

**ANÁLISE DOS EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO E DA
DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO NO
CONJUGADO E NO RENDIMENTO DE UM MOTOR
DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

ANA BÁRBARA FERNANDES NEVES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Publicação: ENE/PPGEE

Brasília - DF, Outubro de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DOS EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO E
DA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO NO
CONJUGADO E NO RENDIMENTO DE UM MIT**

ANA BÁRBARA FERNANDES NEVES

ORIENTADOR: ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM – 579 / 2014

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO – 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE DOS EFEITOS DO DESEQUILIBRIO E DA DISTORÇÃO
HARMÔNICA DE TENSÃO NO CONJUGADO E NO RENDIMENTO
DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

ANA BÁRBARA FERNANDES NEVES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.


APROVADA POR:



ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA, Dr., UFU
(EXAMINADOR INTERNO)



MARCUS VINICIUS BORGES MENDONÇA, Dr., UFTM
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 10 de outubro de 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

NEVES, ANA BÁRBARA FERNANDES

Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um MIT [Distrito Federal] 2014.

xx, 153 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia).

Departamento de Engenharia Elétrica.

1.Desequilíbrio de Tensão

2.Distorção Harmônica de Tensão

3.Conjugado

4.Rendimento

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NEVES, A. B. F. (2014). Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um MIT. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM – 579/2014, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ana Bárbara Fernandes Neves.

TÍTULO: Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um MIT.

GRAU: Mestre

ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ana Bárbara Fernandes Neves

anabarbarafn@gmail.com

Brasília – DF - Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais, Irândina e Clailton, ao meu namorado João Pedro e a minha irmã Dáfny.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser companhia em todos os momentos.

À minha família, Clailton, Irândina e Dáfny, pela dedicação em prol da minha formação técnica e pessoal e pelo suporte constante.

Ao meu namorado João Pedro Ferreira Campos, pela incansável ajuda, pelo fiel companheirismo, por me incentivar nos momentos necessários e por compreender as privações que um mestrado exige.

Ao meu orientador Anésio de Leles Ferreira Filho, cuja orientação proporcionou meu desenvolvimento pessoal, pelo tempo dispensado à minha formação intelectual e pela oportunidade em tornar-me mestre.

Ao meu co-orientador Marcus Vinícius Borges Mendonça, pelos ensinamentos, por sua calma e paciência frente aos mais diversos desafios encontrados e pela dedicação a este trabalho.

Ao amigo e professor José Rubens Macedo Júnior, por me despertar o interesse pela área de Qualidade da Energia Elétrica, pelos conselhos sempre sábios e por ser um exemplo de profissional do setor.

Agradeço aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília que não mediram esforços para auxiliar-me.

Aos colegas do ONS, pelo incentivo e apoio na reta final do desenvolvimento dessa dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos em parte do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização desta conquista.

“A distância entre o sonho e a realidade chama-se disciplina.”

Bernardino – Técnico da Seleção Brasileira Masculina de Vôlei

RESUMO

Os Motores de Indução Trifásicos (MIT) são largamente utilizados, sobretudo nas indústrias. Um dos fatores que corrobora para a redução do seu rendimento é a presença de distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) na sua tensão de alimentação, como o desequilíbrio e a distorção harmônica de tensão. Existem diversos estudos que avaliam os efeitos desses fenômenos aplicados individualmente no MIT. Porém, medições reais comprovam que no sistema elétrico é comum a presença concomitante de distúrbios.

Diante deste cenário, surgiu a ideia de desenvolvimento desta dissertação que visa investigar os efeitos no rendimento e no conjugado do MIT, quando este é alimentado por tensões com desequilíbrio e harmônicas simultaneamente. Identifica-se, nesse estudo, por meio de ensaios laboratoriais, a contribuição do desequilíbrio e da distorção harmônica na alteração do conjugado e do rendimento, quando estes distúrbios estão presentes individualmente e concomitantemente na alimentação no motor. Para isso, o trabalho baseia-se na comparação entre as medições obtidas experimentalmente com a aplicação individual e conjunta dos mencionados distúrbios. Este tipo de análise é útil na avaliação da adequação dos limites individuais hoje estabelecidos pelas normas que versam sobre desequilíbrio de tensão e harmônicas, para condições em que estes fenômenos se manifestam simultaneamente na rede elétrica.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica de tensão, motor de indução trifásico.

ABSTRACT

The Three-Phase Induction Motors (TIM) are widely used and one of the factors which confirms the reduction of its performance is the presence of disturbances of power quality (PQ) in its voltage supply, such as unbalance and voltage harmonic distortion . There are several studies evaluating the effects of these phenomena individually applied at the TIM. However, actual measurements show that, currently, the presence of disorders at the same time is usual in the electrical system.

In this scenario, the idea of developing this study emerged, aimed to investigate the effect on TIM's performance and torque, when it is supplied by voltages with unbalance and harmonics simultaneously. Is identified, in this study, through laboratory tests, the contribution of unbalance and harmonic distortion in changing the torque and performance, when these disorders are individually or concomitant present in the motor supply. For this, the work is based on the comparison between measurements obtained experimentally with the application of individual or joint disorders. This type of analysis is useful in evaluating the adequacy of the individual limits stated today by the rules that deal with voltage unbalance and harmonics, for conditions in which these phenomena manifest themselves simultaneously in the grid.

Index terms: Power quality, voltage unbalance, harmonic distortion, three-phase induction motor.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 – JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.3 – CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	3
1.4 – ORGANIZAÇÃO NA DISSERTAÇÃO.....	3
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
2.2 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	13
2.2.1 – CONCEITUAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	14
2.2.2 – CAUSAS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	14
2.2.3 – EFEITOS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	15
2.2.4 – MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO	15
2.2.4.1 – Método das componentes simétricas	15
2.2.4.2 – Método CIGRÉ.....	17
2.2.4.3 – Método NEMA	18
2.2.5 – NORMAS RELACIONADAS A DESEQUILÍBRIO	18
2.2.5.1 – IEC 61000-4-30	18
2.2.5.2 – Prodist – ANEEL.....	18
2.2.5.3 – Procedimentos de Rede - ONS	19
2.2.5.4 – IEEE 1159-2009	19
2.2.5.5 – Nema MG1 2006	19
2.3 – DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	20
2.3.1 – CONCEITUAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO	20
2.3.2 – CAUSAS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO	21
2.3.3 – EFEITOS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO	22

2.3.4 – MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO	23
2.3.5 – NORMAS RELACIONADAS À DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	23
2.3.5.1 – Prodist – ANEEL.....	24
2.3.5.2 – Procedimentos de Rede – ONS.....	25
2.3.5.3 – IEEE 519-1992	27
2.3.5.4 – IEC 1000-3-6.....	29
2.4 – EQUACIONAMENTO E CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT PARA TENSÕES DESEQUILIBRADAS E COM HARMÔNICAS.....	30
2.4.1 – EQUIVALENTE MONOFÁSICO DO MIT SUBMETIDO A DESEQUILÍBRIO	30
2.4.2 – EQUIVALENTE MONOFÁSICO DO MIT SUBMETIDO À DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO	34
2.5 – ESTADO DA ARTE.....	4
2.5.1 – DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	4
2.5.2 – DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO	7
2.5.3 – DESEQUILÍBRIO E DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	9
2.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
3 – PROCEDIMENTOS E MATERIAIS PARA A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.....	37
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	37
3.2 – MONTAGEM DOS ENSAIOS	37
3.3 – GERAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS PARA DESEQUILÍBRIO.....	41
3.3.1 – BD1	42
3.3.2 – BD2.....	42
3.3.3 – BD3.....	44
3.3.4 – BD4.....	45
3.4 – GERAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS PARA HARMÔNICAS.....	45
3.4.1 – BD5.....	45
3.4.2 – BD6.....	45

3.5 – GERAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS PARA DESEQUILÍBRIO E HARMÔNICAS.....	46
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
CAPÍTULO 4 – DESEQUILÍBRIO E DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO APLICADOS INDIVIDUALMENTE	53
4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	53
4.2 – TENSÕES EQUILIBRADAS – BD1.....	54
4.3 – DESEQUILÍBRIO	56
4.3.1 – DESEQUILÍBRIO NA MAGNITUDE DAS TENSÕES – BD2.....	56
4.3.2 – RESULTADOS COM A APLICAÇÃO DO BD3 – DESEQUILÍBRIO DE ÂNGULO.....	61
4.3.3 – DESEQUILÍBRIO NAS MAGNITUDES E NOS ÂNGULOS DAS TENSÕES – BD4.....	62
4.4 – DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO.....	63
4.4.1 – DISTORÇÃO EM UMA ORDEM HARMÔNICA – BD5	64
4.4.2 – RESULTADOS COM A APLICAÇÃO DO BD6 – DISTORÇÃO EM DUAS ORDENS.....	66
4.5 – PRINCIPAIS RESULTADOS	69
4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
CAPÍTULO 5 – DESEQUILÍBRIO E DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO APLICADOS SIMULTANEAMENTE	72
5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	72
5.2 – TENSÃO NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL E V_1 IGUAIS A 220 V	73
5.2.1 – APLICAÇÃO SIMULTÂNEA DO BD2 E BD4 COM O BD5.....	75
5.2.2 – APLICAÇÃO SIMULTÂNEA DO BD2 E BD4 COM O BD6.....	85
5.3 – PRINCIPAIS RESULTADOS	94
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	97
6.1 – PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
APÊNDICE A – BANCOS DE DADOS	104
A.1 – BD1 – CONDIÇÕES EQUILIBRADAS	104

A.2 – BD2 – DESEQUILÍBRIO NA MAGNITUDE DAS TENSÕES	106
A.3 – BD3 – DESEQUILÍBRIO NOS ÂNGULOS DAS TENSÕES	114
A.4 – BD4 – DESEQUILÍBRIO NAS MAGNITUDES E NOS ÂNGULOS	115
A.5 – BD5 – DISTORÇÃO EM UMA ORDEM HARMÔNICA	152
A.6 – BD6 – DISTORÇÃO EM DUAS ORDENS HARMÔNICAS.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais	24
Tabela 2.2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão.....	24
Tabela 2.3 – Limites globais inferiores de tensão em porcentagem da tensão fundamental	26
Tabela 2.4 – Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental	26
Tabela 2.5 – Limites de distorção harmônica de tensão em% da nominal.....	27
Tabela 2.6 – Limites de distorção harmônica de corrente em% de IL	28
Tabela 2.7 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão nominal) para sistemas de potência de baixa e média tensão	29
Tabela 3.1 – Informações dos bancos de dados de desequilíbrio	41
Tabela 3.2 – Limites utilizados para as distorções harmônicas	45
Tabela 3.3 – Condições do BD2 e do BD4 utilizadas na análise conjunta.....	46
Tabela 3.4 – Condições do BD5 utilizadas na análise conjunta	47
Tabela 3.5 – Condições do BD6 utilizadas na análise conjunta	47
Tabela 3.6 – Formação do Banco de Dados combinando BD2, BD4 e BD5	48
Tabela 3.7 – Formação do Banco de Dados combinando BD2, BD4 e BD6	50
Tabela 4.1 – Resultados da aplicação do BD3.....	62
Tabela 4.2 – Resultados do bando de dados BD5	65
Tabela 4.3 – Resultados do bando de dados BD6.....	67
Tabela 4.4 – Tabela síntese dos bancos de dados BD1, BD2, BD3 e BD4.....	69

Tabela 5.1 – Resultados obtidos com tensão equilibrada e perfeitamente senoidal usado como referência	73
Tabela 5.2 – Resultados das condições do BD2 e BD4 utilizadas na análise conjunta	73
Tabela 5.3 – Resultados das condições do BD5 utilizadas na análise simultânea	74
Tabela 5.4 – Resultados das condições do BD6 utilizadas na análise simultânea	74
Tabela 5.5 – Resultados da aplicação dos conjuntos de D à K.....	78
Tabela 5.6 – Variações do conjugado e rendimento para condições desequilibradas, com distorção harmônica e com ambos os fenômenos simultaneamente.	81
Tabela 5.7 – Variações do conjugado e rendimento para condições desequilibradas, com distorção harmônica e com ambos os fenômenos simultaneamente. (continuação).....	82
Tabela 5.8 – Resultados da aplicação dos conjuntos de K a R	88
Tabela 5.9 – Variações do conjugado e rendimento para condições desequilibradas, com distorção harmônica e com ambos os fenômenos simultaneamente	90
Tabela 5.10 – Variações médias e máximas do conjugado e do rendimento para todos os bancos de dados.....	94
Tabela A.1- Condições equilibradas que constituem o BD1	104
Tabela A.2 – Condições com desequilíbrio nas magnitudes que constituem o BD2.....	106
Tabela A.3 - Condições com desequilíbrio nos ângulos que constituem o BD3	114
Tabela A. 4 - Condições com desequilíbrio nas magnitudes e nos ângulos que constituem o BD4.....	115
Tabela A.5 - Condições com apenas uma ordem harmônica que constituem o BD5	152
Tabela A.6 - Condições com duas ordens harmônicas que constituem o BD6	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Onda distorcida decomposta através da série de Fourier.	20
Figura 2.2 – Circuito equivalente monofásico para um motor de indução trifásico.	30
Figura 2.3 – Equivalente monofásico para a sequência positiva.	31
Figura 2.4 – Equivalente monofásico para a sequência negativa.	31
Figura 2.5 – Equivalente monofásico para a sequência zero.	31
Figura 2.7 – Circuito equivalente monofásico do MIT para cada ordem harmônica.	34
Figura 3.1 – Diagrama esquemático do sistema utilizado nos ensaios.	38
Figura 3.2 – Bancada, regulador de tensão e grupo motor-gerador.	40
Figura 3.3 – Grupo motor-gerador e os sensores	40
Figura 3.4 – Computador e <i>Elspec</i>	41
Figura 4.1 – Conjugado e rendimento em função da tensão de sequência positiva para o BD1.	54
Figura 4.2 – Potência de entrada e saída do MIT para o BD1	55
Figura 4.3 – Conjugado e rendimento do MIT para o BD2.	57
Figura 4.4 – Potência de entrada e saída do MIT para o BD2	58
Figura 4.5 – Conjugado e rendimento do MIT para o BD2 em função do FD	59
Figura 4.6 – Conjugado e rendimento do MIT para o BD2 em função da corrente de sequência positiva.	60
Figura 4.7 – Conjugado e rendimento do MIT para o BD2 em função da corrente de sequência negativa.	61
Figura 4.8 – Conjugado em função da sequência positiva para o BD4.	63
Figura 4.9 – Conjugado e rendimento em função da DTT para o BD5.	64

Figura 4.10 – Conjugado e rendimento em função da DTT para o BD6.....	67
Figura 5.1 – Conjugado com a aplicação dos conjuntos A a K.	75
Figura 5.2 – Rendimento com a aplicação dos conjuntos de A a K.....	76
Figura 5.3 – Conjugado em função do FD e DTT para o BD2, BD4 e BD5.....	77
Figura 5.4 – Rendimento em função do FD e DTT para o BD2, BD4 e BD5.....	78
Figura 5.5 – Conjugado em função da DTT com cores para a ordem harmônica e FD = 3,5%.	84
Figura 5.6 – Rendimento em função da DTT com cores para a ordem harmônica e FD = 3,5%.	84
Figura 5.7 – Conjugado com a aplicação do BD2, BD4 e BD6 individual e simultaneamente.	85
Figura 5.8 – Rendimento com a aplicação do BD2, BD4 e BD6 individual e simultaneamente.	86
Figura 5.9 – Conjugado em função do FD e DTT para o BD2, BD4 e BD5.....	87
Figura 5.10 – Rendimento em função do FD e DTT para o BD2, BD4 e BD5.....	87
Figura 5.11 – Conjugado em função do DTT com cores para a ordem harmônica e FD = 3,5%.	93
Figura 5.12 – Rendimento em função do DTT com cores para a ordem harmônica e FD = 3,5%.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Siglas:

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – American National Standards Institute

BD – Banco de Dados

CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Électriques

CVUF – *Complex Voltage Unbalance Factor*

DHT – Distorção harmônica total

FD – Fator de Desequilíbrio

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

LVUR – *Line Voltage Unbalance Rate*

MIT – Motor de indução trifásico

NEMA – National Electrical Manufacturers Association

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

RMS – Root Mean Square (valor eficaz)

TDD – Distorção harmônica total de corrente

Símbolos:

\bar{V}_0, \bar{V}_1 e \bar{V}_2 Fasores das tensões de sequências zero, positiva e negativa, respectivamente [V]

$\overline{V_A}, \overline{V_B}$ e $\overline{V_C}$	Fasores das tensões das fases A, B e C, respectivamente	[V]
$\overline{V_{ab}}, \overline{V_{bc}}$ e $\overline{V_{ca}}$	Fasores das tensões de linha	[V]
\dot{I}_r	Corrente do rotor	[A]
\dot{I}_s	Corrente do estator	[A]
P_1	Potência de saída de sequência positiva	[W]
P_2	Potência de saída de sequência negativa	[W]
P_{in}	Potência de entrada	[W]
P_{out}	Potência de saída	[W]
P_{RL}	Perdas rotacionais	[W]
T_1	Conjugado de sequência positiva	[N.m]
T_2	Conjugado de sequência negativa	[N.m]
V_{ef}	Tensão eficaz	[V]
I_{DC}	Componente contínua da corrente	[A]
I_{ef}	Corrente eficaz	[A]
I_f	Módulo da corrente na frequência fundamental	[A]
V_0, V_1 e V_2	Valores eficazes das tensões de sequências zero, positiva e negativa, respectivamente	[V]
V_A, V_B e V_C	Valores eficazes das tensões das fases A, B e C, respectivamente	[V]
V_{cc}	Componente contínua da tensão	[V]
V_M	Média dos módulos das tensões de linha	[V]
V_N	Tensão nominal	[V]
V_{ab}, V_{bc} e V_{ca}	Valores eficazes das tensões de linha	[V]
V_f	Módulo da tensão na frequência fundamental	[V]
$\Delta\eta$	Faixa de variação do rendimento	[%]
$\Delta\eta_{Conj.}$	Diferença entre o rendimento da condição equilibrada e a com os dois distúrbios simultaneamente	[%]
$\Delta\eta_{Des.}$	Diferença entre o rendimento da condição equilibrada e a somente com desequilíbrio	[%]

$\Delta\eta_{\text{Harm.}}$	Diferença entre o rendimento da condição equilibrada e a somente com harmônicas	[%]
$\Delta\eta_{\text{máxima}}$	Variação máxima entre o valor da condição equilibrada e o menor rendimento encontrado	[%]
$\Delta\eta_{\text{média}}$	Variação entre o valor da condição equilibrada e a média dos rendimentos	[%]
ΔT	Faixa de variação do conjugado	[N.m]
$\Delta T_{\text{Conj.}}$	Diferença entre o conjugado da condição equilibrada e a com os dois distúrbios simultaneamente	[N.m]
$\Delta T_{\text{Des.}}$	Diferença entre o conjugado da condição equilibrada e a somente com desequilíbrio	[N.m]
ΔT_{Harm}	Diferença entre o conjugado da condição equilibrada e a somente com harmônicas	[N.m]
$\Delta T_{\text{máxima}}$	Variação máxima entre o valor da condição equilibrada e o menor conjugado encontrado	[N.m]
$\Delta T_{\text{média}}$	Variação entre o valor da condição equilibrada e a média dos conjugados	[N.m]
a	Operador rotacional, cujo módulo é um e o ângulo é 120°	[V]
cv	Cavalo Vapor	
h	Ordem harmônica	
I	Corrente elétrica	[A]
η	Rendimento	[%]
η_{max}	Rendimento máximo	[%]
η_{min}	Rendimento mínimo	[%]
P	Potência elétrica ativa	[W]
Q	Potência elétrica reativa	[Var]
R_m	Resistência de perdas no núcleo	[Ω]
R_r	Resistência de dispersão do rotor	[Ω]
R_s	Resistência de dispersão do estator	[Ω]
S	Potência elétrica aparente	[VA]
s	Escorregamento	[%]

T	Conjugado	[N.m]
T_{210}	Conjugado para tensões na fundamental de 210 V	[N.m]
T_{220}	Conjugado para tensões na fundamental de 220 V	[N.m]
T_{230}	Conjugado para tensões na fundamental de 230 V	[N.m]
T_{\max}	Conjugado máximo	[N.m]
T_{\min}	Conjugado mínimo	[N.m]
V	Intensidade da tensão elétrica	[V]
V_N	Tensão nominal	[V]
X_m	Reatância de magnetização	[Ω]
X_r	Reatância de dispersão do rotor	[Ω]
X_s	Reatância de dispersão do estator	[Ω]
Ω	Frequência angular	rpm
ω_0	Frequência fundamental	[rad/s]
Θ	Ângulo de defasagem entre os fasores de tensão ou corrente	[$^\circ$]
$i(t)$	Corrente em função do tempo	[A]
$v(t)$	Tensão em função do tempo	[V]

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Considerações Iniciais

Atualmente, o setor elétrico tem vivido momentos preocupantes haja vista o baixo nível de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Devido ao regime desfavorável de chuvas e às altas temperaturas no primeiro trimestre do ano que levaram a recordes de demanda de energia neste ano de 2014, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) tem despachado quase a totalidade das térmicas disponíveis, até mesmo aquelas com Custo Variável Unitário (CVU) elevado, para preservar os níveis dos reservatórios (ONS, 2014). Com isso, as distribuidoras de energia passaram a comprar energia por um valor elevado e a repassar ao consumidor pelo valor estimado na tarifa, não podendo fazer correções antes do momento da revisão tarifária. Já as geradoras, com a redução da quantidade de água, não conseguem gerar o montante que elas venderam nos leilões. Dessa forma, elas tiveram que recorrer à compra de energia no mercado de curto prazo, por um preço elevado, para honrar seus contratos. Logo, os geradores e os distribuidores repassarão esses custos aos consumidores, maiores que o esperado, por meio de reajustes na tarifa. A elevação do preço do MWh caracteriza-se como um motivador para os consumidores buscarem um consumo consciente e equipamentos mais eficientes, que realizem o mesmo trabalho demandando menor potência.

