida direta, com e sem carga.

Partida Direta

THD corrente	Vazio	Com Carga
A	6 %	4,8 %
B	5 %	4,2 %
C	7 %	5,7 %

3.3.2 Partida Chave Estrela-Triângulo

Partida a Vazio

O ensaio do método de partida estrela-triângulo realizado mostrou distorções harmônicas de tensão similares aos outros métodos, com o THD médio de 2,5%, visto na Figura 22. Já as distorções harmônicas de correntes, presentes nas Figuras 23, 24 e 25 mostraram THD's de 6,4%, 5,4% e 6,9%. Harmônicas de 5ª ordem de 4%, 3,9% e 5,2%, enquanto de 3ª ordem foram de 1,5%, 0,8% e 3,7%, respectivamente das fases A, B e C. As fases A, B e C apresentaram também uma harmônica de 2ª ordem com valores de 4%, 2,1% e 0,8%, respectivamente. A Tabela 8 mostra os valores encontrados das distorções harmônicas na partida.

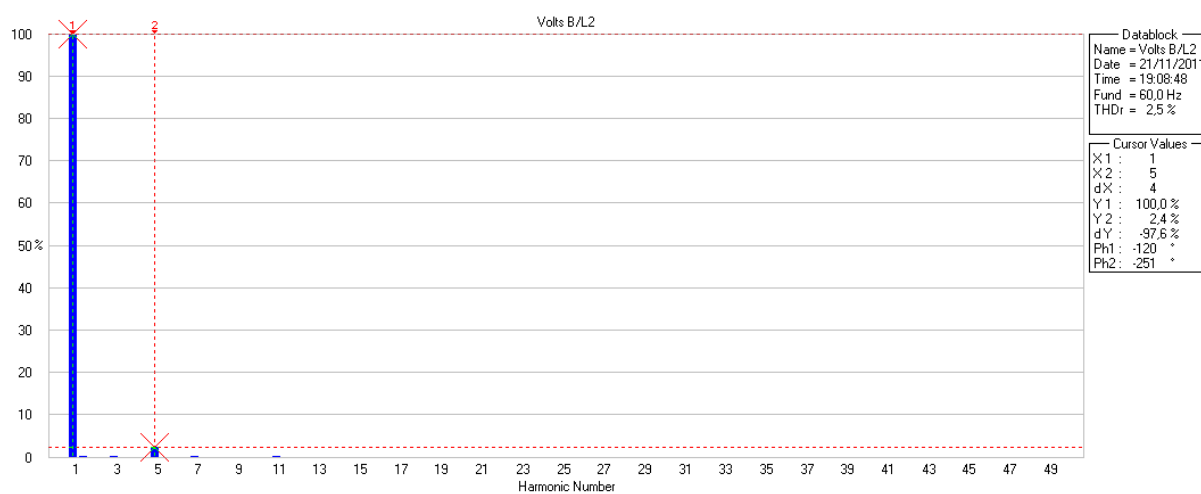


Figura 22: Espectro Harmônico de Tensão Fase B, partida Estrela-Triângulo sem carga.

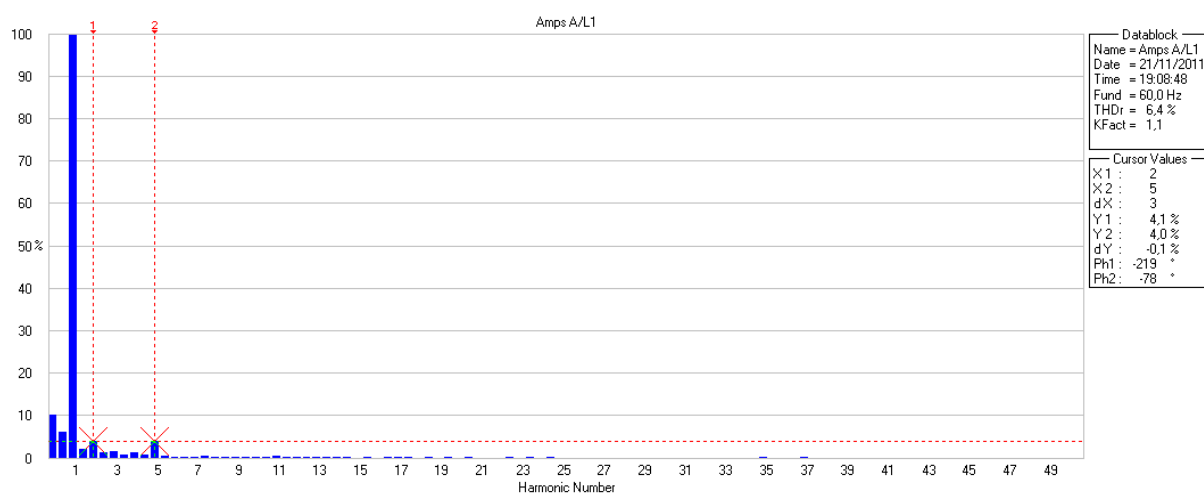


Figura 23: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida estrela-triângulo sem carga.

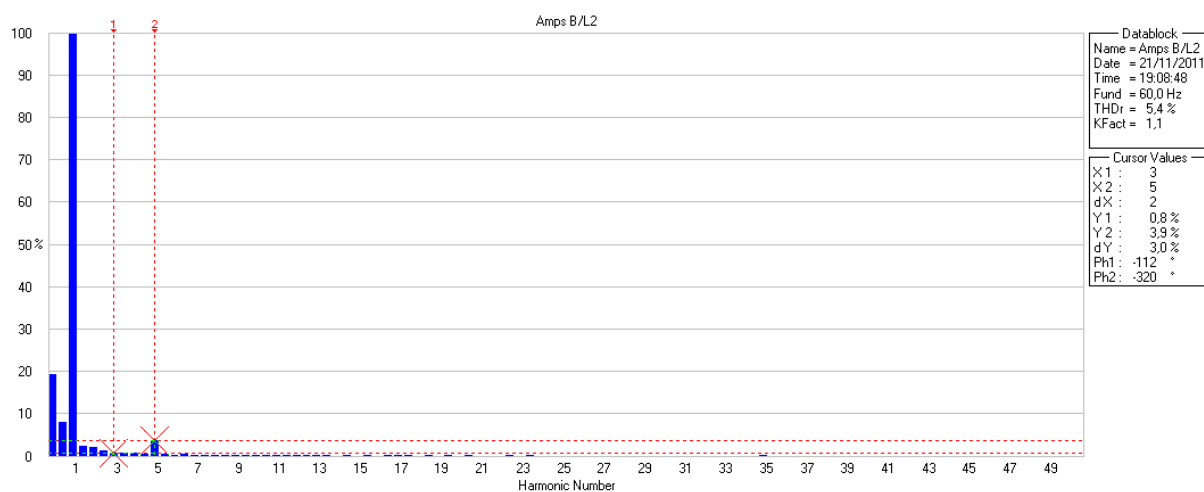


Figura 24: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação partida estrela-triângulo sem carga.

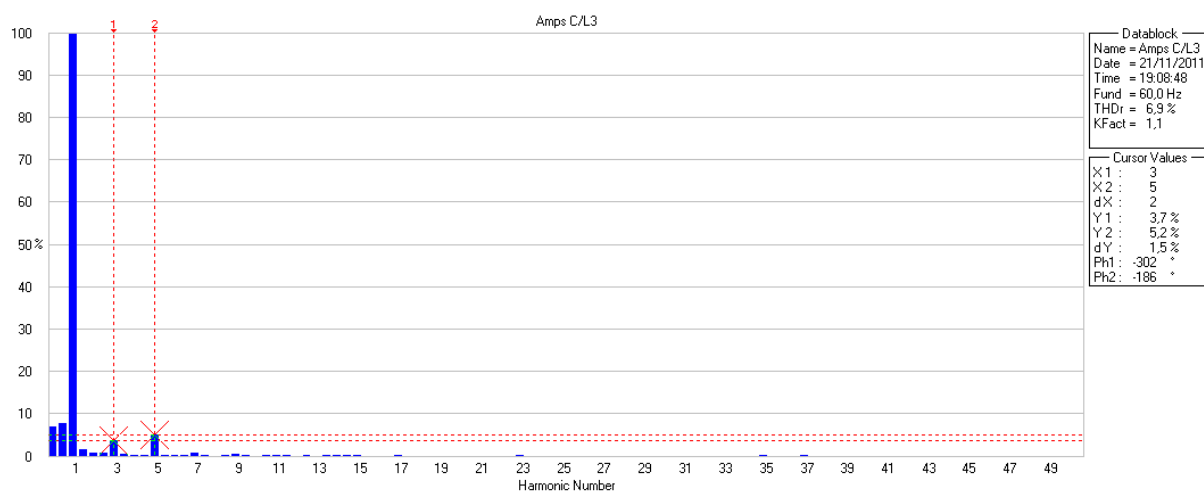


Figura 25: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida estrela-triângulo sem carga.

Tabela 8: Distorções Harmônicas de corrente na partida chave estrela-triângulo sem carga.

Estrela-Triângulo a vazio			
Fases	3 ^a	5 ^a	THD
A	1,5 %	4 %	6,4 %
B	0,8 %	3,9 %	5,4 %
C	3,7 %	5,2 %	6,9 %

Partida com Carga

Da mesma forma foram realizados os experimentos da partida chave estrela-triângulo, apresentando um gráfico de THD's de tensão similar ao sem carga, com valores médios de 2,8%. Já os gráficos de THD's de corrente apresentaram os seguintes índices, 5,5%, 4,9% e 7%, enquanto para harmônicas de 5^a ordem foram 3,9%, 3,5% e 4,1%, já as harmônicas de 3^a ordem foram de 1,8%, 1,9% e 4,4%, respectivamente nas fases A, B e C. A fase C apresentou componente de 3^a harmônica maior do que de 5^a, sendo o único caso. A Figura 26 mostra o espectro harmônico da fase A, como o da fase B é similar não se mostrou necessário apresentar o gráfico. A Figura 27 representa o espectro harmônico da fase C. As Tabelas 9 e 10 mostram os valores encontrados das distorções harmônicas na partida.

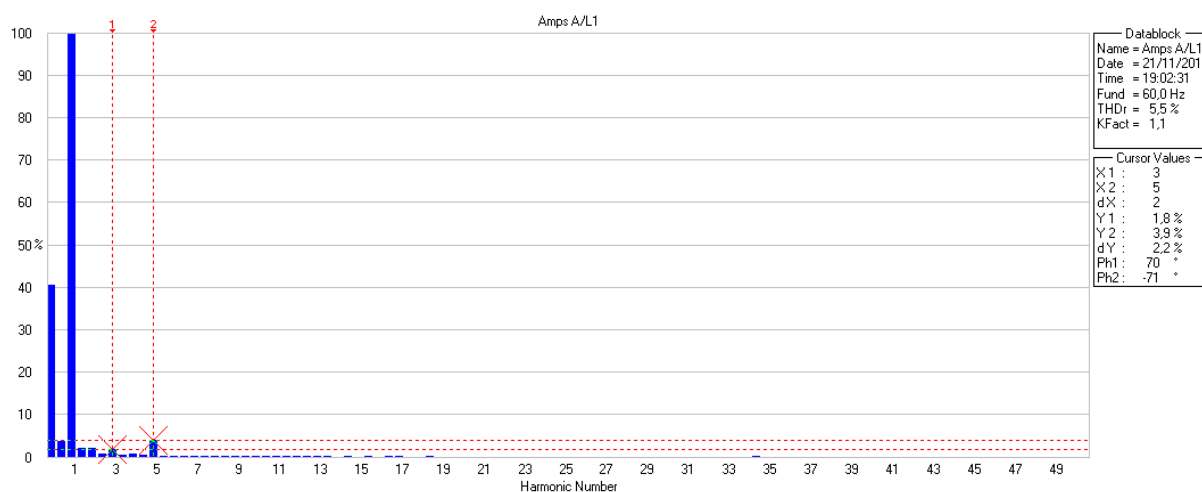


Figura 26: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida estrela-triângulo com carga.