Do total da energia fornecida pelas concessionárias, cerca de 44% é consumida no setor industrial. Neste setor, mais de 2/3 da demanda está relacionada aos motores (PNE 2030, 2007). Diante destes fatos, a necessidade de pesquisas avaliando o comportamento dos motores no que tange o rendimento e o conjugado dessas máquinas mostra-se importante. Um dos fatores que colabora para a redução dessas grandezas é a presença de distúrbios de qualidade da energia elétrica (QEE) na tensão de alimentação dos motores.

Nas últimas décadas, estudos relacionados à QEE têm despertado grande interesse das concessionárias, dos órgãos reguladores, dos pesquisadores e, em especial, dos consumidores. Estes têm buscado a normatização, a quantificação, a identificação de causas e efeitos, e a redução das consequências dos distúrbios. Sabe-se que a tensão fornecida pela concessionária possui distúrbios de qualidade que a distancia do padrão ideal para um sistema. Dentre estes,

pode-se ressaltar as distorções harmônicas, as variações de tensão de curta duração, a variação do fator de potência, as variações de tensão de longa duração, os desequilíbrios de tensão, as flutuações de tensão e as variações da frequência. Estes fenômenos podem causar alterações no comportamento dos equipamentos ligados à rede, podendo acarretar efeitos mínimos ou significativos (Beaty, Santoro, Dugan e McGranaghan, 2002). Por estas razões, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou o manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2012) que conceitua e fornece alguns limites para tais fenômenos.

1.2 – Justificativas e objetivos da dissertação

A literatura atinente é rica em trabalhos que abordam o efeito destes distúrbios aplicados individualmente no desempenho do Motor de Indução Trifásico (MIT). Adicionalmente, medições em campo comprovam que tensões idealmente senoidais e equilibradas não constituem condições práticas presentes atualmente no sistema elétrico, em função de sua própria dinâmica (Jesus, 2007). Diante deste cenário, estudos que abordem o rendimento e o conjugado do MIT, quando este é alimentado por tensões com distúrbios de qualidade aplicados simultaneamente, mostram-se atuais e necessários.

(Abreu, 2000) e (Duarte, 2010) exploram os efeitos na temperatura e a redução da vida útil do MIT alimentado por tensões desequilibradas e com distorções harmônicas simultaneamente. Porém, não há na literatura estudos que avaliem outras grandezas do motor nessas condições. Com isso, esta dissertação tem o propósito de apresentar um estudo que compreende a análise do conjugado e do rendimento quando há uma alimentação com dois fenômenos aplicados concomitantemente.

Com esse propósito, os objetivos específicos desta dissertação são:

- Identificar os efeitos no conjugado e no rendimento do MIT quando este é alimentado por tensões desequilibradas;
- Identificar os efeitos no conjugado e no rendimento do MIT quando este é alimentado por tensões com distorção harmônica;

- Aferir os efeitos causados no desempenho do MIT pelo desequilíbrio de tensão e distorção harmônica aplicados simultaneamente;
- Avaliar a eficiência dos indicadores FD e DTT para relacionar a condição de tensão a que o motor está submetido com os efeitos causados no conjugado e no rendimento, quando há nos sinais de alimentação da máquina somente desequilíbrio, ou apenas harmônicas, ou os dois fenômenos simultaneamente.

1.3 – Contribuições da dissertação

Como principais contribuições pode-se destacar:

- Estudo detalhado do conjugado e do rendimento do motor de indução trifásico quando alimentado por tensões com desequilíbrio ou com distorção harmônica;
- Identificação, com base na aplicação experimental de 144 condições de tensão, da contribuição do desequilíbrio e da distorção harmônica na redução do conjugado e do rendimento, quando estes distúrbios estão presentes simultaneamente na alimentação no motor.

1.4 – Organização na dissertação

Com o intuito de atender aos objetivos supracitados, esta dissertação é composta, além deste capítulo introdutório, pelos capítulos e o apêndice descritos a seguir:

O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica contendo a conceituação dos fenômenos estudados, as normas que envolvem o tema, os circuitos equivalentes do MIT para desequilíbrio e distorção harmônica, e os equacionamentos para o conjugado e o rendimento. Adicionalmente, expõe-se o estado da arte com o resumo dos trabalhos mais relevantes sobre o assunto da dissertação.

O Capítulo 3 apresenta a estrutura laboratorial utilizada nos ensaios experimentais e a metodologia empregada para a constituição dos bancos de dados empregados nas análises do trabalho.

O Capítulo 4 mostra análises considerando os efeitos oriundos da aplicação do desequilíbrio e da distorção harmônica, individualmente. Os valores indicados são usados nas comparações do Capítulo 5, quando há a presença dos dois fenômenos simultaneamente.

O Capítulo 5 expõe os valores de conjugado e rendimento quando o motor é submetido a uma alimentação desequilibrada e com harmônicas, este capítulo apresenta uma comparação entre os resultados obtidos com a aplicação de todos os bancos de dados explicados no Capítulo 3.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas com os resultados apresentados e analisados nos Capítulos 4 e 5. Encontra-se também uma lista de sugestões para trabalhos futuros envolvendo esse tema.

No Apêndice A são expostas as tabelas com todas as condições que compõem cada banco de dados.

1.5 – Estado da arte

Diversos estudos, que serão apresentados nessa seção, expõem investigações sobre os efeitos do desequilíbrio e da distorção harmônica de tensão no motor de indução avaliados separadamente. Porém, medições comprovam a existência de desequilíbrio de tensão e distorção harmônica simultaneamente na rede. Com isso, surge a necessidade da avaliação conjunta desses distúrbios. São conhecidos alguns estudos sobre o comportamento da temperatura e a redução da vida útil quando o motor está submetido aos dois distúrbios. Contudo, pouco se sabe sobre o conjugado e o rendimento do motor nessas condições.

1.5.1 – Desequilíbrio de tensão

Com o objetivo de avaliar os efeitos da alimentação desequilibrada no motor de indução trifásico, (Lee, 1999) analisou resultados de alguns experimentos que foram divididos em três casos: (a) o mesmo fator de desequilíbrio gerado por diferentes combinações de tensões; (b) somente uma tensão desequilibrada e com diferentes defasagens angulares; e (c) a mesma sequência positiva, mas com diferentes sequências negativas. O trabalho ressaltou que o fator *derating* e o aumento de temperatura do MIT (Motor de Indução Trifásico) não podem ser

associados apenas ao fator de desequilíbrio (FD). Deve-se considerar também o valor da sequência positiva da condição desequilibrada que será analisada. Constatou-se que casos onde se têm os maiores valores de sequência positiva apresentam maiores valores de rendimento e menores de fator de potência. Através de experimentos, o autor comprovou que os desequilíbrios gerados por tensões abaixo do valor nominal provocam um aumento mais significativo na temperatura, o que reduz a vida útil do motor. Afirmou que somente o valor do fator de desequilíbrio é insuficiente para as análises, justamente pela quantidade de possibilidades de combinações de tensão que geram o mesmo valor de VUF (*Voltage Unbalance Factor*). Sugere-se que seja utilizada a sequência positiva para completar as análises.

Em (Siddique, 2004), os autores ressaltaram que o desequilíbrio de tensão causa vários efeitos danosos ao motor de indução, tais como: superaquecimento, desgaste do isolamento, desequilíbrio de corrente, aumento do fator *derating*, conjugado pulsante e baixo rendimento. Eles investigaram os efeitos de seis condições de desequilíbrio com o mesmo fator de desequilíbrio gerado por diferentes combinações de tensões desequilibradas. As condições estudadas são: uma fase abaixo da tensão nominal, duas fases abaixo da tensão nominal, três fases abaixo da tensão nominal, uma fase acima da tensão nominal, duas fases acima da tensão nominal e três fases acima da tensão nominal. O trabalho apresentou os resultados da avaliação das perdas no cobre do estator, no cobre do rotor e as perdas totais no cobre de três motores através de simulações no software MATLAB®. Compararam-se três definições diferentes de desequilíbrio: NEMA (LVUR), IEEE (PVUR) e a IEC (VUF). Os autores indicam que a utilização do VUF complementado pela sequência positiva é a situação que representa com maior precisão a condição de desequilíbrio.

O trabalho de (Faiz, 2004) defende que os métodos de quantificação do fator de desequilíbrio de tensão (NEMA e IEC) não são suficientes para expressar o real desequilíbrio que o motor de indução está submetido. Por meio de simulações computacionais, eles demonstram que um valor de VUF está relacionado com inúmeros valores de conjugado e rendimento. Para limitar o erro nas análises, sugere-se a utilização do fator de desequilíbrio complexo (CVUF), pois a quantidade de possíveis valores de conjugado e rendimento que podem ser encontrados para o mesmo valor de CVUF é menor quando comparada com a utilização somente do VUF.

Concluem que as variações de conjugado e rendimento são sensivelmente reduzidas nos casos em que se especifica a componente de sequência positiva para complementar o valor de VUF.

Em (Faiz, 2005), o autor ressalta a importância de se considerar o ângulo para as análises do fator de desequilíbrio. Por meio de simulações computacionais e análise de caso real, mostra-se a dependência entre o ângulo do VUF e o valor das correntes no estator. Estas correntes influenciam diretamente o valor do fator *derating*. Foi proposta a utilização do valor médio das tensões e do CVUF (VUF complexo) para determinar o fator *derating* de um motor de indução alimentado por tensões desequilibradas. Sugere-se que a alteração da potência fornecida pelo motor seja efetuada considerando-se o fator *derating*. Com essa consideração, a operação do motor fica mais segura e o rendimento aumentará quando o MIT estiver submetido a desequilíbrio.

As análises de (Lee, 1999), (Siddique, 2004), (Faiz, 2004) e (Faiz, 2005) deixam claro que a utilização apenas do VUF para analisar a condição de desequilíbrio é insuficiente. De uma forma geral, para as análises que envolvam o conjugado e o rendimento, sugere-se que se especifique a componente de sequência positiva para complementar o valor de VUF.

Em (Mirabbasi, 2009), afirma-se que o desequilíbrio de tensão pode resultar em problemas como perdas excessivas, oscilações mecânicas e interferências em sistemas de controle. O estudo investiga os efeitos do desequilíbrio no desempenho do motor em termos das correntes de linha, do fator de potência e do rendimento. Os autores justificam a importância do trabalho ressaltando que atualmente não se encontram motores sendo alimentados por tensão em perfeitas condições de balanceamento. Além disso, eles alegam que os motores de indução são muito utilizados em áreas industriais e residenciais, logo, efeitos danosos no motor causam um importante impacto econômico. São apresentadas simulações com o motor operando em situação considerada normal, alimentado por tensões equilibradas e puramente senoidais, com o intuito de tê-las como referência nas comparações com as condições onde a alimentação apresenta desequilíbrio. Para o primeiro caso de desequilíbrio foi aplicado 80% e 85% da tensão nominal para a magnitude de duas fases. Para o segundo caso, uma redução de 10% no ângulo de duas fases gerou o desequilíbrio. No terceiro caso, o desequilíbrio foi de 90% da tensão nominal para a magnitude e redução de 10% no ângulo, ambos aplicados em

duas fases. No primeiro caso houve um aumento no *ripple* de conjugado e redução no conjugado médio. No segundo caso essas alterações foram mais significativas quando comparado com a situação normal. O terceiro caso apresentou um aumento ainda maior no *ripple* de conjugado e uma redução maior no conjugado médio. Para um bom desempenho do motor, o *ripple* de conjugado não é aceitável. Por esta razão, é importante detectar e reduzir o desequilíbrio de tensão.

O trabalho de (Kini, 2010) analisa o desempenho de um sistema motor-bomba quando submetido a desequilíbrio de tensão. São avaliadas três situações que representam pontos diferentes de operação, desequilíbrio e carga diferentes. Os autores estudam o rendimento do motor e da bomba, separadamente, e do sistema todo. Observam-se que o rendimento da bomba influencia mais no valor do rendimento total. Eles constatam que o rendimento do motor diminui com a redução do valor do escorregamento. Além disso, ressalta-se que alterações na carga levam a variações no desempenho do MIT. Concluem-se que a elaboração de uma estratégia de gestão de energia não deve ser baseada apenas em pontos arbitrários de operação, mas em resultados de estudos experimentais que considerem as variações de carga e os efeitos do desequilíbrio de tensão.

1.5.2 – Distorção harmônica de tensão

O artigo (Lee, 1999) investiga o efeito das harmônicas de ordens 2 a 13 no desempenho do motor de indução. Os autores defendem que o MIT será afetado por distorções harmônicas antes que o restante do sistema sofra. Comenta-se a respeito do escorregamento quando o motor está alimentado por uma tensão com distorções harmônicas. Seu valor corresponde a soma do escorregamento devido a componente fundamental com os gerados por cada ordem harmônica. São realizados testes experimentais com trinta e sete formas de onda diferentes alimentando o motor, as quais possuem distorções harmônicas geradas por harmônicas de ordens 2 a 13 que resultam em uma distorção total de 5%, 10% e 15%. Eles assumem que o aumento do DTT reduz o fator de potência do motor e que as menores ordens harmônicas são as que mais influenciam nesta redução. Com relação ao rendimento, as menores ordens harmônicas ocasionam um menor rendimento do motor e quanto maior o DTT, menor será o rendimento. As harmônicas relacionadas à sequência negativa provocam um conjugado no

sentido contrário. Isto leva a vibrações no eixo, aquecimento e acréscimo nas perdas. Além disso, é proposta uma nova forma de calcular o fator *derating*. Sugere-se que, se o transformador não conseguir isolar completamente a sequência zero, esta deve ser considerada. Constatam que as menores ordens harmônicas têm mais impacto, especialmente as de ordem inferior a cinco.

Em (Brito, 2006), são avaliados os esforços eletromecânicos de um motor de indução trifásico operando com carga nominal e alimentado por uma tensão com distorções harmônicas. Ressalta-se que um motor de indução alimentado por uma tensão distorcida pode apresentar sobreaquecimento, perda de eficiência, queda do fator de potência verdadeiro e vibrações mecânicas. Os autores relatam que as correntes de sequência positiva no rotor com o campo magnético do estator produzem um torque positivo que leva ao incremento da velocidade e redução do escorregamento. Já as harmônicas de sequência negativa tendem a gerar um conjugado contrário ao produzido pela sequência original, e conseqüentemente, ocorre uma redução na velocidade da máquina e um aumento no escorregamento. Os autores ainda defendem que as variações do escorregamento são pequenas para provocar um aumento na corrente fundamental do MIT. Logo, a maior parte da elevação da corrente de alimentação está em função da elevação das componentes harmônicas de corrente. Esta elevação da corrente de alimentação afeta o fator de potência verdadeiro do motor. Eles sugerem que a medição do fator de potência verdadeiro permite o conhecimento da real influência das harmônicas. As simulações foram feitas no MATLAB considerando o motor em regime permanente, tensões distorcidas em até 20%, harmônicas de sequência positiva e negativa até a 13ª ordem e carga nominal. Com relação ao conjugado, cita-se que os conjugados pulsantes tendem a aumentar as oscilações e provocam oscilações na máquina para harmônicas de baixa ordem. As oscilações no conjugado assumem valores consideráveis para uma distorção de 20% e uma harmônica de 2ª ordem. O escorregamento sofre maior variação para as harmônicas de ordem 2, 4 e 5. O FPD (fator de potência de deslocamento) é o cosseno do ângulo de defasagem da tensão e corrente na frequência fundamental, ou seja, é o cosseno do ângulo da impedância do MIT na frequência fundamental. Alterações no escorregamento modificam o ângulo da impedância. Porém, as simulações mostram que as variações do FPD são mínimas, praticamente desprezíveis. Assim, a medição do FPD pode criar uma “ilusão” em relação à verdadeira condição que o motor está submetido. Os autores concluem que a

medição do fator de potência de deslocamento é falha para motores de indução submetidos a distorções de tensão, além de afirmarem que, com exceção da harmônica de 2ª ordem, até DTT igual a 10% não há uma queda considerável no rendimento do MIT. É mostrado ainda que o comportamento do motor de indução somente é alterado por distorções harmônicas, geradas por harmônicas de ordem igual ou superior a 4, quando a DTT for superior a 10%.

O trabalho de (Brito, 2006) afirma que, com exceção da harmônica de 2ª ordem, até DTT igual a 10% não há uma queda considerável no rendimento do MIT. Essa avaliação foi feita considerando que o único distúrbio cujo motor está submetido é a distorção harmônica de tensão. É necessário investigar se essa afirmação é verdadeira para a situação onde, além de distorção harmônica, o motor esteja submetido a desequilíbrio.

1.5.3 – Desequilíbrio e distorção harmônica de tensão

Em (Abreu, 2000), encontram-se resultados de um estudo sobre os efeitos do desequilíbrio de tensão e harmônicas no envelhecimento térmico do isolamento do motor de indução. Os autores provam que o tamanho e características construtivas do motor afetam a curva *derating* para desequilíbrio e distorção harmônica, sendo que não existe uma curva *derating* universal para motores. Os estudos analisaram três casos de distorção harmônica total: 3%, 6% e 10%. Quando as harmônicas foram aplicadas simultaneamente ao desequilíbrio, a situação ficou mais severa. Com 1% de desequilíbrio o motor perderia 1,1 anos. Com as harmônicas simultaneamente passa-se a perder 2,6 anos. Com 2% de desequilíbrio tem-se de 2,9 para 6,3 anos. É feita uma análise da redução da vida útil com 2% de desequilíbrio e várias porcentagens de quinta harmônica.

Como os distúrbios ocorrem simultaneamente na rede, a proposta de (Abreu, 2000) traz contribuições muito significativas com relação à análise conjunta de distúrbios em um motor de indução, porém, ele estuda apenas casos bem particulares de combinações de desequilíbrio e harmônicas. Além disso, avalia com mais propriedade apenas a quinta harmônica.

O artigo (Jesus, 2007) apresenta resultados do monitoramento da operação de motores de indução trifásico sob condições fortemente distorcidas e desequilibradas. O autor salienta que tensões idealmente senoidais e equilibradas não se constituem condições práticas atualmente

no sistema elétrico em função de sua própria dinâmica. Foram feitas medições em um motor de 125 CV e em outro de 200 CV. Os resultados apresentaram excessivas distorções harmônicas das tensões e correntes, violando o limite de 6% adotado pelo trabalho. Percebe-se que, dentre as componentes individuais, a harmônica de 5ª ordem é a mais significativa e, além disso, em vários momentos do monitoramento, o motor operava com baixo carregamento. As componentes de sequência zero das tensões não apresentaram valores significativos. Baseado em algumas simulações, o autor afirma que o desequilíbrio das correntes é fortemente influenciado pela diferença angular. Por fim, conclui que em alguns momentos o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica ocorrem simultaneamente, e que seus efeitos devem ser sobrepostos.

O trabalho de (Jesus, 2007) comprova, através de medições, que o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica podem ocorrer simultaneamente. Porém, não foram estudados os efeitos que esses distúrbios provocam no desempenho do motor de indução. (Jesus, 2007) fez o monitoramento em motores que não apresentavam um carregamento constante. (Kini, 2010) comprova que alterações no carregamento levam a variações no desempenho do motor. Isso ressalta a importância de se definir um carregamento para realizar os testes experimentais quando se deseja avaliar as alterações de rendimento provocadas pelo desequilíbrio e distorção harmônica.

Em (Silva, 2010), o objetivo é comparar o comportamento dos motores de indução da linha padrão com os de alto rendimento, quando ambos estão alimentados com tensões não senoidais (com conteúdo harmônico) ou desequilibradas (desequilíbrio nos valores de magnitude das tensões). A comparação é feita analisando resultados obtidos em simulações no MATLAB. Estas simulações são baseadas na modelagem do circuito equivalente do motor de indução trifásico no domínio da frequência. Para as tensões com conteúdo harmônico, consideram-se apenas as sequências positiva e negativa, pois o usual é ligar o motor em configuração delta ou estrela não aterrada que impede a circulação da sequência zero (componente que circula somente pelo neutro). As harmônicas de sequência positiva produzem campos magnéticos que giram no mesmo sentido do campo criado pela corrente fundamental. Já a sequência negativa é o contrário. Com isso, há uma tendência do motor em não fornecer um conjugado constante para a carga e passam a existir conjugados pulsantes,

contrários ao principal, que freiam o motor. Isto leva ao aumento da vibração no eixo da máquina, elevação no aquecimento, aumento das perdas, deterioração do isolamento e redução de rendimento e da vida útil do motor. Além disso, esse conjugado contrário ao principal aumenta o tempo de partida do motor por representar resistência à rotação. Foram realizadas três simulações: com alimentação ideal para ser utilizada como referência, com tensões de conteúdo harmônico (DTT% de 5%, 10% e 20%) e com tensões desequilibradas (VUF de 1%, 2% e 5%). O trabalho conclui que uma alimentação com harmônicos ou desequilíbrio afeta a vida útil e o custo de manutenção. Adicionalmente, afirma-se que as harmônicas levam o motor a consumir mais reativos enquanto o desequilíbrio afeta mais significativamente as perdas. Com relação aos tipos de motor, revela-se que ambos sofrem com os distúrbios, porém, o motor de alto rendimento tem seu desempenho menos afetado.

Com relação à (Silva, 2010), os autores não consideraram desequilíbrios gerados pela alteração dos ângulos das fases. Além disso, não deixaram claro qual foi o valor de distorção considerada para cada ordem harmônica que compõe cada condição, apenas revela a distorção total. A análise apresentada considera distorção harmônica e desequilíbrio em situações separadas.

O trabalho (Duarte, 2010) discute a necessidade de monitorar simultaneamente o desequilíbrio e a distorção harmônica. O autor esclarece que desequilíbrio na frequência fundamental e distorção harmônica normalmente acontecem simultaneamente na tensão de suprimento das cargas ligadas à rede. Ele explica que o motor é mais afetado pela componente de sequência negativa de tensão porque na frequência fundamental a impedância de sequência negativa é bem menor que a de sequência positiva. Os testes foram feitos de cinco diferentes formas: (1) desequilíbrio de tensão na frequência fundamental, (2) tensão balanceada na frequência fundamental e distorção harmônica superior a terceira ordem, (3) tensão balanceada na frequência fundamental e distorção harmônica desbalanceada, (4) tensão desbalanceada na frequência fundamental e distorção harmônica balanceada, (5) tensão fundamental e harmônicas desbalanceadas. Aplicou-se um desequilíbrio de 3% e uma distorção harmônica de 5%, 10% e 15%. Foi proposto um novo indicador de qualidade que considera o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica. Esse novo indicador (FU_v) é capaz de refletir os efeitos térmicos causados pela ação do desequilíbrio e da distorção

harmônica no motor de indução trifásico. Essa proposta reduz a quantidade de indicadores de qualidade a serem monitorados e normatizados pela agência reguladora. Conclui que o padrão NEMA utilizado para reduzir a potência do motor quando submetido a distúrbios não é completo, pois não considera estes distúrbios simultaneamente.

(Abreu, 2000) analisou os efeitos relacionados à perda de vida útil devido ao superaquecimento, e já (Duarte, 2010) se ateve apenas ao estudo da temperatura. Um estudo que avalie outros pontos como rendimento, conjugado, fator de potência e escorregamento, considerando várias combinações de desequilíbrio e harmônicas, preencheria uma das lacunas existente com relação à avaliação conjunta destes distúrbios na literatura existente.

Com essa síntese de diversos trabalhos que envolvem o tema desta dissertação é possível identificar as lacunas existentes na literatura. Existem inúmeros trabalhos que estudam o comportamento do motor de indução trifásico submetido isoladamente a desequilíbrio e a distorção harmônica de tensão. No entanto, pouco se sabe sobre os efeitos desses distúrbios quando aplicados simultaneamente. Existem estudos sobre a elevação de temperatura e a redução de vida útil do MIT. Considerando a relevância da eficiência energética, atualmente, é necessário um estudo abordando os efeitos desses distúrbios no rendimento. Além disso, os trabalhos citados avaliam condições bem particulares de desequilíbrio e distorção harmônica. Para chegar a conclusões sobre a relação dos distúrbios com alterações no desempenho do motor é necessário avaliar diversas condições.

Capítulo 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 – Considerações iniciais

Ao longo dos últimos anos, foram publicados vários trabalhos que abordam o efeito do desequilíbrio de tensão e da distorção harmônica no desempenho do motor de indução. Entretanto, quase sempre esses efeitos são tratados isoladamente e pouco se sabe sobre o real significado da presença conjunta desses distúrbios nas redes de energia elétrica.

Esse capítulo tem por objetivo apresentar, de maneira sucinta, os fundamentos físicos e matemáticos relacionados ao desequilíbrio de tensão, as possíveis causas para sua existência e os efeitos que causa no MIT. Também serão expostos os métodos de cálculo, desde o método das componentes simétricas, passando pelo método CIGRÉ, até o método NEMA. Serão citadas as normas que versam sobre o assunto, a saber: IEC 61000-4-30; Prodist – ANEEL; Procedimento de redes – ONS; IEEE 1159-2009 e NEMA MG1 2006.

O presente capítulo, adicionalmente, trata de outro distúrbio, a distorção harmônica de tensão. Apresenta sua conceituação, através de fundamentos físicos e matemáticos também. Além disso, discorre sobre causas para seu acontecimento e os efeitos gerados, bem como os métodos utilizados para quantificar o fenômeno, analisando equações relativas ao DITH% DTT%. Seguindo o padrão do distúrbio anterior, serão apresentadas as normas pertinentes: Prodist – ANEEL; Procedimentos de redes – ONS; IEEE 519-1992 e IEC 1000-3-6

Ademais, serão explicitados os circuitos monofásicos equivalentes do MIT quando da sua submissão a esses fenômenos, além de alguns trabalhos relevantes relacionados aos fenômenos citados, encontrados por meio de um levantamento bibliográfico.

2.2 – Desequilíbrio de tensão

Neste item, são apresentados os conceitos, as causas, os efeitos, os métodos de cálculo e as normas a respeito do desequilíbrio de tensão.

2.2.1 – Conceituação do desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão é um fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição (ANEEL, 2012). Esse padrão é dado por um sistema equilibrado, constituído por tensões iguais em módulo e defasadas entre si de 120° elétricos. Considerando uma sequência de fases ABC, as tensões em um sistema equilibrado podem ser expressas pelas equações (2.1), (2.2) e (2.3).

$$\overline{V}_A = V_A \angle 0^\circ \text{ [V]} \quad (2.1)$$

$$\overline{V}_B = V_B \angle -120^\circ \text{ [V]} \quad (2.2)$$

$$\overline{V}_C = V_C \angle 120^\circ \text{ [V]} \quad (2.3)$$

Onde:

\overline{V}_A , \overline{V}_B e \overline{V}_C são os fasores das tensões;

V_A , V_B e V_C são os módulos das tensões.

Se o sistema for equilibrado, V_A , V_B e V_C possuem o mesmo valor. O desequilíbrio de tensão é representado por valores nas magnitudes ou ângulos de V_A , V_B e V_C distintos dos apresentados em (2.1), (2.2) e (2.3), ou as duas condições simultaneamente.

2.2.2 – Causas do desequilíbrio de tensão

As possíveis causas para o desequilíbrio são (Ferreira, 2008):

- Distribuição irregular das cargas monofásicas entre as fases;
- Impedâncias distintas entre os enrolamentos do transformador;
- Transposição incompleta de linhas de transmissão;
- Falhas em bancos de capacitores, como o rompimento do fusível de uma das fases;
- Motores elétricos trifásicos com impedâncias desequilibradas;
- Desigualdade nas impedâncias das linhas de transmissão;
- Níveis divergentes de distorção harmônica nas fases do sistema elétrico; e
- Fenômenos como interrupções, sub-tensões, sobretensões, afundamentos, etc.

2.2.3 – Efeitos do desequilíbrio de tensão

Os desequilíbrios de tensão podem ocasionar diferentes efeitos aos motores de indução. Algumas possibilidades conhecidas são (Lee, 1999) (Ferreira, 2008):

- Surgimento de correntes de sequência negativa;
- Aumento de perdas no cobre do estator, perdas no cobre do rotor e perdas no ferro que resultam no aumento da temperatura de operação;
- Sobreaquecimento da máquina, o que provoca desgaste do isolamento e, conseqüentemente, redução da vida útil;
- Oscilações de conjugado no MIT;
- Redução no valor do conjugado médio;
- Redução do rendimento;
- Aumento no tempo de partida do motor;
- Aumento no custo com a manutenção do motor.

O aumento das perdas leva à redução do rendimento e ao aumento da temperatura. Com o desequilíbrio, a mesma potência de entrada culmina em um conjugado menor. O sobreaquecimento danifica o isolamento e, reduz a vida útil da máquina. Dessa forma, aumenta-se o custo com a manutenção, o que requer o investimento para a reposição do motor em menor prazo. Portanto, além de danosos para o MIT, esses efeitos causam significativo impacto econômico.

2.2.4 – Métodos de quantificação do desequilíbrio

Para a quantificação do fator de desequilíbrio de tensão, três diferentes métodos são mais usualmente empregados. São eles:

2.2.4.1 – Método das componentes simétricas

O método das componentes simétricas é fundamentado no Teorema de Fortescue, enunciado como:

“Qualquer grupo desequilibrado de n fasores associados, do mesmo tipo, pode ser resolvido em n grupos de fasores equilibrados, denominados componentes simétricas dos fasores originais.”

Utilizando esse artifício, pode-se decompor o sistema trifásico desequilibrado em três sistemas equilibrados (Fortescue, 1918). São eles:

- Sistema trifásico equilibrado com a mesma sequência de fases do sistema original, denominado sistema de sequência positiva ou direta;
- Sistema trifásico equilibrado com a sequência oposta a original, denominado sistema de sequência negativa ou inversa; e
- Sistema trifásico de fasores paralelos, denominado sequência zero.

A equação de Fortescue, (2.4), relaciona as tensões de fase com as de sequência.

$$\begin{bmatrix} \overline{V_A} \\ \overline{V_B} \\ \overline{V_C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V_0} \\ \overline{V_1} \\ \overline{V_2} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Onde:

$\overline{V_0}$, $\overline{V_1}$ e $\overline{V_2}$ são os fasores das tensões de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente; e

a é um operador que corresponde a $1 \angle 120^\circ$.

Tendo as tensões de sequência, pode-se calcular o valor do fator de desequilíbrio pelo método das componentes simétricas utilizando a equação (2.5) (ANEEL, 2012).

$$\text{FD\%} = \frac{V_2}{V_1} 100 \quad (2.5)$$

Onde:

FD é o fator de desequilíbrio de tensão;

V_2 é a magnitude da tensão de sequência negativa (RMS); e

V_1 é a magnitude da tensão de sequência positiva (RMS).

Para esse método, podem ser utilizadas tensões de linha ou de fase, pois não existirão discrepâncias entre os valores encontrados.

Se na equação (2.5) for utilizado módulo e ângulo das tensões, tem-se um fator denominado fator de desequilíbrio complexo, CVUF (*Complex Voltage Unbalance Factor*). O ângulo não é citado nas normas e diretrizes que versam sobre desequilíbrio, porém, ele é abordado em alguns trabalhos (Faiz, 2004) (Faiz,2005). Vários estudos (Lee,1999) (Faiz, 2004) (Faiz,2005) mostram que diversas combinações de tensões levam a um mesmo valor de FD. A determinação do ângulo, ou seja, a utilização do CVUF, reduz a quantidade de possibilidades de combinações que geram o mesmo índice.

Alguns trabalhos (Lee, 1999) (Siddique, 2004) (Faiz, 2004) (Faiz, 2005) afirmam e comprovam que a utilização apenas do FD não reflete com clareza a condição de desequilíbrio. Para complementar as análises, quando se discute conjugado e rendimento, sugere-se a utilização de V_1 .

2.2.4.2 – Método CIGRÉ

Esse método somente pode ser aplicado utilizando-se tensões de linha. O resultado encontrado para esse método, equação (2.6), é próximo ao encontrado empregando-se as componentes simétricas.

$$FD(\%) = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.6)$$

Onde:

β é dado pela equação (2.7).

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (2.7)$$

Onde:

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} são as magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS).

2.2.4.3 – Método NEMA

A norma NEMA MG1 (Nema,1987) define o LVUR (*Line Voltage Unbalance Rate*) como o fator de desequilíbrio de tensão. O valor de LVUR pode ser encontrado por meio da equação (2.8), usando-se aplicando os valores das tensões de linha.

$$\text{LVUR (\%)} = \frac{\Delta V}{V_M} \times 100 \quad (2.8)$$

Onde:

LVUR é o fator de desequilíbrio definido pela norma NEMA

ΔV é o maior desvio das tensões de linha em relação ao valor médio; e

V_M é a média dos módulos das tensões de linha.

2.2.5 – Normas relacionadas a desequilíbrio

Nesta seção, são abordadas as normas mais relevantes a respeito do desequilíbrio de tensão. Essas normas especificam o método utilizado para o cálculo e os limites admissíveis.

2.2.5.1 – IEC 61000-4-30

A norma IEC (IEC, 2008) sugere que, para a medição do desequilíbrio de tensão utilizando equipamentos classe A e classe S, deve ser utilizado o método das componentes simétricas. A norma não expõe limites para o valor máximo admitido.

2.2.5.2 – Prodist – ANEEL

O módulo 8 do Prodist (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) define o método das componentes simétricas para o cálculo do desequilíbrio e, alternativamente, pode-se utilizar o Cigré. O valor de referência proposto para os barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2%.

2.2.5.3 – Procedimentos de Rede - ONS

O Submódulo 2.8 do gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes (ONS, 2011) também sugere o método das componentes simétricas para a quantificação do desequilíbrio. O valor do indicador é assim obtido:

- determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos; e
- o valor do indicador corresponde ao maior entre os sete valores obtidos anteriormente, em base diária.

Para os barramentos da rede básica, adota-se um limite de 2%. Já o limite individual nos pontos de conexão à rede básica é de 1,5%.

Caso as tensões de sequência negativa variem de forma intermitente e repetitiva, será permitido que os limites especificados sejam ultrapassados em até o dobro, desde que a duração cumulativa das tensões de sequência negativa, acima dos limites contínuos estabelecidos, não ultrapasse 5% do período de monitoração.

2.2.5.4 – IEEE 1159-2009

As normas IEEE 141-1993 e IEEE 1159-1995 sugerem o fator obtido pelo método das componentes simétricas. Portanto, desde 2009, de acordo com a norma IEEE 1159-2009, propõe-se a quantificação pelo método das componentes simétricas ou CIGRÉ. A norma (IEEE, 2009) não estabelece limites para o fator de desequilíbrio, mas diz que tipicamente o valor é inferior a 3%.

2.2.5.5 – Nema MG1 2006

A norma (NEMA, 2006) sugere o cálculo do fator de desequilíbrio segundo o método NEMA. Ela não estabelece limites, porém, afirma que a operação dos motores em uma condição de desequilíbrio acima de 5% não é recomendada.

2.3 – Distorção harmônica de tensão

Neste item, são apresentados os conceitos, as causas, os efeitos, o método de cálculo e as normas sobre distorções harmônicas de tensão.

2.3.1 – Conceituação da distorção harmônica de tensão

As distorções harmônicas de tensão são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2012). Uma onda distorcida com harmônicas pode ser decomposta via série de *Fourier* em uma onda puramente senoidal na frequência fundamental, ondas puramente senoidais de diferentes frequências e uma componente contínua. Essas diferentes frequências, quando múltiplas da fundamental, são denominadas ordens harmônicas. A Figura 2.1 mostra a decomposição de uma onda com distorção harmônica.

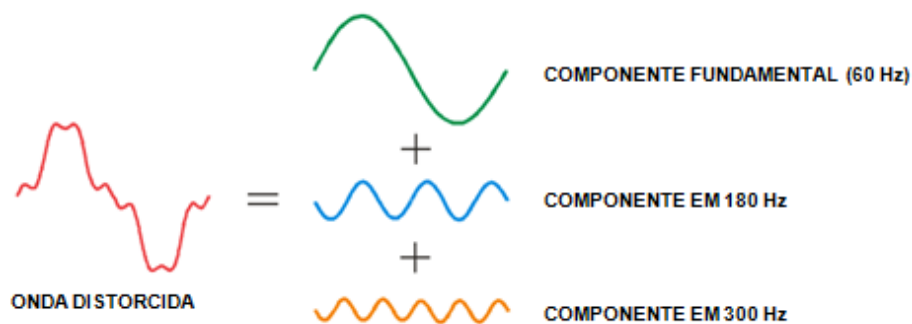


Figura 2.1 – Onda distorcida decomposta através da série de Fourier.

Uma onda decomposta através da série de *Fourier* será expressa matematicamente como mostra a equação (2.9), e a corrente como apresenta a equação (2.10).

$$v(t) = V_{cc} + V_f \sin(\omega_0 t) + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \sin(\omega_0 t + \Phi_h) \quad (2.9)$$

$$i(t) = I_{cc} + I_f \sin(\omega_0 t) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sin(\omega_0 t + \theta_h) \quad (2.10)$$

Onde:

V_{cc} e I_{cc} são as componentes contínuas;

V_f e I_f são os módulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência fundamental;

h é a ordem harmônica;

ω_0 é a frequência fundamental;

V_h e I_h são os módulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência harmônica h ; e

Φ_h e Θ_h são os ângulos da tensão e corrente, respectivamente, na frequência harmônica h .

De posse de várias ondas puramente senoidais e de uma componente DC, resultantes da decomposição, pode-se fazer as análises para cada termo da série separadamente. Essas análises podem ser efetuadas facilmente considerando-se um circuito para cada termo da série, componente DC e senóides. Em seguida, somam-se os efeitos encontrados de acordo com o princípio da superposição de efeitos.

Para um sistema trifásico equilibrado, as harmônicas podem ser divididas em harmônicas de sequência positiva, negativa e zero. Considerando h como a ordem harmônica e n variando de zero a infinito, tem-se:

- $h = 3n+1$, são as harmônicas de sequência positiva;
- $h = 3n+2$, são as harmônicas de sequência negativa; e
- $h = 3n+3$, são as harmônicas de sequência zero.

2.3.2 – Causas da distorção harmônica de tensão

As possíveis causas para a distorção harmônica são (Lee, 1999 b) (Silva, 2010) (Brito, 2006):

- Utilização de cargas não lineares como equipamentos eletrônicos, compensadores estáticos, conversores, fornos a arco, etc.;
- Transformadores e máquinas rotativas durante condições transitórias ou quando operam fora de suas condições normais;
- Corrente de magnetização dos transformadores;

- Reatores saturados para isolar a componente DC quando a carga não requer esta componente;
- Bancos de capacitores para correção de fator de potência, ligados em paralelo no sistema de distribuição; e
- Indutores em série com linhas de transmissão.

A maior causa para as distorções harmônicas é a presença de cargas não lineares, as quais possuem tensão em seus terminais não corresponde ao produto da impedância com a corrente que flui por ela. Ao se aplicar uma tensão puramente senoidal a uma carga não linear, tem-se uma corrente distorcida. Essa corrente propagará pela rede e resultará em várias tensões distorcidas. Assim, mesmo as cargas lineares ligadas à rede passam a possuir tensão com conteúdo harmônico. Indutores e capacitores não produzem harmônicas, porém, eles podem ser elementos que amplificam os níveis harmônicos existentes.

Alguns fenômenos transitórios, como a energização de transformadores, geram harmônicas na rede. Contudo, eles não são considerados no cálculo dos indicadores, os quais não se aplicam a fenômenos transitórios ou de curta duração (ONS, 2011).

2.3.3 – Efeitos da distorção harmônica de tensão

As harmônicas geram diversos efeitos (Abreu, 2001) (Brito e Leão, 2006) que estão diretamente relacionados com a sequência da harmônica, positiva, negativa ou zero. As harmônicas culminam em diversos impactos:

- Tendência em frear o motor reduzindo sua velocidade;
- Aumento do escorregamento;
- Aumento de perdas no cobre e no ferro que resultam no aumento da temperatura de operação;
- Redução do fator de potência, do conjugado e do rendimento; e
- Aumento do tempo de partida do motor.

As harmônicas de sequência zero não contribuem para o conjugado da máquina. No entanto, todas as harmônicas influenciam no aumento da temperatura, lembrando que se o aquecimento for além dos limites admissíveis, ocorrerá à redução da vida útil da máquina.

No entanto, nota-se que harmônicas de sequência positiva aceleram o eixo, enquanto as de sequência negativa freiam. Essa interação leva a uma oscilação de conjugado e a uma tendência do motor em não fornecer um conjugado constante para a carga. Isso aumentará a vibração do eixo podendo causar fadiga. Além disso, ocorre o aumento do ruído audível da máquina, quando comparado com uma alimentação puramente senoidal.