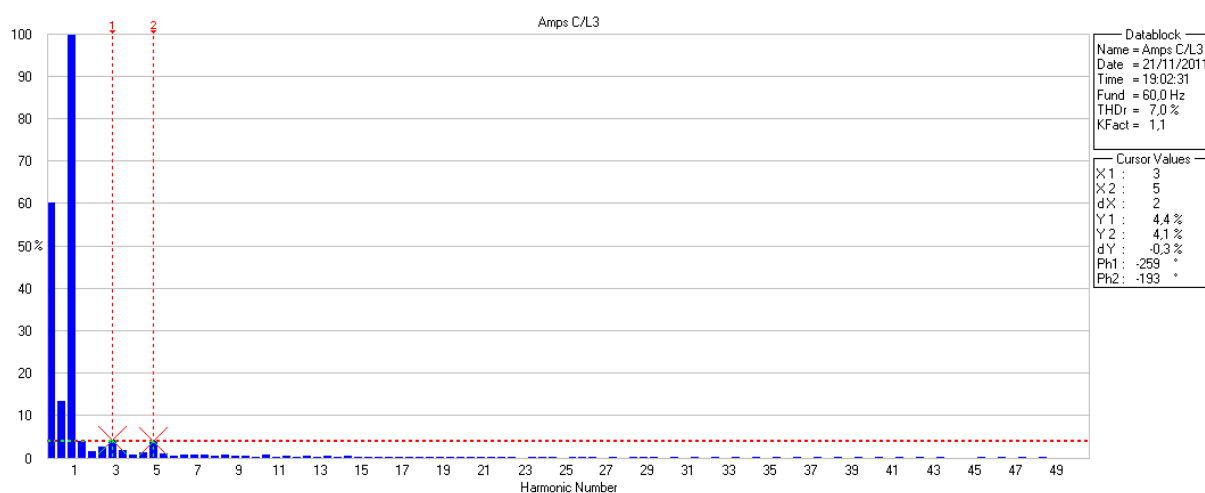


Figura 27: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida estrela-triângulo com carga.

Tabela 9: Distorções Harmônicas de corrente na partida chave estrela-triângulo com carga

Estrela-Triângulo com carga			
Fases	3 ^a	5 ^a	THD
A	1,8 %	3,9 %	5,5 %
B	1,9 %	3,5 %	4,9 %
C	4,4 %	4,1 %	7,0 %

Tabela 10: Comparação entre Distorções Harmônicas de corrente na partida chave estrela-triângulo com e sem carga

Partida Estrela-Triângulo		
THD corrente	Vazio	Com Carga
A	6,4 %	5,5 %
B	5,4 %	4,9 %
C	6,9 %	7,0 %

3.3.3 Partida Chave Compensadora

Partida com Carga

A chave compensadora foi utilizada nos experimentos com o tap de 65% da tensão inicial para facilitar na comparação com o método estrela-triângulo, pois as tensões induzidas no motor são muito próximas. Esse método de partida apresentou uma menor queda de tensão nos terminais da rede, com um pico de mínimo de 2 Volts abaixo da nominal. Já em comparação com as harmônicas geradas, o THD de tensão se manteve igual aos outros métodos com 2,8% e apenas harmônicas de 5ª ordem, enquanto as de corrente foram 6%, 4,9% e 7,7% respectivamente nas fases A, B e C. Apresentou componentes de 5ª ordem de 4,7%, 3,6% e 5,1% e de 3ª ordem 2%, 1,7% e 4,6%, nas fases A, B e C respectivamente. As Figuras 28, 29 e, 30 mostram os espectros de corrente das fases A, B e C para o método de partida com carga. Como não houveram alterações significativas não foi necessário apresentar o método com partida a vazio, devido a sua similaridade. A Tabela 11 mostra os valores encontrados das distorções harmônicas na partida.

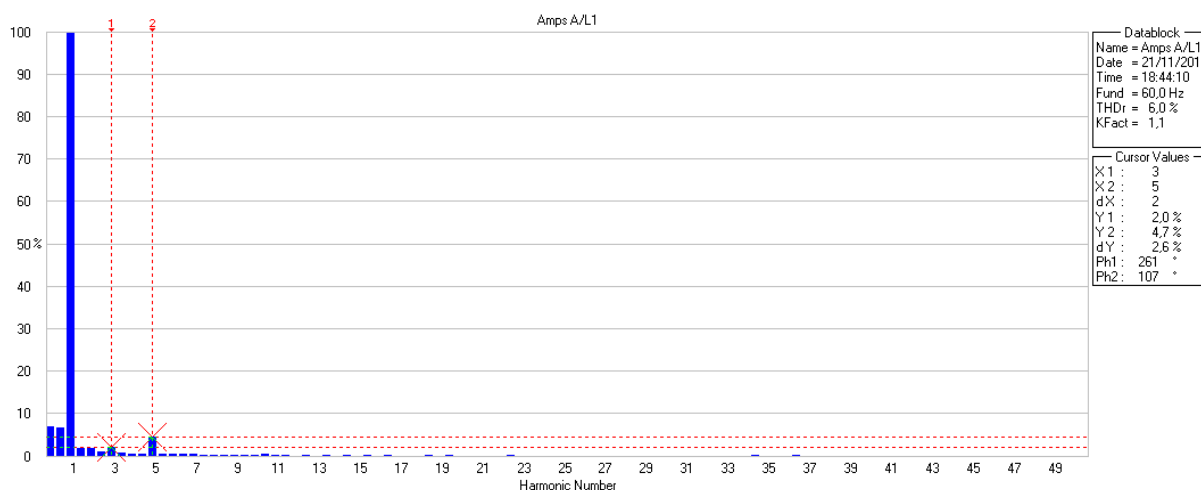


Figura 28: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação partida chave compensadora com carga.

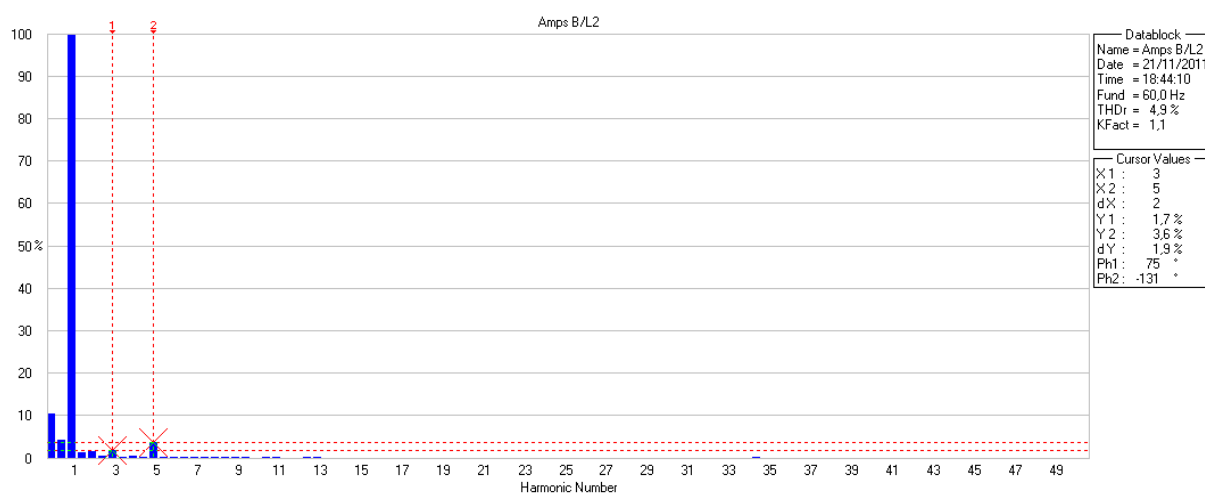


Figura 29: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação partida chave compensadora com carga.