2.3.4 – Métodos de quantificação das distorções harmônicas

Existem duas grandezas que podem ser medidas com relação à distorção harmônica de tensão, a saber: DIT_h% (Distorção harmônica individual de tensão de ordem h) calculada de acordo com a equação (2.11) e DTT% (Distorção harmônica total de tensão) de acordo com a equação (2.12).

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.11)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.12)$$

Onde:

V_h é a tensão harmônica de ordem h;

V_1 é a tensão fundamental medida;

hm_{áx} é a ordem da máxima harmônica considerada.

2.3.5 – Normas relacionadas à distorção harmônica

Nesta seção, são abordadas as normas mais relevantes a respeito da distorção harmônica, as quais têm por objetivo especificar o método utilizado para o cálculo e os limites admissíveis.

2.3.5.1 – Prodist – ANEEL

O Prodist (ANEEL, 2012) considera apenas a distorção harmônica de tensão. Nesse contexto, ele sugere que as medições devem ser feitas por meio das tensões fase-neutro para sistemas com ligação estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações. Também determina que o espectro harmônico a ser considerado deva compreender desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica. A Tabela 2.1 apresenta os limites definidos para valores de referência das distorções harmônicas totais, em porcentagem da tensão fundamental, para diversos níveis de tensão. Além disso, esta norma estabelece limites de distorção harmônica individual de tensão, em porcentagem da tensão fundamental, como exposto na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais
(em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do barramento	Distorção harmônica total de tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 230kV$	3

Tabela 2.2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão
(em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem harmônica	Distorção Harmônica Individual de tensão [%]				
	$V_N \leq 1kV$	$1kV < V_N \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_N \leq 69kV$	$69kV < V_N \leq 230kV$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1

Tabela 2.2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão
(em porcentagem da tensão fundamental) (continuação)

Ordem harmônica		$V_N \leq 1kV$	$1kV < V_N \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_N \leq 69kV$	$69kV < V_N \leq 230kV$
Ímpares não múltiplas de 3	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

2.3.5.2 – Procedimentos de Rede – ONS

O Submódulo 2.8 trata do gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes (ONS, 2011). Ele faz considerações sobre as distorções harmônicas total e individual de tensão. Define que o indicador é assim obtido:

- Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos; e

- O valor do indicador corresponde ao maior entre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

Além disso, é sugerido que sejam consideradas as ordens harmônicas de 2ª a 50ª. Os limites globais para o indicador, em porcentagem da tensão fundamental, estão apresentados na Tabela 2.3, e os limites individuais estão na Tabela 2.4.

Tabela 2.3 – Limites globais inferiores de tensão em porcentagem da tensão fundamental

$V < 69kV$				$V \geq 69kV$			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥ 8	1%			≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
DTT = 6%				DTT = 3%			

Tabela 2.4 – Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental

$13,8kV \leq V < 69kV$				$V \geq 69kV$			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTT = 3%				DTT = 1,5%			

Caso determinadas ordens de tensão harmônica e/ou a distorção harmônica total variem de forma intermitente e repetitiva, os limites especificados podem ser ultrapassados em até o

dobro, desde que a duração cumulativa acima dos limites contínuos estabelecidos não ultrapasse 5% do período de monitoração.

2.3.5.3 – IEEE 519-1992

A norma (IEEE, 1992) atribui à concessionária a responsabilidade de manter a qualidade da tensão em todo o sistema. A Tabela 2.5 expõe os limites definidos para diferentes níveis de tensão.

Tabela 2.5 – Limites de distorção harmônica de tensão em% da nominal

Tensão nominal (V_N)	Distorção Harmônica de Tensão Individual (%)	Distorção Harmônica Total de Tensão – DTT
$V_N \leq 69kV$	3	5
$69kV < V_N \leq 161kV$	1,5	2,5
$V_N > 161kV$	1	1,5

Esses limites são para a operação normal, ou seja, durante condições com duração superior à uma hora. Para períodos menores, durante partidas ou condições não usuais, esses limites podem ser excedidos em 50%.

A norma também faz definições em relação à distorção harmônica de corrente. As unidades consumidoras têm grande diversidade de cargas que injetam diferentes perfis de correntes harmônicas na rede. Portanto, para estabelecer limites para as correntes tem-se que avaliar outros parâmetros. Os limites de corrente estabelecem o valor máximo da tensão harmônica individual em 3% da fundamental e da distorção harmônica total (DTT) em 5%, na mesma base. Entretanto, devido à multiplicidade de correntes harmônicas injetadas pelos vários consumidores (diferentes frequências harmônicas, ângulos de fase e perfil das injeções durante o tempo), os limites para as distorções de corrente são propostos de modo que, a máxima distorção de tensão causada por um único consumidor não exceda os valores da Tabela 2.6, a qual apresenta limites de distorção harmônica de corrente (I_h) e a razão de I_{sc} (máxima corrente de curto-circuito no ponto de acoplamento comum) por I_L (corrente fundamental máxima demandada no ponto avaliado). Esta tabela também limita a DTT (distorção harmônica total de corrente) que é definido na equação (2.13).

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \quad (2.13)$$

Onde:

I_h é o valor eficaz da componente harmônica individual de corrente de ordem h; e

I_L é a corrente na máxima demanda (componente fundamental) no ponto avaliado.

Tabela 2.6 – Limites de distorção harmônica de corrente em% de I_L

$V_N \leq 69kV$						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
$69kV < V_N \leq 161kV$						
< 20*	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50-100	5	2,25	2	1,25	0,35	6
100-1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
$V_N > 161kV$						
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4

* Todo equipamento de geração é limitado a esses valores de distorção de corrente, independente da relação de curto-circuito real I_{sc}/I_L .

2.3.5.4 – IEC 1000-3-6

Essa norma (IEC, 1996) indica que o consumidor deve se responsabilizar em manter os limites de emissão de harmônicos dentro dos limites estabelecidos pela concessionária. Em contra partida, atribui à concessionária a responsabilidade pelo controle global dos níveis de distúrbio sob condições normais de operação. Acrescenta que o consumidor e a concessionária devem cooperar quando necessário na identificação do método ótimo para reduzir as emissões de harmônicos. A Tabela 2.7 apresenta os limites estabelecidos pela norma.

Tabela 2.7 – Níveis de tensões harmônicas (expressos como porcentagem da tensão nominal) para sistemas de potência de baixa e média tensão

Harmônicas ímpares não múltiplas de 3		Harmônicas ímpares múltiplas de 3		Harmônicas pares	
Ordem h	Tensão harmônica (%)	Ordem h	Tensão harmônica (%)	Ordem h	Tensão harmônica (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2 + 1,3x(25/h)				

2.4 – Equacionamento e circuito equivalente do MIT para tensões desequilibradas e distorcidas

O motor de indução trifásico (MIT) pode ser representado por um conjunto de três circuitos equivalentes monofásicos com tensões de entrada iguais a \dot{V}_{an} , \dot{V}_{bn} e \dot{V}_{cn} . A Figura 2.2 exibe o circuito equivalente monofásico para a representação da fase A de um MIT.

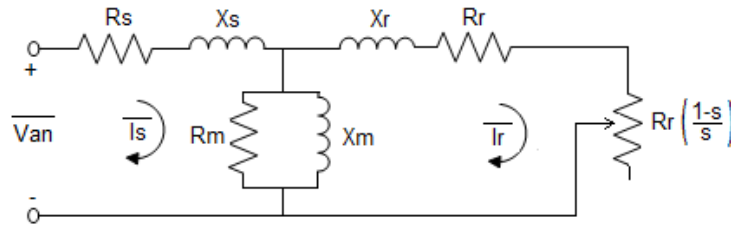


Figura 2.2 – Circuito equivalente monofásico para um motor de indução trifásico.

Na Figura 2.2, R_s e X_s são a resistência e a reatância de dispersão do estator, X_r e R_r são a resistência e a reatância de dispersão do rotor, respectivamente. R_m é a resistência de perdas no núcleo e X_m a reatância de magnetização. $\overline{I_s}$ e $\overline{I_r}$ são as correntes no estator e no rotor, respectivamente, e s é o escorregamento apresentado na equação (2.14). $R_r \left(\frac{1-s}{s} \right)$ é a resistência que representa a carga do circuito.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (2.14)$$

Onde:

ω_s é a velocidade síncrona; e

ω_m é a velocidade no eixo da máquina.

2.4.1 – Equivalente monofásico do MIT submetido a desequilíbrio

Como o desequilíbrio pode ser analisado por meio das componentes simétricas, para a análise do desempenho do MIT submetido a desequilíbrio de tensão, podem ser adotados os circuitos equivalentes adaptados para as componentes de sequência positiva, negativa e zero, exemplificados nas Figura 2.3, Figura 2.4 e Figura 2.5, respectivamente.

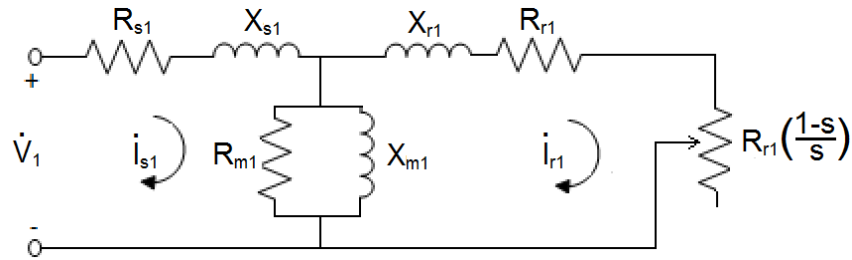


Figura 2.3 – Equivalente monofásico para a sequência positiva.

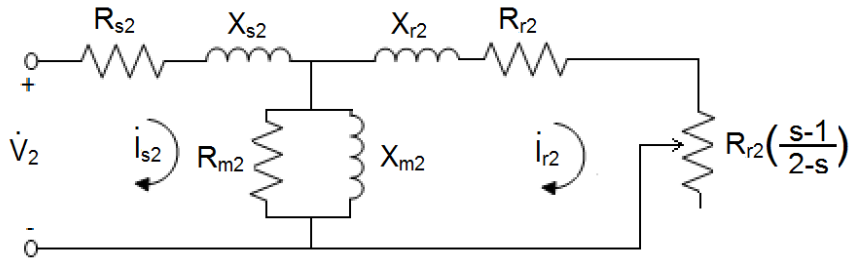


Figura 2.4 – Equivalente monofásico para a sequência negativa.

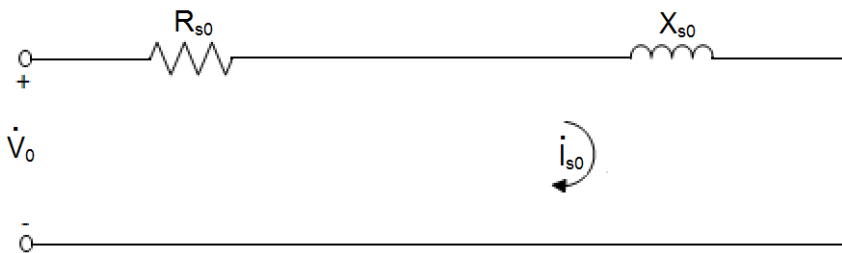


Figura 2.5 – Equivalente monofásico para a sequência zero.

A componente de sequência zero não ultrapassa o entreferro da máquina. Por essa razão, não há corrente de sequência zero no rotor e, conseqüentemente, não se tem potência de saída relacionada a essa componente. Logo, a mencionada componente não aparece no equacionamento do conjugado.

O conjugado em um MIT alimentado por tensões desequilibradas é composto pela soma das parcelas referentes às componentes de seqüências positiva e negativa, expostas nas equações (2.15) e (2.16), respectivamente.

$$T_1 = \frac{3V_1^2 k_1^2 R_{r1}}{s\omega_s} \quad (2.15)$$

$$T_2 = - \frac{3V_2^2 k_2^2 Rr2}{(2-s)w_s} \quad (2.16)$$

Onde:

w_s é a velocidade síncrona; e

k_1 e k_2 são duas constantes dadas pelas equações (2.17) e (2.18), respectivamente.

$$k_1 = \frac{(Rm1//j Xm1)}{\left[\frac{Rr1}{s} + jXr1 + (Rm1//jXm1) \right] [Rs1 + jXs1 + (Rm1//jXm1)] - (Rm1//jXm1)^2} \quad (2.17)$$

$$k_2 = \frac{(Rm2//j Xm2)}{\left[\frac{Rr2}{2-s} + jXr2 + (Rm2//jXm2) \right] [Rs2 + jXs2 + (Rm2//jXm2)] - (Rm2//jXm2)^2} \quad (2.18)$$

Logo, o conjugado total é dado segundo a equação (2.19).

$$T = T_1 + T_2 = \frac{3 Rr1 V_1^2 k_1^2}{s w_s} - \frac{3 V_2^2 k_2^2 Rr2}{(2-s) w_s} \quad (2.19)$$

Nota-se que a parcela do conjugado devido à sequência negativa, apresentada na equação (2.16), está acompanhada de um sinal negativo. A interpretação física para isso é que a presença da tensão de sequência negativa implicará na geração de um conjugado no sentido contrário ao produzido pela sequência positiva, que é no sentido de rotação do rotor. Esse conjugado, de sequência negativa, tenderá a frear a máquina.

Para o cálculo da potência de saída do MIT submetido a desequilíbrios de tensão, é necessário efetuar a soma das parcelas P_1 e P_2 correspondentes às sequências positiva e negativa, equações (2.20) e (2.21), respectivamente, e em seguida, subtrair deste resultado o valor relacionado às perdas rotacionais, que não foi representado no circuito equivalente do MIT. Isso resulta na equação (2.22).

$$P_1 = 3 V_1^2 k_1^2 Rr1 \left[\frac{1-s}{s} \right] \quad (2.20)$$

$$P_2 = 3 V_2^2 k_2^2 Rr2 \left[\frac{s-1}{2-s} \right] \quad (2.21)$$

$$P_{out} = P_1 + P_2 - P_{RL} = 3 V_1^2 k_1^2 Rr1 \left[\frac{1-s}{s} \right] + 3 V_2^2 k_2^2 Rr2 \left[\frac{s-1}{2-s} \right] - P_{RL} \quad (2.22)$$

Onde:

P_{RL} são as perdas rotacionais que correspondem ao atrito e a ventilação.

Para efeitos de cálculo, as perdas rotacionais serão consideradas fixas. A potência de entrada da máquina é calculada segundo a equação (2.23).

$$P_{in} = 3 (V_0 I_0 \cos\theta_0 + V_1 I_1 \cos\theta_1 + V_2 I_2 \cos\theta_2) \quad (2.23)$$

Dessa forma, a equação do rendimento que é dado por definição segundo a expressão (2.24), pode ser reescrita como mostrado na equação (2.25).

$$\eta[\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (2.24)$$

$$\eta[\%] = \frac{3 Rr1 V_1^2 k_1^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) - 3 Rr2 V_2^2 k_2^2 \left(\frac{s-1}{2-s} \right) - P_{RL}}{3 (V_0 I_0 \cos\theta_0 + V_1 I_1 \cos\theta_1 + V_2 I_2 \cos\theta_2)} \quad (2.25)$$

Com base nas formulações apresentadas para os cálculos do conjugado e rendimento do MIT, equações (2.19) e (2.25), nota-se que, quando da submissão do motor a condições desequilibradas, surgem as parcelas relacionadas à sequência negativa e à zero. Para este trabalho motor será ligado em delta, logo, a sequência zero não está presente nas tensões de linha da máquina. Dessa forma, a equação (2.25) ficará da forma mostrada em (2.26).

$$\eta[\%] = \frac{3 Rr1 V_1^2 k_1^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) - 3 Rr2 V_2^2 k_2^2 \left(\frac{s-1}{2-s} \right) - P_{RL}}{3 (V_1 I_1 \cos\theta_1 + V_2 I_2 \cos\theta_2)} \quad (2.26)$$

2.4.2 – Circuito equivalente monofásico do MIT sob tensão distorcida

Considerando a Transformada de Fourier, quando o motor está submetido à distorção harmônica de tensão é como se ele estivesse sendo alimentado por diversas senóides em frequências diferentes. Dessa forma, tem-se um circuito equivalente para cada frequência harmônica e somam-se os efeitos. O circuito equivalente para cada ordem harmônica está apresentado na Figura 2.7.

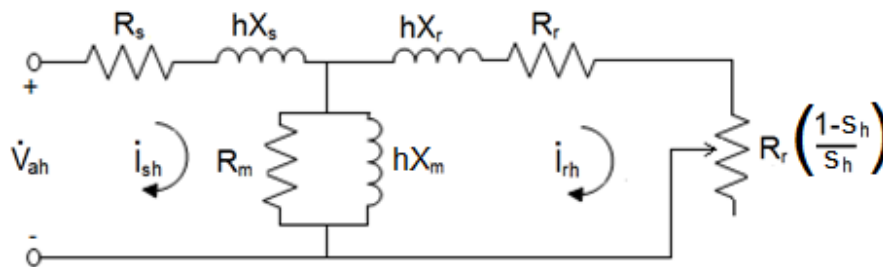


Figura 2.6 – Circuito equivalente monofásico do MIT para cada ordem harmônica.

Na Figura 2.7, h é a ordem harmônica, \dot{I}_{sh} e \dot{I}_{rh} são as correntes harmônicas do estator e do rotor, \dot{V}_{ah} é a tensão harmônica na fase A, e s_h é o escorregamento na frequência da ordem harmônica h apresentado na equação (2.27) (Brito, 2006).

$$s_h = \frac{h \pm (1 - s)}{h} \quad (2.27)$$

Na equação (2.27), o sinal mais (+) é adotado quando h corresponde a uma componente de sequência positiva. Já o sinal menos (-) é empregado para a sequência negativa.

O conjugado T_h correspondente a h -ésima harmônica de corrente é dado pela equação (2.28).

$$T_h = \frac{3I_{rh}^2 R_r}{\pm h s_h \omega_s} \quad (2.28)$$

Assim como na expressão (2.27), na (2.28) considera-se sinal positivo (+) para harmônicas de sequência positiva e menos (-) para a negativa. O conjugado da máquina (T) é calculado por meio da soma do conjugado T_1 , na frequência fundamental, com o encontrado para cada

ordem harmônica envolvida. A potência de saída é exposta na equação (2.29), e a de entrada na equação (2.30).

$$P_{out} = Tw_m \quad (2.29)$$

$$P_{in} = 3V_{ef}I_{ef} \quad (2.30)$$

Onde:

V_{ef} é o valor eficaz da tensão; e

I_{ef} é o valor eficaz da corrente.

Dessa forma, o rendimento é obtido com a equação (2.31).

$$\eta[\%] = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Tw_m}{3V_{ef}I_{ef}} \quad (2.31)$$

2.6 – Considerações finais

Este capítulo contemplou aspectos básicos e relevantes à compreensão do tema central focado nesta dissertação, compreendendo a conceituação, causas, efeitos, métodos para quantificação e normas relacionadas ao desequilíbrio e à distorção harmônica de tensão. Embora se reconheça que os conceitos indicados sejam consolidados na área, julgou-se necessário introduzi-los para maior clareza dos fenômenos tratados. Nesse trabalho será adotado o método das componentes simétricas para a quantificação do desequilíbrio, o qual consiste em representar um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas trifásicos equilibrados, e a tensão de sequência zero não será avaliada por não estar presente nas tensões de linha, já que essas foram consideradas como referência e o motor está ligado em delta.

Para nortear as análises, foram apresentados os circuitos equivalentes monofásicos do motor de indução trifásico quando submetido aos distúrbios avaliados. Além disso, foi exibido um equacionamento obtido com os circuitos.

3 – PROCEDIMENTOS E MATERIAIS PARA A EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

3.1 – Considerações iniciais

Este capítulo aborda os materiais utilizados, como, por exemplo, o computador com o programa desenvolvido no *LabVIEW* para execução dos testes, o motor de indução trifásico, o gerador de corrente contínua e a fonte programável *California Instruments 5001iX*.

Versa também sobre a metodologia empregada para execução dos ensaios no laboratório, onde foram criados seis bancos de dados, sendo eles com tensões desequilibradas e distorcidas. Adicionalmente, indicado como é feita a combinação dos bancos para os dois distúrbios simultaneamente.

É importante ressaltar que as condições de desequilíbrio e harmônicas foram escolhidas de acordo com o que preconiza o PRODIST da ANEEL para o assunto. Considerando as faixas adequada e precária para desequilíbrio; e valores limite para distorções individual e total no caso das harmônicas.

Em suma, este capítulo apresentará a estrutura física montada no laboratório e os métodos adotados para a geração dos bancos de dados.

3.2 – Montagem dos ensaios

Para a execução dos ensaios em laboratório das condições envolvendo desequilíbrio, distorção harmônica e os dois distúrbios simultaneamente, uma mesma estrutura e procedimento para execução foram adotados. O procedimento escolhido para a realização dos ensaios foi adotado de forma a gerar os valores de tensão desejados e lê-los automaticamente. Foram necessários esses procedimentos devido à enorme variedade de condições que se desejava aplicar ao motor em pouco tempo. Para tal, foi criada uma ferramenta para gerar e controlar a tensão de entrada a partir de um banco de dados e gerar relatórios das medições realizadas no experimento montado no Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica da UnB (LQEE). A Figura 3.1 apresenta um diagrama esquemático do sistema utilizado nos testes.