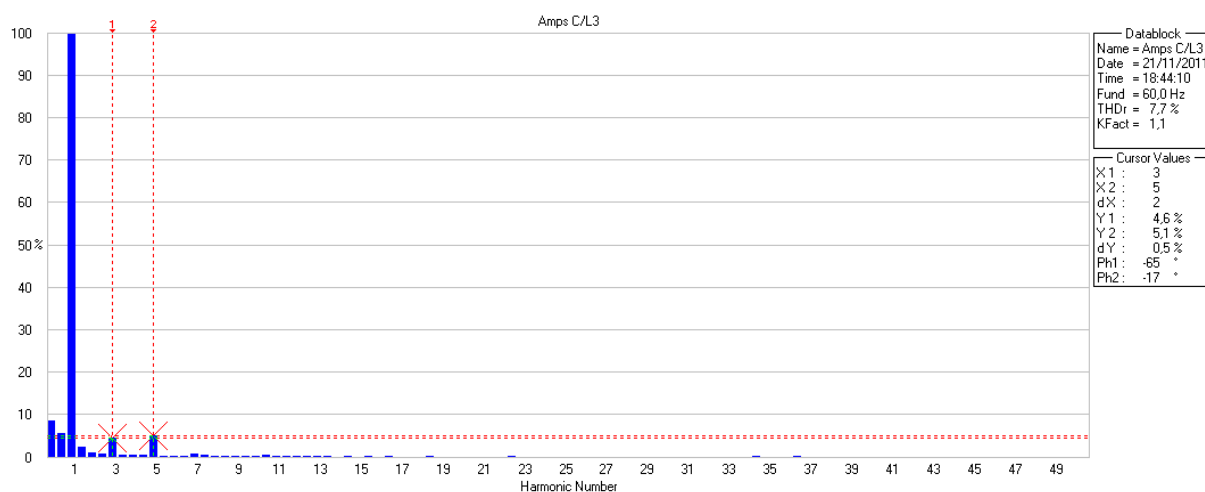


Figura 30: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação partida chave compensadora com carga.

Tabela 11: Distorções Harmônicas de corrente na partida chave compensadora com carga

Compensadora com carga			
Fases	3 ^a	5 ^a	THD
A	2 %	4,7 %	6 %
B	1,7 %	3,6 %	4,9 %
C	4,6 %	5,1 %	7,7 %

3.3.4 Partida com Inversor de Frequência

Partida a Vazio

De acordo com os estudos realizados por (Teixeira)[17], para a situação a vazio, acionou-se a máquina de indução trifásica por meio do inversor de frequência até a velocidades de rotação de 1690rpm, nominal da máquina. Para essa velocidade de rotação foram coletados os espectros harmônicos de tensão e corrente de cada fase. Devido a similaridade do espectro harmônico de tensão das fases, não houve necessidade de apresentar seu gráfico, pois seu índice THD médio permaneceu em 3%, apresentando distorção apenas na 5ª harmônica. A seguir são mostrados os espectros harmônicos de corrente nas Figuras 31, 32 e 33.

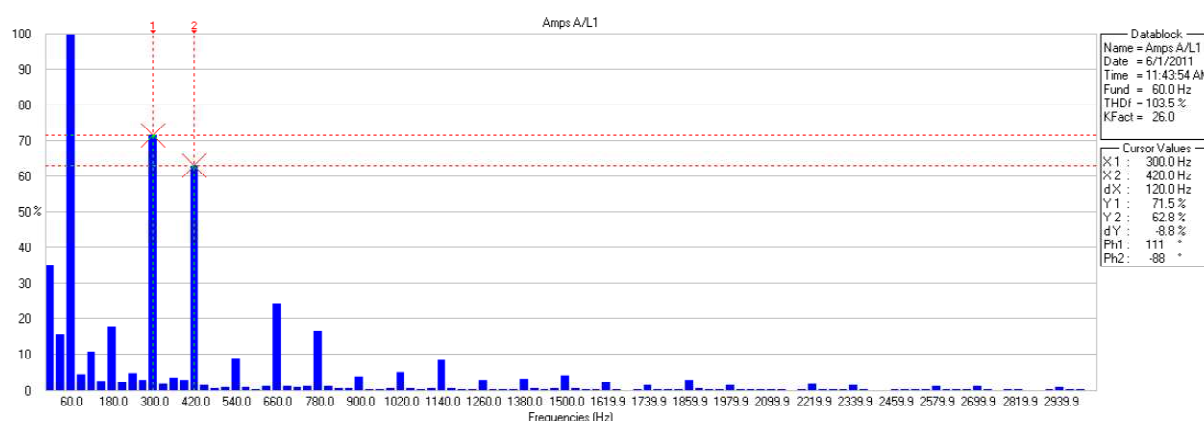


Figura 31: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação a vazio 1690rpm [17].