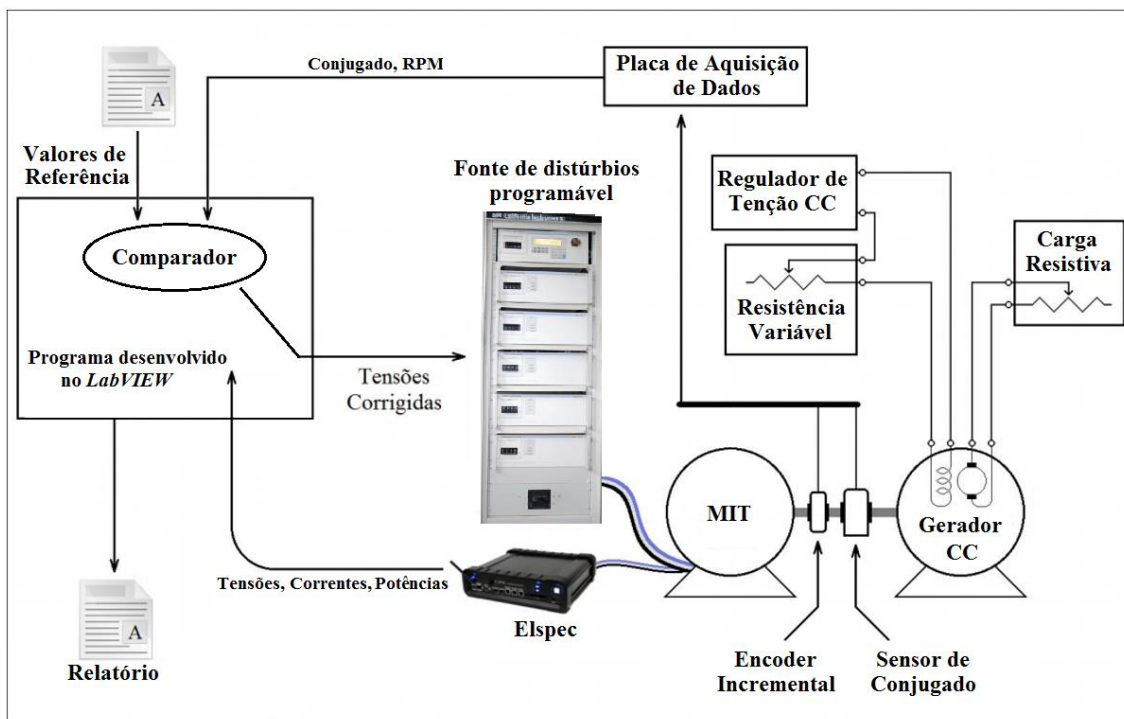


Figura 3.1 – Diagrama esquemático do sistema utilizado nos ensaios

Para uma melhor compreensão da Figura 3.1, a seguir tem-se uma descrição de cada equipamento utilizado:

- Computador com o programa no *LabVIEW*: utilizado para enviar e receber informações da fonte de distúrbios, do *Elspec* e da placa de aquisição de dados. Para cumprir tais funções, foi desenvolvido um sistema de controle em malha fechada, utilizando o software *LabVIEW*, que envia os valores de referência para a fonte, recebe as medições e gera um relatório contendo valores equivalentes as médias das leituras de cada grandeza a cada 3 segundos;
- Motor de Indução Trifásico: equipamento avaliado nesse trabalho. Valores nominais para a conexão em delta: 1,5 kW para potência, 6,8 A para a corrente, 8,1 N.m para o conjugado e 84,1% para o rendimento. O motor foi colocado em local com temperatura ambiente e onde não seria possível ocorrer qualquer interferência na realização dos ensaios;
- Gerador de Corrente Contínua: utilizado como carga linear para o motor. O gerador possui uma potência de 4 kW;

- Fonte programável *California Instruments 5001iX*: utilizada para gerar as tensões estabelecidas nos bancos de dados. A fonte foi colocada em um ambiente climatizado para respeitar a refrigeração necessária ao correto funcionamento e evitar o seu desgaste;
- *Elspec G4500*: equipamento de medição classe A, o qual se utilizou na aquisição de diversas grandezas elétricas. As leituras são feitas pelo sistema de controle por meio do padrão RS-422 e utilizando o protocolo *Modbus*;
- Placa de aquisição de dados NI PCI-6251 da *National Instruments*: responsável por ler os valores dos sensores;
- Sensor de conjugado MKDC-10: empregado para a medição do valor do conjugado;
- *Encoder* incremental série HS35B1024 da *Veeder Root*: empregado para medir a velocidade de rotação do eixo do motor;
- Regulador de tensão: utilizado para impedir alterações na tensão da rede elétrica influenciem o valor determinado para a alimentação da bobina de campo do Gerador de Corrente Contínua, dessa forma, garante-se que o gerador esteja submetido sempre à mesma condição.

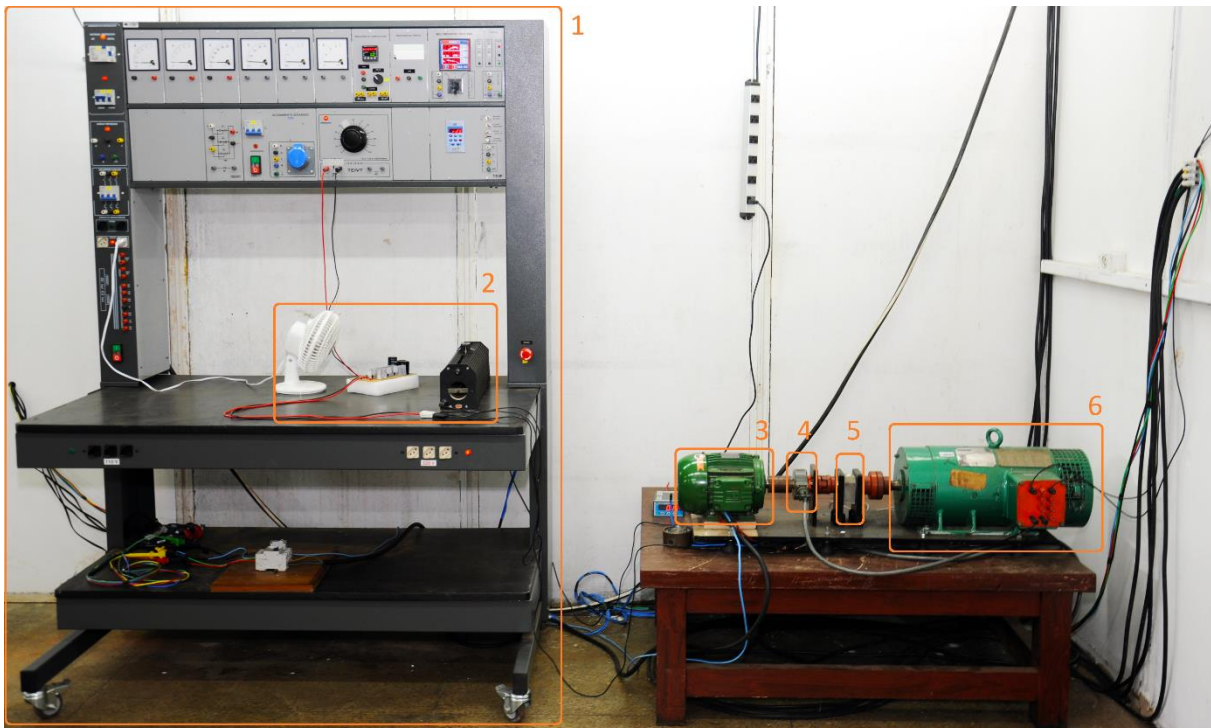


Figura 3.2 – Bancada, regulador de tensão e grupo motor-gerador.

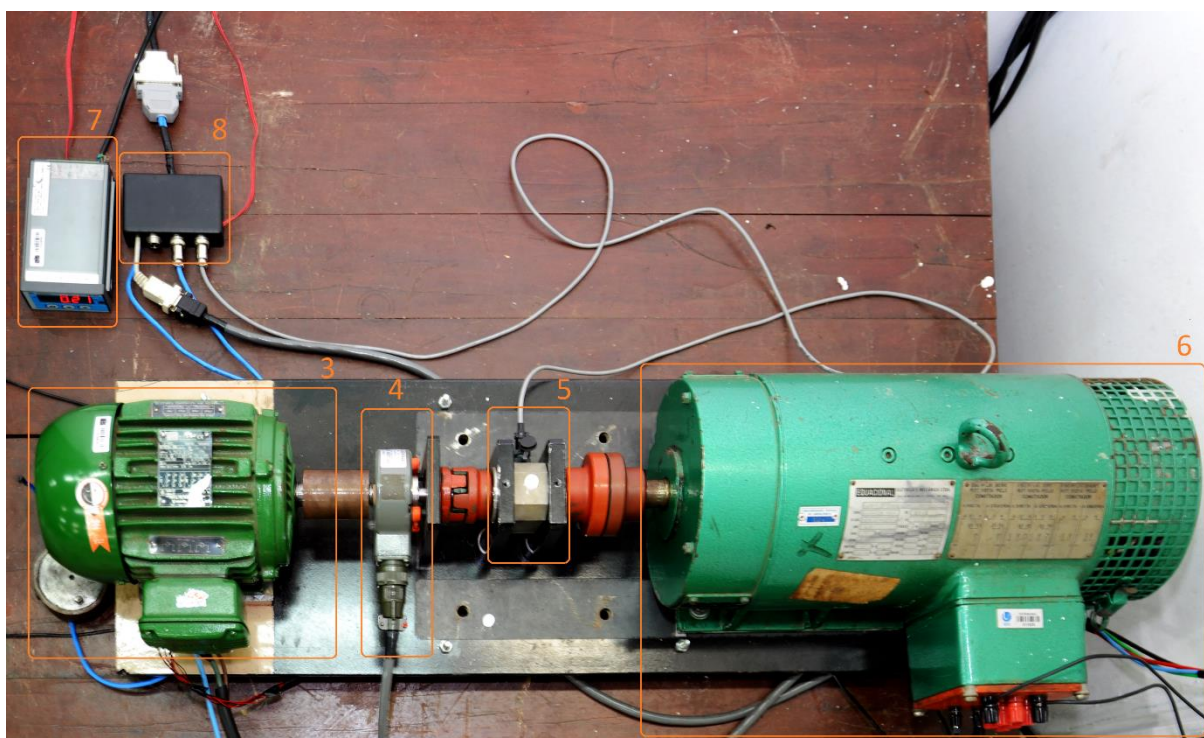


Figura 3.3 – Grupo motor-gerador e os sensores

Na Figura 3.2 é possível identificar: a bancada (1), que gera a tensão contínua utilizada para alimentar a bobina de campo do Gerador CC; o regulador de tensão (2); o MIT (3); o *encoder* (4); o sensor de conjugado (5) e o Gerador de Corrente Contínua (6).

A Figura 3.3 mostra novamente o MIT (3), o *encoder* (4), o sensor de conjugado (5) e o Gerador de Corrente Contínua (6). Adicionalmente, pode-se observar um display utilizado para fornecer tensão CC de 10 V (7) para um dispositivo (8) onde são feitas todas as ligações dos sensores.

A Figura 3.4 mostra o computador (10) para execução do programa, desenvolvido em LabVIEW, utilizado para automatizar a realização dos ensaios. É possível ver também o medidor classe A, *Elspec* (11), e o dispositivo (9) usado para transmitir as informações dos sensores para a placa de aquisição de dados (placa PCI ligada diretamente na placa mãe do computador).



Figura 3.4 – Computador e *Elspec*.

3.3 – Geração dos bancos de dados para desequilíbrio

Para a análise do desequilíbrio, foram utilizados quatro bancos de dados: BD1, BD2, BD3 e BD4, os quais foram construídos levando-se em consideração uma faixa de variação de tensão entre 189 V e 233 V, limite escolhido por ser a faixa de tensão que contempla as consideradas adequadas e precárias quando a nominal é 127/220 V (ANEEL, 2012). As principais características desses bancos estão apresentadas na Tabela 3.1. Todas as condições que compõem os bancos de dados estão expostas em tabelas no Apêndice A.

Tabela 3.1 – Informações dos bancos de dados de desequilíbrio

Banco de dados	Magnitude das tensões de linha	Ângulo
BD1	Módulos iguais e variando de 189 V a 233 V	Mantidos fixos em 0°, -120°, 120°
BD2	Módulos das fases diferentes e variando de 189 V a 233 V	Mantidos fixos em 0°, -120°, 120°
BD3	Módulos iguais e fixos em 220 V	Variando $\pm 5^\circ$
BD4	Módulos das fases diferentes e variando entre 201 V a 231 V	Variando $\pm 5^\circ$

3.3.1 – BD1

O banco de dados BD1 é composto por 44 condições equilibradas, onde se varia apenas a tensão de sequência positiva. Esse banco é feito para ser usado como referência, visto que sua composição envolve somente condições equilibradas. São condições que apresentam o mesmo valor de módulo para as tensões de fase e defasagem de 120° entre elas. A variação ocorre de 189 V a 233 V.

3.3.2 – BD2

O BD2 é formado por 730 condições e considera apenas o desequilíbrio no módulo das tensões de fase. Seu objetivo é avaliar quais são os efeitos causados pelo desequilíbrio das magnitudes das tensões. Os valores do fator de desequilíbrio (FD) foram fixados entre 0,5% e 3,5%. Para cada FD, há variação da tensão de sequência positiva e negativa de forma a manter \overline{V}_A , \overline{V}_B e \overline{V}_C entre 189 V e 233 V. Para definir os valores de \overline{V}_A , \overline{V}_B e \overline{V}_C , utilizou-se um algoritmo no *Matlab*[®] baseado na formulação matemática apresentada a seguir.

Inicialmente, encontram-se as tensões de sequência positiva, negativa e zero por meio da equação de Fortescue (3.1) (Fortescue, 1918).

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_0 \\ \overline{V}_1 \\ \overline{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}_a \\ \overline{V}_b \\ \overline{V}_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Da equação (3.1) pode-se escrever o sistema apresentado em (3.2):

$$\begin{cases} \overline{V}_0 = \frac{1}{3}(\overline{V}_a + \overline{V}_b + \overline{V}_c) \\ \overline{V}_1 = \frac{1}{3}(\overline{V}_a + a\overline{V}_b + a^2\overline{V}_c) \\ \overline{V}_2 = \frac{1}{3}(\overline{V}_a + a^2\overline{V}_b + a\overline{V}_c) \end{cases} \quad (3.2)$$

Como esse banco de dados considera apenas a possibilidade de desequilíbrio de módulo, algumas considerações são feitas: $\overline{V}_a = V_a \angle 0^\circ$, $\overline{V}_b = V_b \angle -120^\circ$, $\overline{V}_c = V_c \angle 120^\circ$, $\overline{V}_0 = V_0 \angle \theta_0$, $\overline{V}_1 = V_1 \angle \theta_1$, $\overline{V}_2 = V_2 \angle \theta_2$.

Portanto, é possível reescrever as equações (3.2) como:

$$\begin{cases} V_0 \cos(\theta_0) + jV_0 \sin(\theta_0) = \frac{1}{3} (V_a + V_b \cos(-120) + j V_b \sin(-120) + V_c \cos(120) + jV_c \sin(120)) \\ V_1 \cos(\theta_1) + j V_1 \sin(\theta_1) = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \\ V_2 \cos(\theta_2) + jV_2 \sin(\theta_2) = \frac{1}{3} (V_a + V_b \cos(120) + j V_b \sin(120) + V_c \cos(-120) + jV_c \sin(-120)) \end{cases} \quad (3.3)$$

Desenvolvendo as equações (3.3) se encontra (3.4).

$$\begin{cases} V_0 \cos(\theta_0) + jV_0 \sin(\theta_0) = \frac{1}{3} (V_a - 0,5 V_b - j0,866 V_b - 0,5 V_c + j0,866V_c) \\ V_1 \cos(\theta_1) + j V_1 \sin(\theta_1) = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \\ V_2 \cos(\theta_2) + jV_2 \sin(\theta_2) = \frac{1}{3} (V_a - 0,5 V_b + j0,866 V_b - 0,5 V_c - j0,866V_c) \end{cases} \quad (3.4)$$

Como a tensão de sequência positiva é considerada referência, o ângulo de V_1 é zero. Dessa forma, a partir da segunda equação do sistema mostrado em (3.4), chega-se a igualdade (3.5).

$$V_1 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (3.5)$$

Portanto, quando se consideram apenas desequilíbrio de módulo, a tensão de sequência positiva é igual ao valor médio das amplitudes das tensões.

Comparando a parte real e imaginária de cada lado da equação, têm-se as equações (3.6) para a sequência zero.

$$\begin{cases} V_0 \cos(\theta_0) = \frac{1}{3} (V_a - 0,5 V_b - 0,5V_c) \\ V_0 \sin(\theta_0) = \frac{1}{3} (-0,866 V_b + 0,866V_c) \end{cases} \quad (3.6)$$

Também partindo de (3.4), tem-se as equações apresentadas em (3.7) para a sequência negativa.

$$\begin{cases} V_2 \cos(\theta_2) = \frac{1}{3} (V_a - 0,5 V_b - 0,5 V_c) \\ V_2 \sin(\theta_2) = \frac{1}{3} (0,866 V_b - 0,866 V_c) \end{cases} \quad (3.7)$$

Comparando (3.6) e (3.7) chega-se as equivalências apresentadas em (3.8).

$$\begin{cases} V_0 \cos(\theta_0) = V_2 \cos(\theta_2) \\ V_0 \sin(\theta_0) = -V_2 \sin(\theta_2) \end{cases} \quad (3.8)$$

Dividindo-se a segunda equação pela primeira, ambas do sistema (3.8), obtém-se o resultado mostrado em (3.9).

$$\text{tg}(\theta_0) = -\text{tg}(\theta_2) \quad (3.9)$$

Por meio das relações trigonométricas, estabeleceu-se que para a tangente de um ângulo ter o valor equivalente ao negativo da tangente de outro ângulo, esses ângulos devem ter o mesmo módulo, porém, com sinais diferentes. Logo, $\theta_0 = -\theta_2$, $\cos(\theta_0) = \cos(\theta_2)$ e $\sin(\theta_0) = -\sin(\theta_2)$. Substituindo-os nas equações (3.8) conclui-se que $V_0 = V_2$.

Fazendo um algoritmo com esse equacionamento, foram obtidas diversas combinações de tensão. As combinações escolhidas foram as que apresentaram a maior discrepância entre as magnitudes das fases.

3.3.3 – BD3

O BD3 possui 4 condições que contemplam tensões de fase equilibradas e fixadas em 220 V e os ângulos variando em uma faixa de $\pm 5^\circ$ do valor nominal. Este banco de dados tem o objetivo de analisar qual o efeito provocado pela variação angular.

3.3.4 – BD4

Analisando o BD4, encontram-se 1234 condições que apresentam desequilíbrio de módulo e ângulo. As magnitudes das tensões variam de 201 a 231 V e os ângulos, para cada condição, variam em uma faixa de $\pm 5^\circ$ do valor nominal. O objetivo é avaliar os efeitos causados pelo desequilíbrio no módulo e ângulo simultaneamente.

3.4 – Geração dos bancos de dados para harmônicas

São utilizados dois bancos de dados nas análises dos efeitos causados pela distorção harmônica: BD5 e BD6, os quais foram elaborados levando-se em conta os limites de distorção harmônica individual e total do PRODIST (ANEEL, 2012). Para os limites individuais considerados, apresentados na Tabela 3.2, foram utilizados valores superiores aos estabelecidos pelo PRODIST. O DTT máximo considerado foi de 10%. Todas as condições que compõem os bancos de dados estão expostas em tabelas no Apêndice A.

Tabela 3.2 – Limites utilizados para as distorções harmônicas

Ordem harmônica	Limite considerado (%)	Limite PRODIST (%)
2	4	2,5
4	3	1,5
5	9	7,5
7	8	6,5

3.4.1 – BD5

O banco de dados BD5 tem na sua composição 24 condições com tensões equilibradas na fundamental e distorção harmônica variando de 1% em 1% em apenas uma ordem.

3.4.2 – BD6

As 24 condições com tensões equilibradas na frequência fundamental e que possuem distorção harmônica em duas ordens diferentes compõem o banco de dados BD6. Cada

condição é composta por duas ordens distintas e com o mesmo valor de distorção individual (DIT), que varia de 1% em 1%, até o limite apresentado na Tabela 3.2.

3.5 – Geração dos bancos de dados para desequilíbrio e harmônicas

Os bancos de dados empregados na análise conjunta dos efeitos são formados por combinações de dados utilizados nas análises individuais. Foram escolhidas algumas condições desequilibradas, dos bancos de dados BD2 e do BD4, e algumas com distorção harmônica, dos bancos BD5 e BD6, que resultaram nos menores valores de conjugado e de rendimento. Essas seleções compreenderam 4 combinações de tensão do BD2 e 4 do BD4, expostas na Tabela 3.3. Além disso, foram escolhidas 9 condições do BD5, apresentadas na Tabela 3.4, e 9 do BD6, mostradas na Tabela 3.5, totalizando 8 condições desequilibradas e 18 com distorção harmônica. Cada condição desequilibrada foi aplicada simultaneamente as tensões com distorção harmônica do BD5 e do BD6. Cada combinação de tensão desequilibrada com todas as harmônicas do BD5, ou do BD6, formam um conjunto. A condição 1 representa a situação de equilíbrio das tensões. Na Tabela 3.6, detalha-se com propriedade como a combinação para os dados do BD2, do BD4 e do BD5 foi efetuada.

Tabela 3.3 – Condições do BD2 e do BD4 utilizadas na análise conjunta

Conjunto	Condição	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b	Ang. V _c	FD (%)
A	2	189,3	197,6	213,2	-120	120	3,5
	3	194,9	194,9	216,1	-120	120	3,5
	4	202,0	197,7	221,3	-120	120	3,5
	5	215,4	206,3	232,4	-120	120	3,5
	6	212,1	208,2	229,3	-125	120	2,0
	7	213,8	209,8	231,0	-125	120	2,0
	8	205,3	201,5	222,0	-125	120	2,0
	9	204,8	208,7	225,6	-125	120	2,0

Tabela 3.4 – Condições do BD5 utilizadas na análise conjunta

Conjunto	Condição	Ordem harmônica	DTT (%)
B	10	2	2
	11	2	4
	12	4	2
	13	5	2
	14	5	4
	15	5	6
	16	7	2
	17	7	4
	18	7	6

Tabela 3.5 – Condições do BD6 utilizadas na análise conjunta

Conjunto	Condição	Ordem harmônica	DTT (%)
C	19	2 e 5	2,83
	20	2 e 5	5,66
	21	4 e 7	2,83
	22	2 e 4	2,83
	23	2 e 7	2,83
	24	2 e 7	5,66
	25	4 e 5	2,83
	26	5 e 7	2,83
	27	5 e 7	5,66

Tabela 3.6 – Formação do Banco de Dados combinando BD2, BD4 e BD5

Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5	Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5
D	2	10	H	6	10
		11			11
		12			12
		13			13
		14			14
		15			15
		16			16
		17			17
		18			18
E	3	10	I	7	10
		11			11
		12			12
		13			13
		14			14
		15			15
		16			16
		17			17
		18			18
F	4	10	J	8	10
		11			11
		12			12
		13			13
		14			14
		15			15

Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5	Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5
		16			16
		17			17
		18			18

Tabela 3.6 – Formação do Banco de Dados combinando BD2, BD4 e BD5 (continuação)

Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5	Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5
G	5	10	K	9	10
		11			11
		12			12
		13			13
		14			14
		15			15
		16			16
		17			17
		18			18

Nota-se na Tabela 3.6 que a combinação das condições desequilibradas, de 2 a 9, com as distorções harmônicas, de 10 a 18, formou oito conjuntos, de D à K, totalizando 72 condições com ambos os distúrbios. Considerando os bancos BD2, BD4 e BD6, a Tabela 3.7 mostra como é feita a combinação desses dados que formam os conjuntos de L à S.

Tabela 3.7 – Formação do Banco de Dados combinando BD2, BD4 e BD6

Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5	Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5
L	2	19	P	6	19
	2	20		6	20
	2	21		6	21
	2	22		6	22
	2	23		6	23
	2	24		6	24
	2	25		6	25
	2	26		6	26
M	3	19	Q	7	19
	3	20		7	20
	3	21		7	21
	3	22		7	22
	3	23		7	23
	3	24		7	24
	3	25		7	25
	3	26		7	26
N	4	19	R	8	19
	4	20		8	20
	4	21		8	21
	4	22		8	22
	4	23		8	23
	4	24		8	24
	4	25		8	25
	4	26		8	26

Tabela 3.7 – Formação do Banco de Dados combinando BD2, BD4 e BD6 (continuação)

Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5	Nome do Conjunto	Condição do BD2 ou BD4	Condição do BD5
N	4	27	R	8	27
O	5	19	S	9	19
	5	20		9	20
	5	21		9	21
	5	22		9	22
	5	23		9	23
	5	24		9	24
	5	25		9	25
	5	26		9	26
	5	27		9	27

3.6 Considerações finais

Este capítulo prestou-se, inicialmente, para a descrição da estrutura montada em laboratório para a realização dos ensaios experimentais e a metodologia empregada na execução. Esse procedimento adotado foi fundamental para a realização deste trabalho, pois possibilitou a aplicação de forma automatizada de diversas condições de tensão. O número de combinações de tensão é um dos diferenciais deste estudo.

Na sequência, foi exibida a lógica utilizada na elaboração dos bancos de dados. Foi construído um banco contendo tensões equilibradas, o BD1, para ser utilizado como referência nas análises. No caso do desequilíbrio, foram especificados três, o BD2, BD3 e BD4, com o intuito de avaliar a influência do desequilíbrio, respectivamente, nas magnitudes das tensões, nos módulos e em ambos simultaneamente. Para a distorção harmônica, foram adotados dois bancos de dados, o BD5 e o BD6, o primeiro com condições contendo distorção em apenas uma ordem e o último em duas diferentes. Para a investigação dos efeitos com o desequilíbrio e a distorção harmônica concomitantemente, foi adotada uma combinação de algumas condições dos bancos descritos anteriormente. As condições escolhidas para essa combinação

são as que provocam efeitos mais nocivos ao conjugado e ao rendimento do MIT. Tabelas ilustrando todas as condições aplicadas são encontradas no Apêndice A.

Capítulo 4 – RESULTADOS DO MIT SOB DESEQUILÍBRIO E DISTORÇÃO HARMÔNICA APLICADOS INDIVIDUALMENTE

4.1 – Considerações iniciais

Este capítulo dedica-se a avaliação dos efeitos da aplicação de dois fenômenos separadamente: o desequilíbrio de tensão e a distorção harmônica de tensão, em um motor de indução trifásico. A análise exposta baseia-se na aplicação, em laboratório, dos bancos de dados.

O primeiro banco de dados, BD1, tem como objetivo definir o que será a referência para as demais análises. Já o segundo, BD2, que expõe condições com desequilíbrio de tensão apenas nos módulos das fases, variando entre 189 V e 233 V, traz, por exemplo, gráficos do conjugado e do rendimento do MIT em função da tensão de sequência positiva e de sequência negativa (V_2). O BD3 lança situações com desequilíbrio apenas nos ângulos, variando numa margem de 5° para mais e para menos em relação à condição equilibrada: 0° ; 120° ; -120° . É analisado o efeito do desequilíbrio no ângulo em função das correntes, conjugado, rendimento e potências. Será notado que o banco de dados BD4, é aquele que contempla desequilíbrios de módulo e ângulo. No referido banco de dados, foi elaborado um gráfico do conjugado e do rendimento em função da componente de sequência positiva da tensão, e com relação à sequência negativa desta.

Adicionalmente, tem-se os dois bancos de dados contendo distorção harmônica, BD5 e BD6, os quais consideram que a tensão está equilibrada na fundamental. A diferença é que no BD5 existe distorção harmônica em apenas uma ordem, e no BD6 em duas ordens. Em ambas as situações são mostrados gráficos do conjugado e do rendimento em função de diversas grandezas, quando a tensão fundamental é igual a 220 V.

Após as avaliações, será apresentada uma tabela resumindo os resultados encontrados para todos os bancos de dados. Vale ressaltar que o presente capítulo trata apenas das condições de

desequilíbrio de tensão e distorções harmônicas individualmente, deixando as análises dos efeitos conjuntos para o capítulo 5.

4.2 – Tensões equilibradas – BD1

Para avaliar qual a influência do desequilíbrio e da distorção harmônica de tensão no conjugado e no rendimento de um MIT, serão considerados como referência os valores obtidos do ensaio com as condições do BD1. A Figura 4.1 apresenta os valores de conjugado e de rendimento medidos no ensaio e a curva, que melhor representa o comportamento dos dados, obtida por meio de regressão por mínimos quadrados, ambos em função da tensão de sequência positiva.

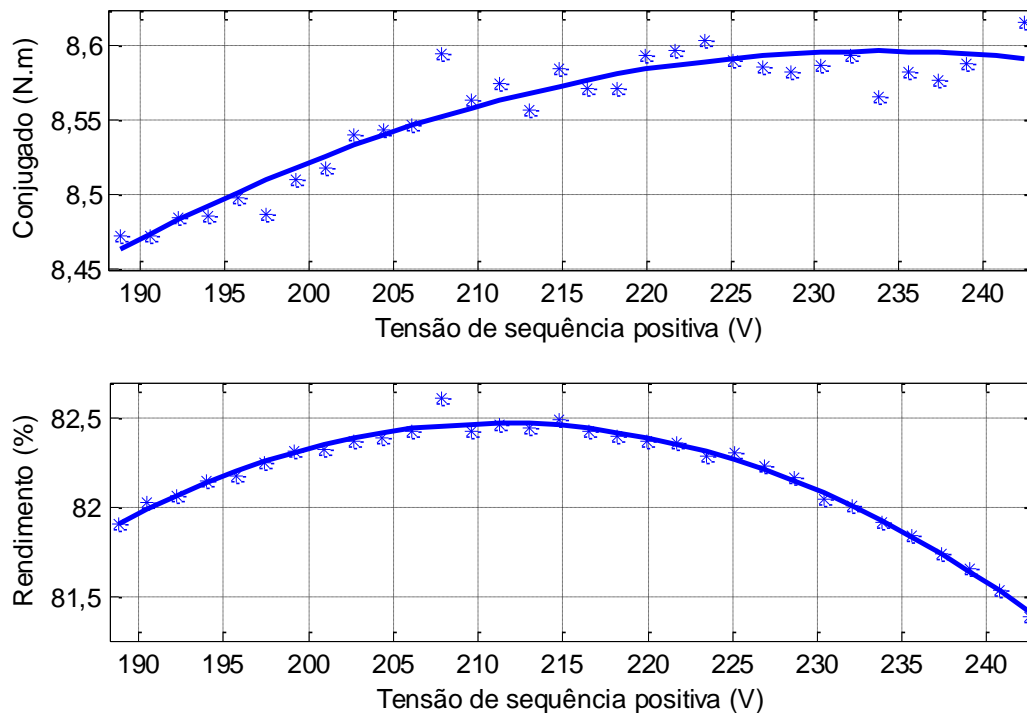


Figura 4.1 – Conjugado e rendimento em função da tensão de sequência positiva para o BD1.

Analisando a Figura 4.1, nota-se que o conjugado aumenta de forma direta e proporcional ao valor da tensão de sequência positiva (V_1). Contudo, deve-se ter prudência nessa conclusão, visto que ela tornou-se possível devido à escala utilizada no eixo das ordenadas, a qual tem

uma variação muito pequena de aproximadamente 0,15 N.m, o que equivale a 1,9% do valor nominal.

Ainda na Figura 4.1, observa-se um comportamento parabólico da curva de rendimento. Pelo mesmo motivo daquele averiguado no conjugado, deve-se ter cautela nas conclusões sobre o comportamento da curva em foco. Observa-se, por conseguinte, variação de aproximadamente 2,45% no rendimento, algo em torno de 2,9% do valor nominal.

Quando se estuda apenas um motor, as alterações apresentadas resultam em um impacto muito pequeno. Contudo, no contexto do setor industrial brasileiro, onde mais de 2/3 da energia é consumida por motores (PNE 2030, 2007), as pequenas variações no conjugado e no rendimento significam valores relevantes quando se considera o conjunto de máquinas.

O objetivo da Figura 4.2 é justificar o formato encontrado na curva de rendimento. Para isso, os gráficos mostram a potência de entrada e de saída do motor em função da tensão de sequência positiva, visto que o rendimento é obtido pela razão entre essas grandezas.

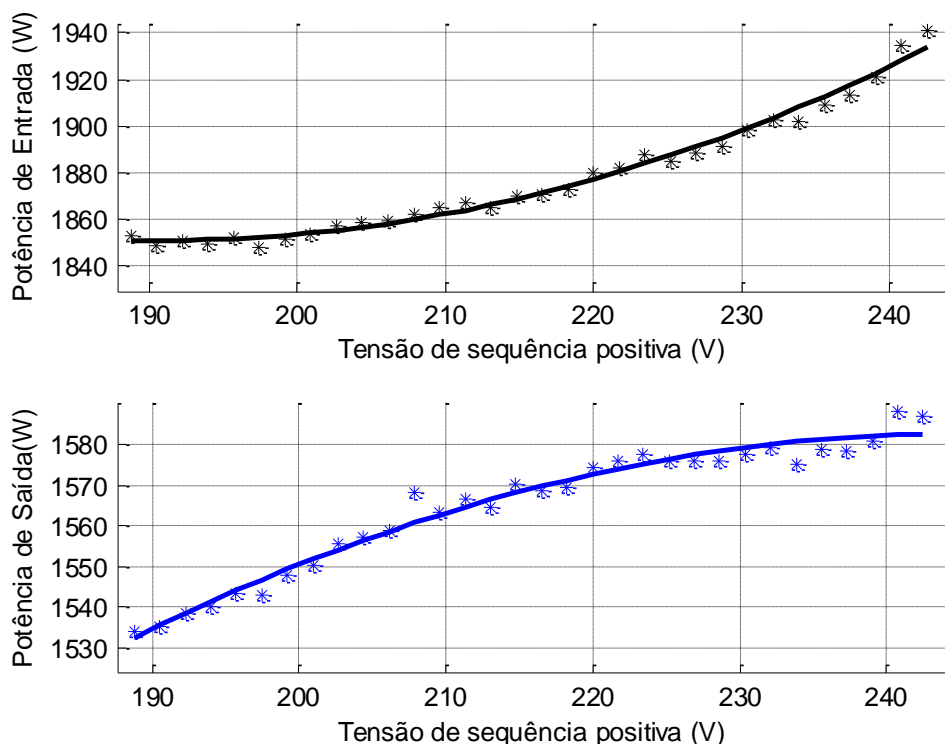


Figura 4.2 – Potência de entrada e saída do MIT para o BD1

Observa-se na Figura 4.2 a tensão de sequência positiva, cujo aumento provoca a elevação das potências de entrada e de saída do MIT. Para V_1 menor ou igual a 212 V, a potência de saída tem crescimento mais acentuado que a potência de entrada, culminando em aumento do rendimento. Nessas condições, em média, o acréscimo de 0,1% na potência de entrada tem como consequência um aumento de 1% na potência de saída. Por outro lado, depois do referido valor de V_1 , a potência de entrada cresce a uma razão maior que a potência de saída, gerando redução no rendimento. Nessa região do gráfico, em média, o aumento de 2,6% na potência de entrada acresce 1% ao valor da potência de saída. Com isso, conclui-se que o rendimento tem valores menores antes e depois do ponto onde a sequência positiva é igual a 212 V, e as perdas na máquina aumentam depois desse ponto.

4.3 – Desequilíbrio

Esta seção dedica-se a explorar os efeitos causados pela alimentação com tensões exclusivamente desequilibradas no conjugado e no rendimento do um motor de indução trifásico. Esta avaliação fundamenta-se em resultados de experimentos laboratoriais com a aplicação dos bancos de dados BD2, BD3 e BD4, descritos no capítulo 3.

4.3.1 – Desequilíbrio na magnitude das tensões – BD2

Os gráficos da Figura 4.3 mostram o conjugado e o rendimento do MIT em função da tensão de sequência positiva. Além disso, os gráficos apresentam separação dos pontos em cores para diferentes valores de tensão de sequência negativa (V_2).

Na Figura 4.3, observa-se a variação dos valores de conjugado de 8 a 8,6 N.m, ou seja, numa faixa de 0,6 N.m, correspondente à 7,4% do nominal. Comparando com o banco de dados BD1, a variação encontrada para o BD2 é aproximadamente quatro vezes maior. Além disso, nota-se claramente no gráfico que os menores valores de sequência negativa estão associados aos maiores valores de conjugado. A partir desses exames, infere-se que a presença de V_2 leva à redução do conjugado, ainda que essa redução seja pequena ou, em vários casos, desprezível. Essa conclusão vai ao encontro do que foi exposto na equação 2.14, onde a parcela de conjugado referente à presença da sequência negativa aparece subtraindo a de sequência positiva.

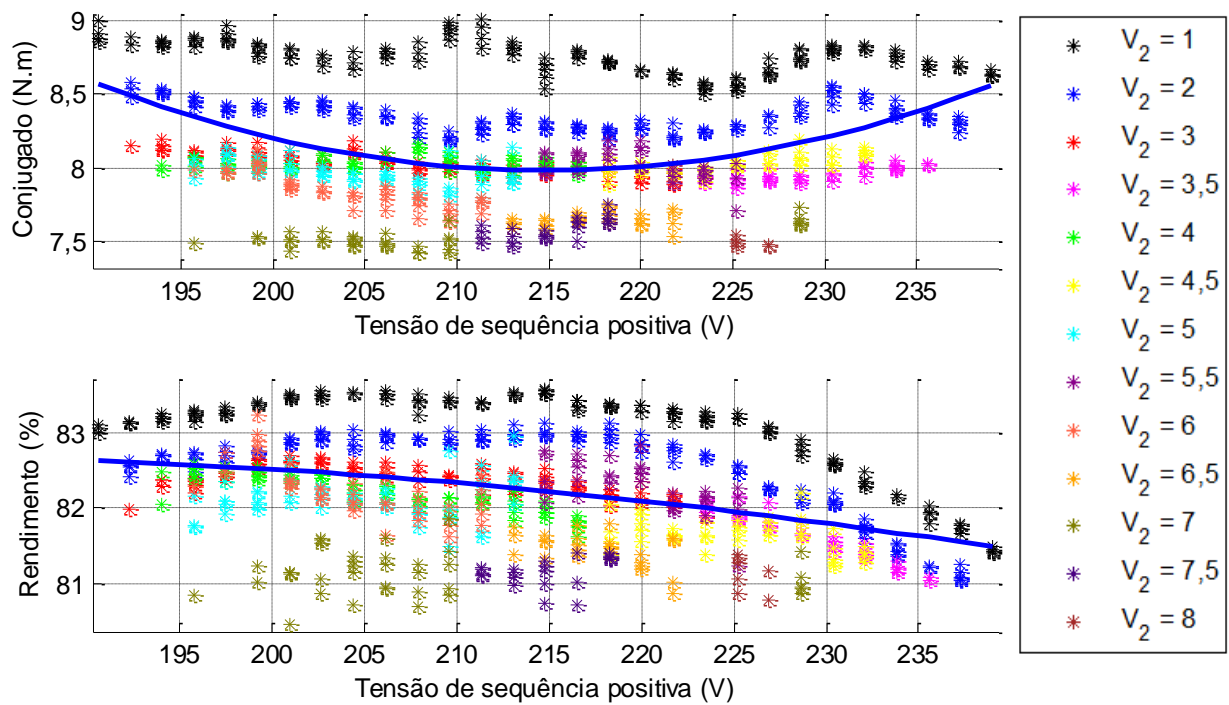


Figura 4.3 – Conjugado e rendimento do MIT para o BD2

Também na Figura 4.3, pode-se observar o rendimento. Entre o maior e o menor valor tem-se uma diferença de 3,2%, que corresponde à aproximadamente 3,8% do valor nominal. Ocorre que, da mesma forma que no conjugado, os valores mais elevados de rendimento estão associados com os menores de V_2 . Com a presença dessa componente, tem-se uma faixa de variação maior quando comparada com a obtida com o BD1.

Com a finalidade de melhor justificar o comportamento do conjugado e do rendimento, serão analisadas as potências de entrada e de saída do motor através da Figura 4.4.