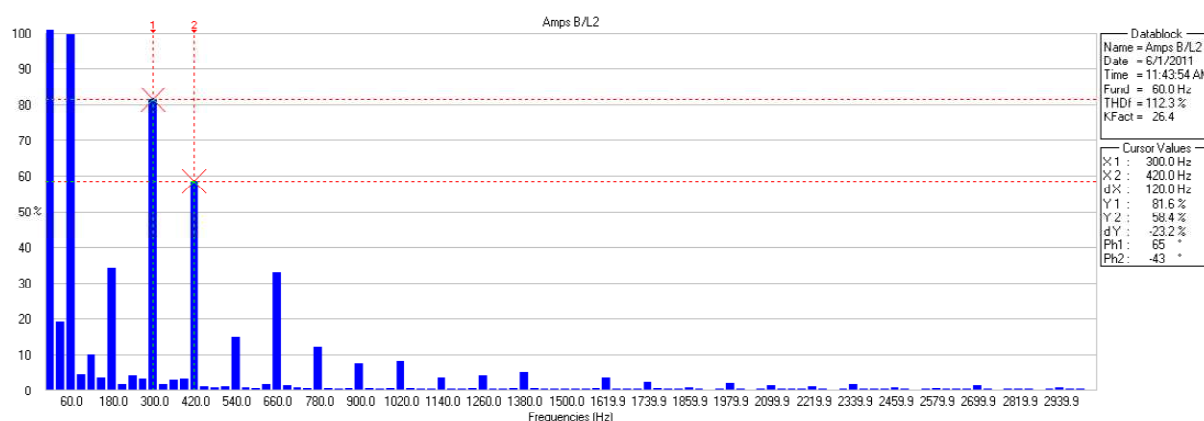


Figura 32: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação a vazio 1690rpm [17].

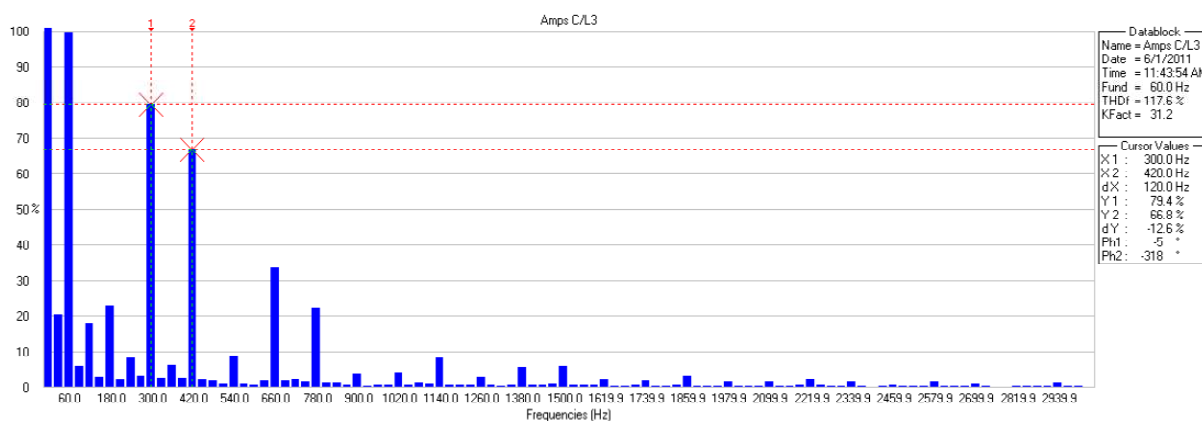


Figura 33: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação a vazio 1690rpm [17].

O sistema (motor + inversor) visto pela fonte como uma carga não linear, introduz na corrente proveniente da rede um elevado nível de harmônicas, que chega a THD's superiores a 115%. O inversor de frequência possui um retificador interno, que de forma geral, produz harmônicas características de ordem $h = np \pm 1$ (p é o número de pulsos do inversor e n 1, 2, 3) no lado CA, ou seja, na rede. Assim, no caso da ponte retificadora de 6 pulsos as harmônicas mais expressivas que são as de 5°, 7°, 11° e 13° ordem [20]. O inversor CFW-11 do fabricante WEG, é um inversor Standart (normal) de 6 pulsos pois em seu hardware existe uma ponte retificadoras de onda completa composta por 6 diodos que está na entrada do inversor, além disso em seu hardware existe um Filtro ou Link DC, destinado para regulação da tensão retificada, que interconecta a ponte retificadora com outra ponte de transistores IGBT que fazem a inversão da tensão contínua proveniente do Link DC num sinal alternado com tensão e frequências variáveis [20], por essa razão o dispositivo contribui significativamente na amplitude das harmônicas na frequência de 300Hz, 420Hz, 660Hz e 780Hz, para comprovar este fato basta observar nos espectros harmônicos de corrente, as harmônicas que mais se destacaram são exatamente nas frequências citadas. Além das harmônicas geradas pela influência do acionamento via inversor de frequência, o motor de indução trifásico, por ser uma carga não linear, também contribui para introdução de harmônicas no sistema, analisando os espectros harmônicos de corrente nas figuras acima, observa-se que além das harmônicas de 5°, 7°, 11° e 13° ordem, a 3ª harmônica também alcançou níveis elevados, portanto o motor de indução tem por característica gerar amplitudes de correntes na frequência de 180Hz. O índice THD da corrente encontrado nas fases A, B e C respectivamente foram de 103,5%, 112,3% e 117,6%, para a harmônica de 5ª ordem foram encontrados respectivamente 71,5%, 81,6% e 79,4% e para a harmônica de 7ª ordem foram encontrados respectivamente 67,8%, 58,4% e 66,8%. Na Figura 34 estão as formas de onda de

tensão e corrente, nota-se que a corrente apresenta uma forma de onda completamente diferente de uma senoide típica, o que reflete em níveis elevados de distorções harmônicas [17]. A Tabela 12 mostra os valores encontrados das distorções harmônicas na partida.

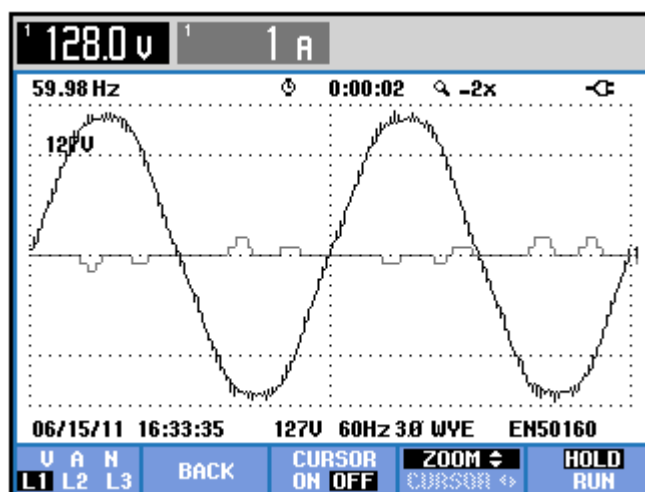


Figura 34: Forma de onda de tensão e corrente situação a vazio 1690rpm [17].

Tabela 12: Distorções Harmônicas de corrente na partida com inversor de frequência sem carga

Inversor de Frequência a vazio.			
Fases	5 ^a	7 ^a	THD
A	71,5 %	67,8 %	103,5 %
B	81,6 %	58,4 %	112,3 %
C	79,4 %	66,8 %	117,6 %

Partida com Carga

Para as situações com carga o motor de indução trifásico acoplado a um dispositivo de carga, foi acionado pelo inversor de frequência na velocidade de 1690rpm e uma carga resistiva trifásica em Y de 900W foi colocada no sistema.

Diferentemente dos espectros harmônicos de tensão, a corrente absorvida da rede pelo sistema inversor, motor e gerador, possui um conteúdo harmônico elevado principalmente nas

harmônicas de 5° e 7° ordem que estão em destaque, além das componentes harmônicas na 3°, 11° e 13° ordem, que são as frequências de 180Hz, 660Hz e 780Hz respectivamente. O fato importante a ser observado nesta situação com carga é nos níveis harmônicos individuais e totais quando compara-se com a situação a vazio. Os níveis harmônicos estão numa faixa de 39,3% a 58,3% para a 5° harmônica na situação com carga, contra níveis entre 70% e 80% para 5° harmônica na situação a vazio, já analisando a 7° harmônica observa-se uma faixa de 24% a 39% no sistema com carga, contra 58,4% a 67,8% sistema operando a vazio. Fazendo essa mesma comparação para a harmônica de 3° ordem tem-se valores máximos de 36% sistema operando sem carga, contra 24% sistema com carga, na 11° ordem valores de 36% a vazio contra 10% com carga e na 13° níveis de harmônicos na situação a vazio de 25% contra 6,8% sistema operando com carga. Consequentemente os THD's nas situações com carga e a vazio estão numa faixa de 52,6% a 75,5% contra 103,5% a 117,6% respectivamente. Observando esses dados fica claro que ao adicionar carga os níveis harmônicos diminuíram este fato ocorre em razão do sistema operar com uma maior eficiência, pois o fator de potência do sistema elétrico se eleva ao adicionar carga.

Os espectros harmônicos de tensão possuem baixos níveis de distorções harmônicas como nos outros casos apresentados. A Figura 35 mostra o espectro harmônico de tensão e as Figuras 36, 37 e 38 mostram os espectros harmônicos de corrente coletados.

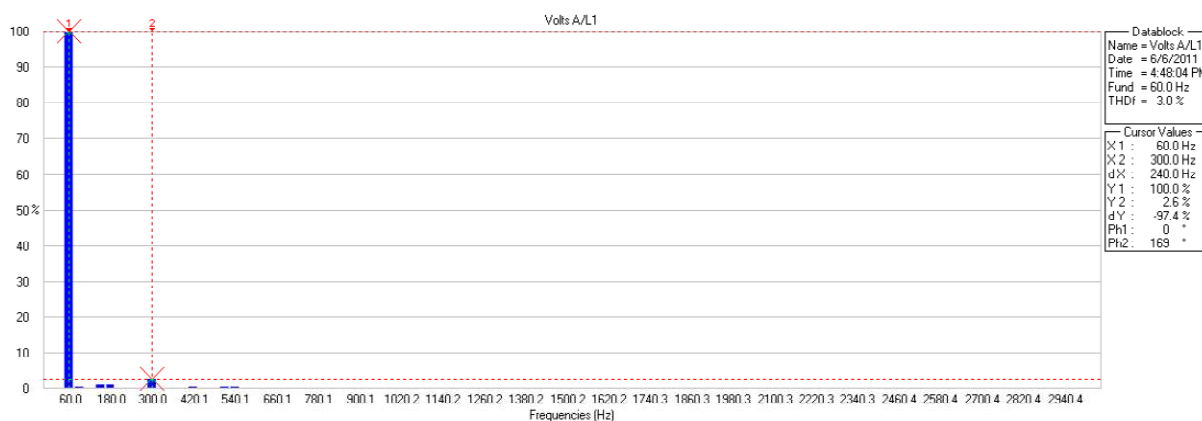


Figura 35: Espectro Harmônico de Tensão Fase A situação com carga 1690rpm [17].

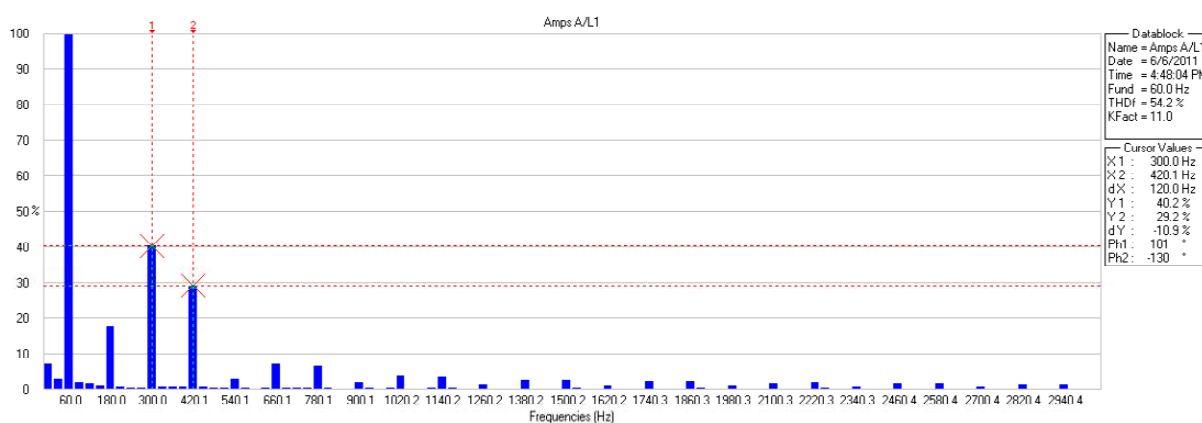


Figura 36: Espectro Harmônico de Corrente Fase A situação com carga 1690rpm [17].