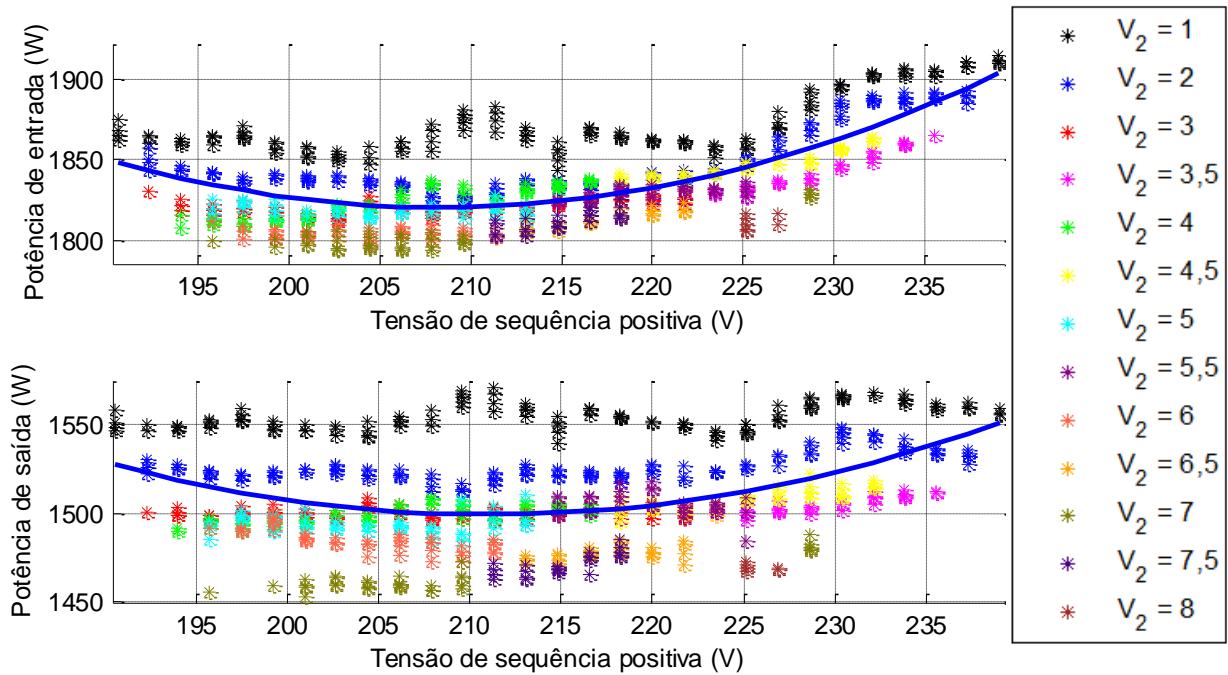


Figura 4.4 – Potência de entrada e saída do MIT para o BD2

Da Figura 4.4, deduz-se que os maiores valores de potência, tanto de entrada quanto de saída, estão relacionados com os menores valores de tensão de sequência negativa. Comparando-se o comportamento dessas potências com o observado na Figura 4.2, pode-se verificar um comportamento semelhante à potência de entrada para tensões equilibradas e desequilibradas. Porém, analisando-se a potência de saída, percebe-se concavidade voltada para baixo quando em tensões equilibradas, enquanto que para condições desequilibradas esta concavidade está voltada para cima. Isso justifica o comportamento do rendimento apresentado na Figura 4.3, onde a curva exibe concavidade voltada para baixo pouco acentuada.

Depreende-se da comparação entre as Figuras 4.2 e 4.4, que há diferença entre a faixa de variação das potências quando se passa a ter presença de V_2 . Para o BD1, onde se tem alteração apenas de V_1 , a potência de entrada varia 100 W e a de saída 60 W. Já para o BD2, quando há presença da sequência negativa, a potência de entrada varia 115 W e a de saída 120 W. Além disso, vale ressaltar que os valores mínimos e máximos das potências reduziram com a presença da sequência negativa. Desse modo, conclui-se que a tensão V_2 provoca redução nas potências de saída e de entrada e que se tem uma ampla faixa de variação das potências para um valor fixo de sequência positiva.

De outra parte, a Figura 4.5 mostra o conjugado e o rendimento do MIT em função do fator de desequilíbrio (FD). A avaliação dessa relação faz-se necessária porque, atualmente, esse é o índice considerado pela norma brasileira (ANEEL, 2012) para quantificar o desequilíbrio de tensão.

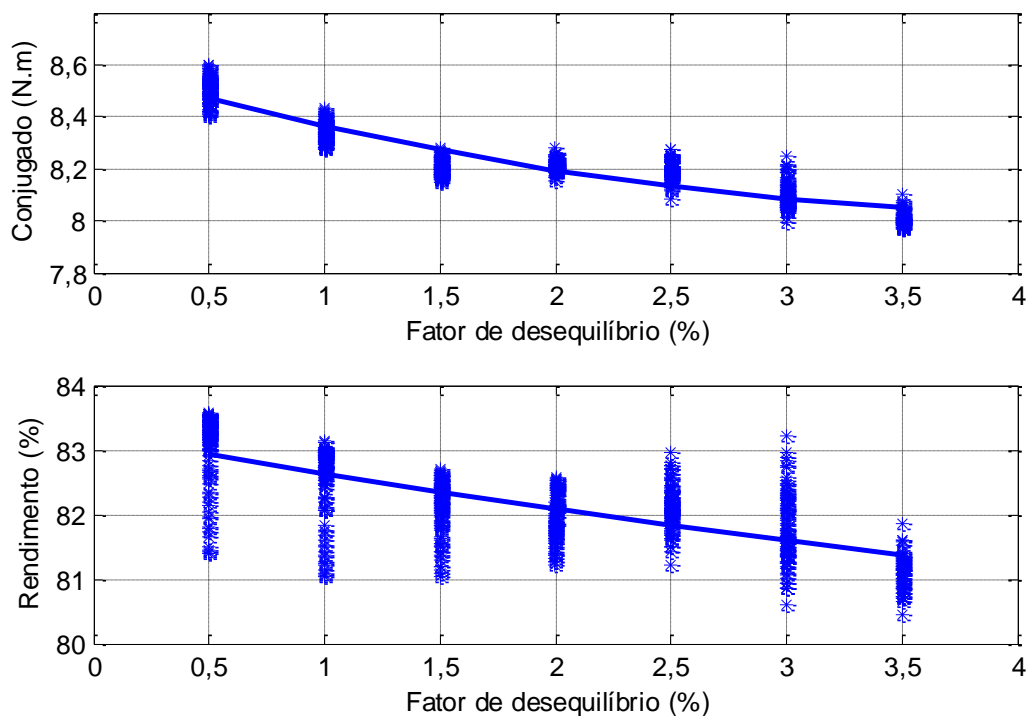


Figura 4.5 – Conjugado e rendimento do MIT para o BD2 em função do FD

Na Figura 4.5, através da curva obtida por regressão, nota-se redução no conjugado e no rendimento com o aumento do FD. Na faixa analisada, em média, o aumento de 1% no valor do FD culmina em decréscimo de 2% no conjugado e de 0,7% no rendimento. Porém, se forem analisados os asteriscos que representam cada condição em que o motor foi submetido, verifica-se que determinadas condições apresentam um maior conjugado e rendimento que condições com um FD inferior. Por exemplo, para o FD igual a 3% tem-se uma condição com rendimento igual a 83,1%, enquanto todas as condições com FD igual a 2% culminam em valores inferiores a esse. No caso do conjugado, com FD igual a 3%, têm-se conjugados próximos de 8,2 N.m. Já o FD igual a 2% culmina em diversas condições com conjugados inferiores a esse. Dessa forma, pode-se inferir que o FD não é a melhor grandeza para relacionar a condição desequilibrada com o valor do conjugado e do rendimento.

O conjugado e o rendimento em função da corrente de sequência positiva são apresentados na Figura 4.6. Os gráficos evidenciam que os maiores valores de corrente de sequência positiva estão relacionados com os menores valores de tensão de sequência negativa, isto é, à medida que V_2 aumenta, tem-se em uma redução de I_1 . Com a avaliação dos gráficos conclui que a corrente de sequência positiva também não é um bom indicador, pois determinado valor de I_1 está relacionado com condições que culminam em diferentes valores de conjugado e de rendimento.

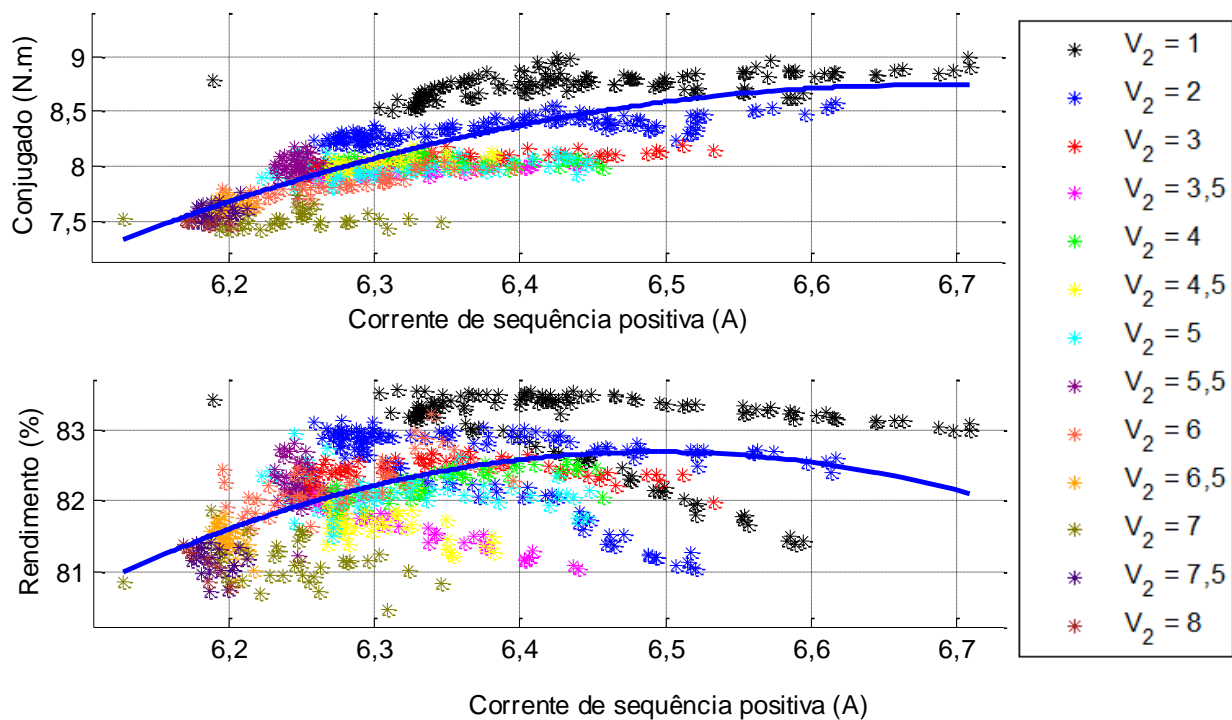


Figura 4.6 – Conjugado e rendimento do MIT para o BD2 em função da corrente de sequência positiva

O conjugado e o rendimento em função da corrente de sequência negativa estão expostos nos gráficos da Figura 4.7. Da análise do gráfico do conjugado, a corrente de sequência negativa destaca-se como um bom indicador do valor do conjugado. Quanto maior for I_2 , tanto menor será o valor do conjugado. Essa conclusão é possível, pois, um valor de I_2 se relaciona com condições que culminam em valores próximos de conjugado. O mesmo não pode ser dito para o rendimento, visto que algumas condições com corrente superior levam a rendimentos maiores que condições com valores menores de I_2 .

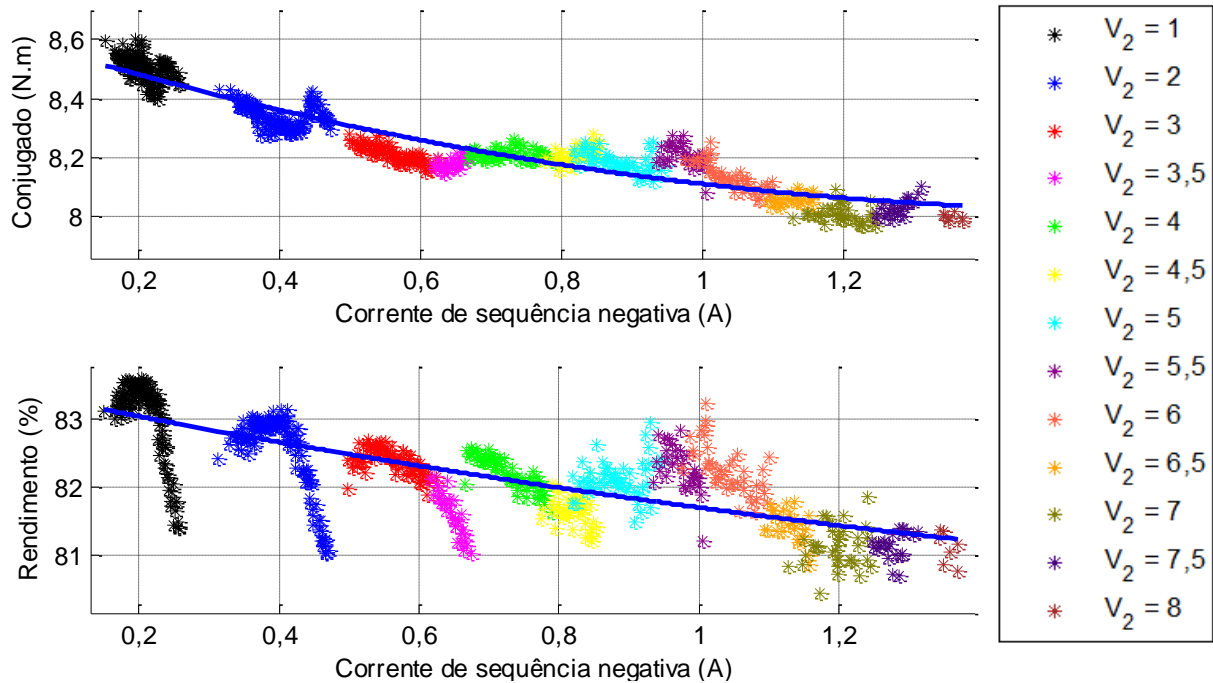


Figura 4.7 – Conjugado e rendimento do MIT para o BD2 em função da corrente de sequência negativa

Em complemento às análises realizadas, como discutido no Capítulo 2, a presença do desequilíbrio faz surgir um conjugado no sentido oposto à rotação da máquina, tendendo a freá-la. Dessa forma, a velocidade da máquina terá variação com a presença do desequilíbrio.

4.3.2 – Resultados com a aplicação do BD3 – Desequilíbrio de ângulo

São mostrados nesta seção os resultados obtidos com a aplicação em laboratório do BD3. A Tabela 4.1 exhibe os resultados obtidos para as correntes, conjugado, rendimento e potências. A primeira linha da tabela mostra a condição equilibrada, utilizada como referência, e a última mostra a média dos valores das condições, a fim de auxiliar a comparação.

Inferre-se da análise da Tabela 4.1 que o desequilíbrio nos ângulos das tensões, mesmo fazendo surgir tensão e corrente de sequência negativa, não influencia os valores do conjugado e das correntes. Existem variações nos valores das potências e do rendimento, porém elas são inexpressivas. Dessa forma, conclui-se que o desequilíbrio causado pela alteração nos ângulos das tensões não causa efeito significativo nas grandezas em foco.

Tabela 4.1 – Resultados da aplicação do BD3

Ang. V_b (°)	Ang. V_c (°)	I_1 (A)	I_2 (A)	T (N.m)	η (%)	Pin (W)	Pout (W)
-120	120	6.36	0.05	8.66	84.53	1872.06	1582.49
-115	120	6.37	1.11	8.70	84.48	1886.46	1593.67
-125	120	6.36	1.09	8.73	84.90	1883.37	1599.05
-120	115	6.36	1.09	8.71	84.78	1881.69	1595.28
-120	125	6.36	1.13	8.68	84.51	1883.12	1591.34
Média		6.36	0.89	8.70	84.64	1881.34	1592.37

4.3.3 – Desequilíbrio nas magnitudes e nos ângulos das tensões – BD4

O conjugado e o rendimento em função da componente de sequência positiva da tensão são mostrados na Figura 4.8. Para melhor expressar o comportamento dos dados, o gráfico apresenta a curva obtida por regressão e a divisão em cores em relação à componente de sequência negativa.

Constata-se na Figura 4.8 que a faixa de variação do conjugado é de 0,38 N.m, 4,69% do valor nominal, e o valor mínimo é de 8,12 N.m. Considerando as Figuras 4.1, com tensões equilibradas, e 4.3, com desequilíbrio apenas nas magnitudes, no trecho de 201 V até 231 V, as faixas de variação são de 1,2% e 7,4% do valor nominal e os valores mínimos de conjugado são 8,5 N.m e 8 N.m. Comparando esses valores, tem-se que a maior variação de conjugado e o valor mínimo ocorrem quando há desequilíbrio apenas de módulo. Observando-se a curva, para V_1 igual a 220 V, percebe-se na Figura 4.1 valor de conjugado igual a 8,58 N.m. Na Figura 4.3 encontra-se um valor de 8,2 N.m e na 4.8 verifica-se também 8,2 N.m. Estabelecendo relação entre essas três condições, pode-se notar que o desequilíbrio de ângulo não causa efeitos consideráveis ao conjugado do MIT, validando a conclusão obtida com a análise do BD3.

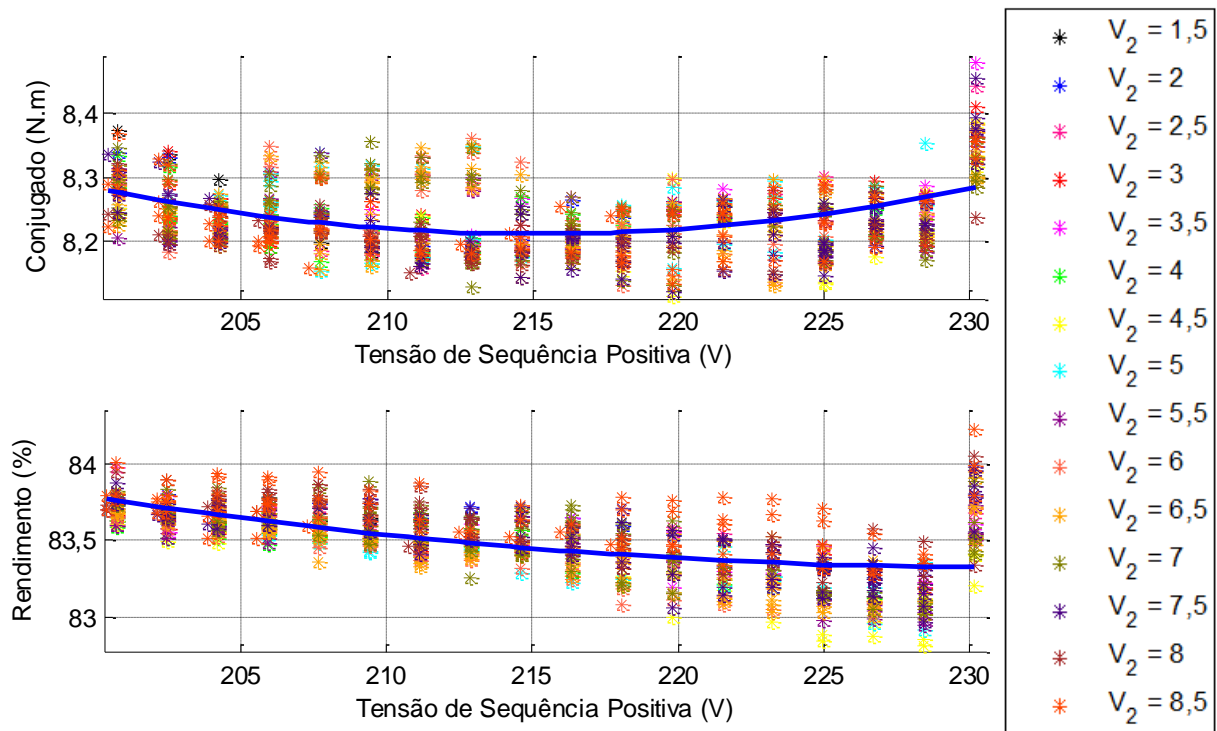


Figura 4.8 – Conjugado em função da sequência positiva para o BD4

Nota-se ainda na Figura 4.8, que o menor valor do rendimento é 82,6% e a faixa de variação é de 2,9%, ou seja, 3,45% do valor nominal. Para uma faixa de 201 V a 231 V, na Figura 4.1, tem-se um valor mínimo de 83% e a faixa de variação de 1,43%, e na 4.3 o valor mínimo é de 80,4%, com faixa de 3,8% do valor nominal. Constata-se a maior variação e o menor valor quando se têm apenas magnitudes desequilibradas. Considerando uma tensão de sequência positiva de 220 V, observando a curva que representa o comportamento do rendimento, encontra-se 83,8%, 82% e 83,8% para BD1, BD2 e BD4, respectivamente. Logo, assim como no caso do conjugado, o desequilíbrio de ângulo não causa efeitos consideráveis no rendimento, ratificando as conclusões do BD3.

4.4 – Distorção harmônica de tensão

A análise das medições obtidas em laboratório com a aplicação dos bancos de dados BD5 e BD6, descritos no Capítulo 3, é o objetivo desta seção. Os resultados apresentados consideram tensões, na frequência fundamental, equilibradas e iguais a 210, 220 e 230 V.

Serão consideradas como referência as condições com tensões equilibradas e sem distorção do BD1.

4.4.1 – Distorção em uma ordem harmônica – BD5

Serão expostos os resultados dos ensaios utilizando o BD5 a fim de avaliar o efeito provocado por ordens harmônicas aplicadas individualmente sobre o MIT. O conjugado e o rendimento em função da DTT, quando a tensão fundamental é igual a 220 V, são apresentados na Figura 4.9.