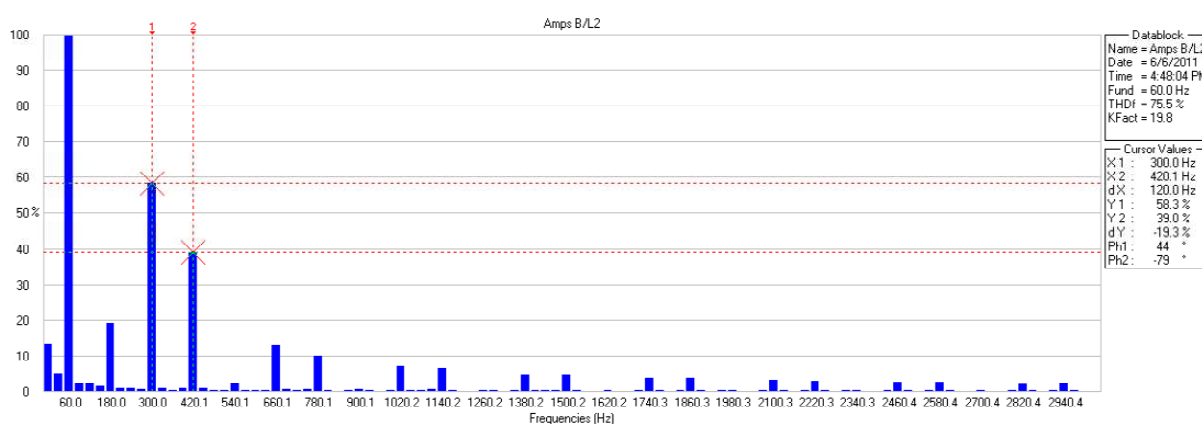


Figura 37: Espectro Harmônico de Corrente Fase B situação com carga 1690rpm [17].

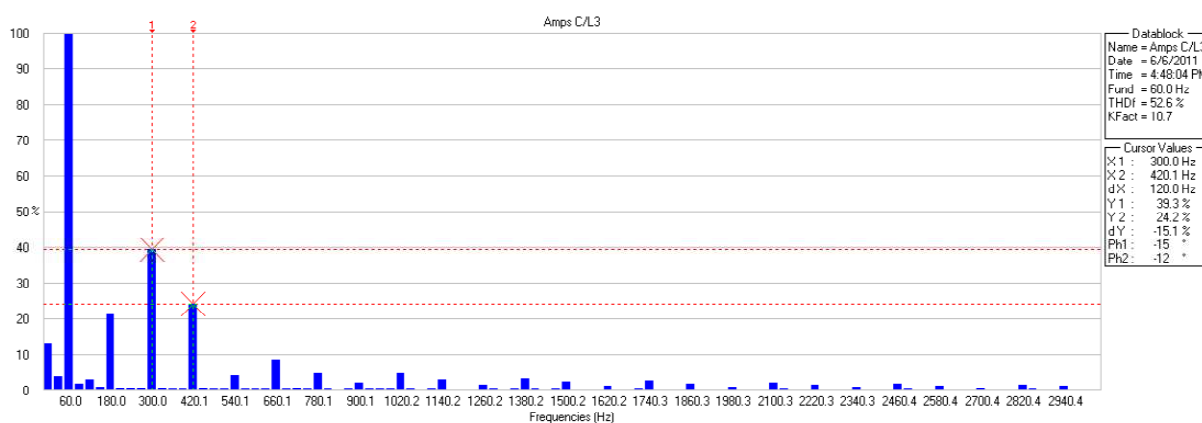


Figura 38: Espectro Harmônico de Corrente Fase C situação com carga 1690rpm [17].

A Figura 39 abaixo mostra o gráfico com as formas de onda de tensão e corrente fornecidas pela fonte ao sistema. A forma de onda de corrente está deformada devido as elevadas componentes harmônicas presentes nos espectros, reduzindo assim a qualidade de energia do sistema. As Tabelas 13 e 14 mostram os valores encontrados nos gráficos dos espectros de corrente.

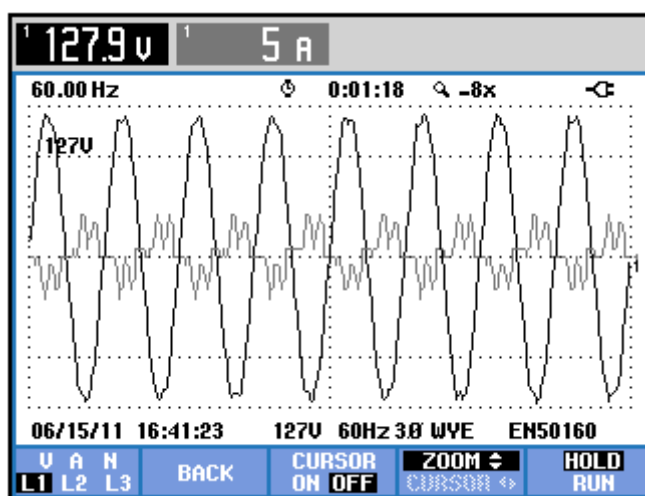


Figura 39: Forma de onda de tensão e corrente situação com carga 1690RPM [17].

Tabela 13: Distorções Harmônicas de corrente na partida com inversor de frequência com carga

Inversor de Frequência com carga			
Fases	5 ^a	7 ^a	THD
A	40,2 %	29,2 %	54,2 %
B	58,3 %	39,0 %	75,5 %
C	39,3 %	24,2 %	52,6 %

Tabela 14: Coparação do método de partida direta, com e sem carga.

Inversor de Frequência com carga				Inversor de Frequência sem carga			
Fases	5 ^a	7 ^a	THD	Fases	5 ^a	7 ^a	THD
A	40,2 %	29,2 %	54,2 %	A	71,5 %	67,8 %	103,5 %
B	58,3 %	39,0 %	75,5 %	B	81,6 %	58,4 %	112,3 %
C	39,3 %	24,2 %	52,6 %	C	79,4 %	66,8 %	117,6 %

4 Conclusões

O presente trabalho apresentou resultados envolvendo quatro tipos de acionamentos de um motor de indução trifásico, através de partida direta, chave compensadora, estrela-triângulo e via inversor de frequência. O ponto de uso comum, a rede elétrica, possui níveis harmônicos baixos pois o seu espectro de tensão possui um THD de 1,5%, portanto a rede não fornece ao sistema níveis preocupantes de distorções harmônicas [17]. Ao analisar os espectros de tensão do sistema elétrico constituído de rede trifásica, para os métodos de partida não existe uma interferência deste nos níveis harmônicos de tensão, pois através da análise dos espectros, observou-se que o THD máximo obtido foi abaixo do recomendado pela IEEE 1531-2003 que no ponto de uso comum o THD dos espectros de tensão esteja abaixo de 5%.

Já nas formas de onda de corrente o sistema inversor mais motor de indução gera ordens harmônicas variadas como 5°, 7°, 11° e 13°, além das ordens harmônicas serem variadas seus níveis são elevados, basta analisar os espectros harmônicos de corrente quando acionou o motor a vazio via inversor, o THD do sistema chegou a um nível de 120% em uma das fases e comparando essa mesma situação com situação de partida direta do motor obteve-se um THD de 7% e quando o motor foi acionado com carga elétrica acoplada os valores de THD atingiram valores máximos de 80% no acionamento com inversor contra 5% na partida direta. Portando analisando esses resultados fica comprovado a influência do acionamento de um motor de indução via inversor de frequência na geração de harmônicas pra rede elétrica, além disso é importante destacar a diferença nos níveis harmônicos entre as situações com e sem carga, vendo os resultados é fácil perceber a diferença e esta se da em razão do sistema a vazio operar com um baixo fator de potência implicando em uma menor eficiência do sistema o que reflete em níveis mais elevados de THD quando compara-se com as situações com carga.

Os métodos de partida estudados, excluindo o inversor de frequência, apresentaram THD's inferiores aos limites recomendados pela IEEE 1531-2003, com isso para acionamento de apenas um motor não haverá a necessidade de métodos de mitigação. Como o motor estudado é de baixa potencia e a rede trifásica pode ser considerada como um barramento infinito, as variações de tensão não são significativas. Contudo, sabemos que na indústria encontramos dezenas de motores, com os mais variados métodos de partida, e em alguns casos o acionamento destes é feito ao mesmo tempo. Uma sugestão para futuros trabalhos é efetuar simulações e/ou medições em campo para analisar o efeito da partida de diversos motores simultaneamente.

Através deste trabalho foi comprovado a capacidade que um inversor de frequência tem de distorcer e introduzir componentes harmônicas nas formas de onda de corrente. Isso mostra o quanto é importante realizar pesquisas e projetos que tenham o objetivo de buscar técnicas de atenuar esses problemas.

Engenheiros, cada vez mais, estão preocupados com a qualidade de energia e pesquisas nessa área, este trabalho de Monografia é um primeiro passo para pesquisas que envolvem o controle de qualidade da energia no acionamento de máquinas elétricas. A elaboração de novos ensaios em laboratório, a análise de seus impactos na qualidade de energia, a aplicação de filtros sintonizáveis em sistema elétrico e a busca por novas técnicas de atenuar os eventuais distúrbios são propostas para trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas

- [01] Bortoni, E. C.; SANTOS, A. H. M. Capítulo 11- Acionamento com controles de indução trifásicos. In: Conservação de Energia. Itajubá, 2006. p. 397-438.
- [02] WEG., Catálogo de motores elétricos. Jaraguá do Sul; 2006. Módulo I, Comando e Proteção, WEG Industrias S.A. Disponível em: <<http://www.weg.com.br>>. Acessado em: 08/11/2011.
- [03] CAPELLI, A. Automação Industrial: Controle do Movimento e Processos Contínuos. 1 ed. São Paulo: Érica, 2006. 236 p.
- [04] MOURA, D. L. Proposta de Substituição de Motor de Indução Monofásico por Motor de Indução Trifásico no Meio Rural. 2009. Dissertação (Mestrado em engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2009.
- [05] SEM, P.C. – Principles of Electric Machines and Power Systems. 2ª edição. Editora John Wiley and Sons, Kingston / Ontario, Canada 1997.
- [06] A.E.FITZGERALD, CHARLES KINGSLEY, JR. – MÁQUINAS ELÉTRICAS. 6ª EDIÇÃO. EDITORA BOOKMAN
- [07] Mamede Filho, João – Instalações Elétricas Industriais, 7ª Edição, Editora: LTC.
- [08] Campos, J. C. C. Estratégias de Conservação e Qualidade de Energia Aplicadas na Indústria. (2001). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2001.
- [09] Brito, Claudio M. C. de; Leão, Ruth P. S.; Antunes, Fernando L. M.. “Avaliação da proteção do acionamento de um motor de Indução e de métodos para melhoria de sua suportabilidade sob afundamentos de tensão.” Disponível em: http://www.dee.ufc.br/~rleao/Artigos/AvaliacaodaProtecaoDoAcionamentodeumMotordeInducaodeMetodosparaMelhoriadesuaSuportabilidadesobAfundamentosdeTensao_Sobraep2005.pdf Acesso em 01/09/2011.
- [10] Lamoree, J.; Mueller, D.; Vinett, P.; Jones, W.; Samotyj, M.. 1994
- [11] DUGAN, R. C.; MCGRABAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality. 2 ed. McGraw-Hill. Professional Engineering.
- [12] Lamoree, J., Mueller, D., Vinett, P., Jones, W., & Samotyj, M. (1994). Voltage sag analysis case studies. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 1083 - 1089.
- [13] DE LA ROSA, F. C. Harmonics And Power Systems. 1 ed. Hazelwood: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. 190 p.
- [14] MAHAMAD, N.; HADZER, C. M.; MASRI, S. Application of LC filter in harmonics reduction. In: Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National, 2004, pp. 268-271.

- [15] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 1159-1995, p. i, 1995.
- [16] Velasco , Loana Nunes. Análise Experimental de Erros de Medição de Energia Elétrica Ativa em Medidores Eletromagnéticos tipo Indução, Sujeitos a Distorções Harmônicas de Correntes e Tensões, em Sistemas Equilibrados e Desequilibrados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2007.
- [17] Teixeira, Alexandre Gomes Cardoso. Estudo de distorções harmônicas no acionamento de máquinas elétricas Dissertação de graduação, Universidade Federal de Viçosa, 2011
- [18] Brito, Claudio Marzo Cavalcanti de. “Modelagem computacional de métodos de partida de um motor de indução trifásico no simulink/matlab”. II CONNEPI 2007
- [19] Brito, Claudio M. C. de; Leão, Ruth P. S. “Desempenho de um Motor de Indução Trifásico submetido a distorções harmônicas na tensão de alimentação”. Disponível em: http://www.dee.ufc.br/~rleao/Artigos/DesempenhodeumMotordeInducaoTrifasicoSubmetidoaDistorcoesHarmonicassnaTensaodeAlimentacao_SBSE2006.pdf. Acesso em 01/09/2011.
- [20] Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. Guia Técnico WEG.