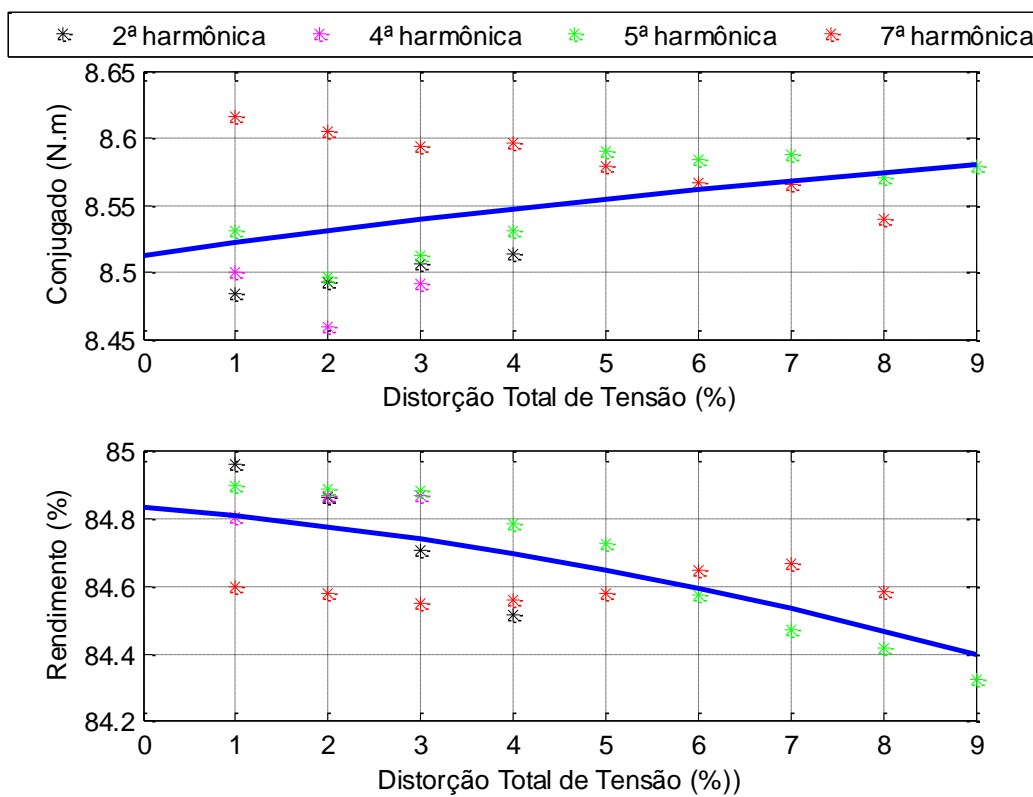


Figura 4.9 – Conjugado e rendimento em função da DTT para o BD5.

Analisando a Figura 4.9, encontra-se uma faixa de variação para o conjugado de 0,16 N.m, correspondente a 1,98% do valor nominal. É uma variação pequena, porém, pode-se perceber a propensão da menor ordem harmônica estar associada ao menor conjugado. Já para o rendimento, a faixa de variação é de 0,64% (0,76% do nominal). Apesar da variação ser pequena, é possível notar a tendência de redução do rendimento com o aumento da DTT.

Com o propósito de apurar com exatidão os resultados encontrados com a aplicação do BD5, a Tabela 4.2 é apresentada. Na tabela citada, são ilustrados os resultados obtidos com tensão fundamental iguais a 210 V e 230 V, além de 220 V.

Tabela 4.2 – Resultados do bando de dados BD5

Ordem harmônica	DTT (%)	T ₂₁₀	T ₂₂₀	T ₂₃₀	η_{210}	η_{220}	η_{230}
Fundamental	0	8,56	8,53	8,59	83,85	84,79	83,10
2	1	8,56	8,48	8,55	84,31	84,96	82,82
	2	8,62	8,49	8,55	84,30	84,86	82,76
	3	8,60	8,51	8,56	84,10	84,71	82,61
	4	8,60	8,51	8,58	83,87	84,52	82,53
4	1	8,64	8,50	8,58	84,24	84,81	82,79
	2	8,65	8,46	8,58	84,23	84,87	82,75
	3	8,60	8,49	8,59	84,18	84,87	82,81
5	1	8,62	8,53	8,61	84,10	84,90	82,73
	2	8,61	8,50	8,65	84,06	84,89	82,72
	3	8,64	8,51	8,61	83,85	84,89	82,81
	4	8,67	8,53	8,64	83,91	84,78	82,73
	5	8,61	8,59	8,60	83,82	84,73	82,59
	6	8,64	8,58	8,52	83,75	84,58	82,61
	7	8,64	8,59	8,56	83,58	84,47	82,56
	8	8,61	8,57	8,56	84,09	84,42	82,50
7	1	8,60	8,58	8,54	84,02	84,32	82,34
	1	8,59	8,62	8,55	83,93	84,60	82,65
	2	8,62	8,60	8,54	84,01	84,58	82,64
	3	8,61	8,59	8,54	84,10	84,55	82,66
	4	8,62	8,60	8,53	83,99	84,56	82,68
	5	8,59	8,58	8,54	83,95	84,58	82,60
	6	8,57	8,57	8,51	83,92	84,65	82,48
	7	8,57	8,56	8,49	83,76	84,67	82,52
8	8,58	8,54	8,50	83,64	84,59	82,49	

Ordem harmônica	DTT (%)	T ₂₁₀	T ₂₂₀	T ₂₃₀	η ₂₁₀	η ₂₂₀	η ₂₃₀
Média		8,61	8,54	8,56	83,98	84,69	82,66

Na Tabela 4.2, T₂₁₀, T₂₂₀ e T₂₃₀ são os conjugados quando se têm tensões iguais a 210 V, 220 V e 230 V na frequência fundamental, respectivamente. Da mesma forma, η₂₁₀, η₂₂₀ e η₂₃₀ são os rendimentos para tensões iguais a 210 V, 220 V e 230 V, respectivamente. Analisando-se minuciosamente, nota-se uma pequena variação entre o valor mínimo e máximo do conjugado. Para a tensão na fundamental igual a 210, 220 e 230 V, tem-se respectivamente 1,36%, 1,98% e 1,98% do valor nominal desta grandeza mecânica. Para o rendimento, fixando-se a tensão fundamental em 210, 220 e 230 V, tem-se variações de 0,87%, 0,76% e 0,9% do valor nominal, respectivamente. Confrontando os valores encontrados para as diferentes tensões na frequência fundamental, nota-se que a variação devido à mudança nessa tensão é maior que a alteração causada pela inserção das harmônicas. Além disso, nota-se uma redução no rendimento para valores de tensão maiores e menores que 220 V, sendo mais acentuada para valores maiores.

Constata-se dos resultados da Tabela 4.2 que um aumento de 1% na DTT culmina na redução, em média, do conjugado e do rendimento de 0,1% e 0,06%, respectivamente. Com isso, dentro dos limites avaliados, a distorção harmônica de tensão não causa efeitos nocivos consideráveis ao MIT.

4.4.2 – Resultados com a aplicação do BD6 – Distorção em duas ordens

Para determinar o efeito provocado pela distorção de duas ordens harmônicas aplicadas simultaneamente, serão ilustrados os resultados dos ensaios com o BD6. Os gráficos mostram asteriscos que representam o resultado de cada condição a que o motor foi submetido e a curva obtida através de regressão por mínimos quadrados, a qual representa o comportamento desse conjunto de dados.

O conjugado e o rendimento em função da DTT, considerando a tensão fundamental igual a 220 V, estão apresentados nos gráficos da Figura 4.10.

Investigando os gráficos da Figura 4.10, nota-se uma faixa de variação de 0,31 N.m para o conjugado, aproximadamente 3,78% do valor nominal, cerca de 1,94 vezes maior que o encontrado para V_1 igual a 220 V, com apenas uma ordem harmônica. O rendimento permanece com uma variação muito pequena, próxima a 0,64% do valor nominal.

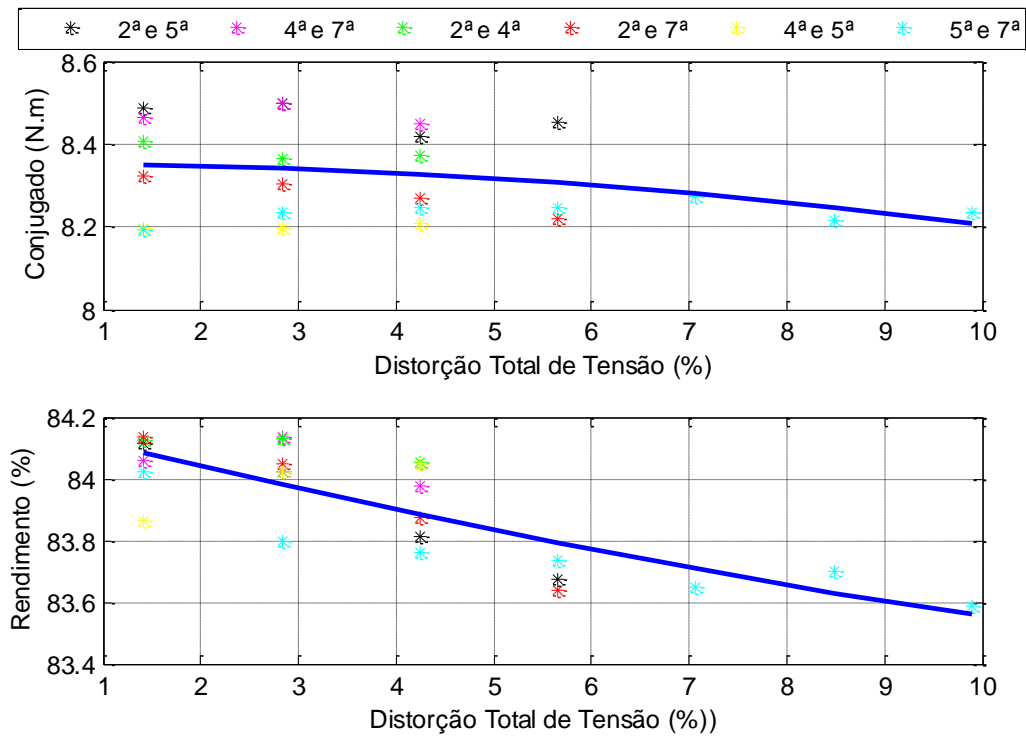


Figura 4.10 – Conjugado e rendimento em função da DTT para o BD6.

Para avaliar com precisão os resultados encontrados com a aplicação do BD6, a Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos com tensão na fundamental iguais a 210 V e 230 V, além de 220 V.

Tabela 4.3 – Resultados do bando de dados BD6

Ordem harmônica	DTT (%)	T_{210}	T_{220}	T_{230}	η_{210}	η_{220}	η_{230}
Fundamental	0	8,56	8,53	8,59	83,85	84,79	83,10
2 ^a e 5 ^a	1,41	8,37	8,49	8,53	84,31	84,12	83,45
	2,83	8,40	8,50	8,54	84,30	84,02	83,28
	4,24	8,43	8,42	8,54	84,10	83,81	83,15

Ordem harmônica	DTT (%)	T ₂₁₀	T ₂₂₀	T ₂₃₀	η ₂₁₀	η ₂₂₀	η ₂₃₀
	5,66	8,41	8,45	8,57	83,87	83,67	82,95
4 ^a e 7 ^a	1,41	8,42	8,46	8,58	84,24	84,06	83,22
	2,83	8,42	8,50	8,44	84,23	84,13	83,18
	4,24	8,43	8,45	8,46	84,18	83,98	83,37
2 ^a e 4 ^a	1,41	8,46	8,41	8,51	84,10	84,12	83,24
	2,83	8,48	8,37	8,52	84,06	84,13	83,07

Tabela 4.3 – Resultados do bando de dados BD6 (continuação)

Ordem harmônica	DTT (%)	T ₂₁₀	T ₂₂₀	T ₂₃₀	η ₂₁₀	η ₂₂₀	η ₂₃₀
2 ^a e 4 ^a	4,24	8,54	8,37	8,52	83,85	84,05	83,01
2 ^a e 7 ^a	1,41	8,56	8,32	8,52	83,91	84,13	83,02
	2,83	8,54	8,30	8,53	83,82	84,05	83,03
	4,24	8,48	8,27	8,56	83,75	83,87	82,94
	5,66	8,37	8,22	8,58	83,58	83,64	82,78
4 ^a e 5 ^a	1,41	8,29	8,20	8,60	84,09	83,87	83,17
	2,83	8,36	8,20	8,57	84,02	84,02	83,14
	4,24	8,36	8,21	8,53	83,93	84,05	83,25
5 ^a e 7 ^a	1,41	8,38	8,19	8,51	84,01	84,03	83,29
	2,83	8,40	8,24	8,57	84,10	83,80	83,30
	4,24	8,40	8,25	8,59	83,99	83,76	83,27
	5,66	8,38	8,25	8,62	83,95	83,74	83,23
	7,07	8,40	8,27	8,64	83,92	83,65	83,11
	8,49	8,44	8,22	8,66	83,76	83,70	83,02
	9,9	8,46	8,23	8,67	83,64	83,59	82,91
Média		8,42	8,32	8,56	83,99	83,92	83,14

Estabelecendo um paralelo entre as Tabelas 4.2 e 4.3, é possível notar que quando há apenas uma ordem harmônica, alguns valores obtidos para o conjugado foram maiores que o encontrado para a tensão fundamental. Contudo, quando existem duas ordens envolvidas, todos os valores foram inferiores aos medidos na ausência de harmônicas. Em relação ao rendimento, nas situações com apenas uma ordem harmônica, os valores encontrados foram

superiores aos registrados nas medições para condições com duas ordens envolvidas. Dessa forma, é possível perceber uma tendência de redução do rendimento em relação ao aumento da DTT. Além disso, nota-se que os menores valores de conjugado e rendimento geralmente ocorrem nas condições que envolvam presença de uma das harmônicas de sequência negativa, 2ª ou 5ª. Por exemplo, para a tensão na fundamental igual a 220 V, o menor conjugado (T_{220}) e rendimento (η_{220}) ocorrem para as harmônicas de 5ª e 7ª ordens.

Na Tabela 4.3, notam-se as variações no valor do conjugado iguais a 3,33%, 3,78% e 2,84% do valor nominal, considerando a tensão fundamental nas fases iguais a 210, 220 e 230 V, respectivamente. Analisando os números apresentados, é possível perceber uma variação de aproximadamente 1,9 vezes maior que a encontrada com o BD5. Como os valores encontrados para o conjugado foram sempre menores que o medido para a tensão fundamental, essa variação é entendida como a redução no valor do conjugado. Além disso, para as condições do BD6, a inserção de harmônicas é mais prejudicial que a mudança na tensão fundamental.

No que concerne ao rendimento, fixando a tensão fundamental em 210, 220 e 230 V, têm-se variações de 0,86%, 0,64% e 0,8% do valor nominal, respectivamente. Da mesma forma que concluído para o BD5, variação da tensão fundamental causa maiores alterações nos valores do rendimento que a inserção de harmônicas.

Constata-se na Tabela 4.3 uma redução no conjugado de 0,16 % e no rendimento de 0,11%, em média, quando ocorre um aumento de 1% na DTT. Diante disso, conclui-se ainda que, dentro dos limites avaliados, um pequeno incremento no índice que quantifica a distorção harmônica total de tensão não causa efeitos nocivos consideráveis ao MIT.

4.5 – Principais resultados

A Tabela 4.4 mostra o resumo dos valores máximos (T_{\max} e η_{\max}) e mínimos (T_{\min} e η_{\min}) e as faixas de variação (ΔT e $\Delta \eta$) encontrados para os bancos de dados BD1, BD2, BD3 e BD4, onde se considera a tensão de sequência positiva variando de 201 V a 231 V, a sequência negativa de 1,5 V a 8 V e o FD de 0% a 3,5%.

Tabela 4.4 – Tabela síntese dos bancos de dados BD1, BD2, BD3 e BD4

	BD1	BD2	BD3	BD4	BD5	BD6
ΔT	1,2%	7,4%	0,86%	4,69%	1,73%	3,83%
T_{\min}	8,5 N.m	8 N.m	8,66 N.m	8,12 N.m	8,48 N.m	8,19 N.m
T_{\max}	8,6 N.m	8,6 N.m	8,73 N.m	8,5 N.m	8,62 N.m	8,50 N.m
$\Delta \eta$	1,43%	3,8%	0,5%	3,45%	0,76%	0,64%
η_{\min}	83%	80,4%	84,48%	82,6%	84,32%	83,59%
η_{\max}	84,2%	83,6%	84,9%	85,5%	84,96%	84,13%

Comparando-se os bancos de dados pode-se notar que o BD2 tem as maiores faixas de variação e os piores conjugados e rendimentos. Em razão dos resultados do BD3 apresentarem as menores alterações, ressalta-se que mudanças nos ângulos das tensões não geram efeitos significativos. Logo, as alterações observadas no BD4 estão relacionadas com modificações nas magnitudes da tensão. Assim, depreende-se que, mesmo que inexpressivos, os efeitos no conjugado e no rendimento são oriundos do desequilíbrio nas magnitudes das tensões.

4.6 – Considerações finais

Este capítulo apresentou em detalhes um estudo para se identificar os efeitos causados pelo desequilíbrio e pela distorção harmônica de tensão, aplicados separadamente em um MIT.

Com a aplicação sobre o MIT do BD1, é possível afirmar que o conjugado aumenta com uma elevação na tensão de sequência positiva. O BD2 mostrou que, para um valor fixo de V_1 , quanto menor for a tensão de sequência negativa, maior será o conjugado. Da mesma forma ocorre para o rendimento. A presença de V_2 não só faz fluir I_2 , como seu aumento culmina na elevação de I_2 e diminuição de I_1 , considerando um valor fixo de V_1 . Observou-se também que a inserção de V_2 aumenta o intervalo de variação do conjugado, do rendimento, das potências de entrada e de saída para um determinado valor de V_1 . Além disso, o incremento de V_2 leva a uma redução na potência de entrada e de saída.

O BD3 evidencia que os ângulos desequilibrados não mudam os valores do conjugado e do rendimento.

Vale ressaltar que o FD não é um bom indicador para relacionar o desequilíbrio com os efeitos no conjugado e no rendimento. Todavia, I_2 mostrou-se um bom indicador para o valor do conjugado. A corrente I_2 será maior, quanto mais baixo for o conjugado, e para um determinado valor de I_2 , há um intervalo ínfimo de variação do conjugado.

Da análise comparativa entre os bancos de dados BD5 e BD6, infere-se que a presença de duas harmônicas de frequências diferentes causam mais efeitos que apenas uma ordem. Além disso, fica evidente em vários casos que a alteração do valor da tensão na fundamental é mais prejudicial que a inserção de harmônicas.

Considerando o BD2, onde há a maior influência do desequilíbrio, o aumento em 1% no FD provoca, em média, redução de 2% no valor do conjugado e 0,7% no valor do rendimento. Avaliando a influência das harmônicas, concluiu-se que a elevação de 1% na DTT relaciona-se, em média, a diminuição de 0,1% no conjugado, e 0,06% no rendimento para o BD5, e de 0,16% para o conjugado e 0,11% para o rendimento no BD6. Isso justifica afirmar que a influência dos fenômenos aplicados isoladamente é pequena, sendo desprezível em alguns casos.

Capítulo 5 – RESULTADOS DO MIT SOB DESEQUILÍBRIO E DISTORÇÃO HARMÔNICA APLICADOS SIMULTANEAMENTE

5.1 – Considerações iniciais

Neste capítulo, o objetivo é apresentar e discutir os resultados obtidos com a aplicação no MIT de tensões desequilibradas e distorcidas simultaneamente. Para isso, são mostrados gráficos e tabelas com os resultados obtidos em experimentos executados conforme descrição apresentada no Capítulo 3.

As condições exploradas são oriundas da combinação do BD2 ou BD4, compostos por tensões desequilibradas, com o BD5 ou BD6, com distorção harmônica. Como as análises mostraram que o desequilíbrio apenas de ângulo não gera efeitos significativos, o BD3 não será considerado na análise conjunta. Porém, para não descartar por completo o desequilíbrio de ângulo, as tensões com desequilíbrio de módulo e ângulo do BD4 foram consideradas. As combinações de tensão desequilibrada e de distorção harmônica escolhidas para a avaliação conjunta são as que culminaram nos menores valores de conjugado e rendimento no momento da submissão individual dos distúrbios.

As análises são executadas utilizando-se a comparação gráfica entre os valores medidos de conjugado e rendimento quando as tensões estão equilibradas, os distúrbios estão aplicados individualmente e simultaneamente. Com isso, avalia-se em qual circunstância ocorre a maior redução das grandezas avaliadas. Para mensurar o quanto a presença concomitante dos fenômenos é nociva ao motor, são apresentadas tabelas comparando as reduções do conjugado e do rendimento, em relação ao valor medido com tensões equilibradas iguais a nominal, quando estão presentes separados ou conjuntamente. Além disso, neste capítulo aborda-se a eficiência dos índices FD e DTT para relacionar o distúrbio ao efeito observado. Por fim, discute-se como se dá a interação entre os fenômenos, se ocorre ou não uma sobreposição de efeitos, quando estes estão paralelamente na alimentação do MIT.

5.2 – Tensão na frequência fundamental e V_1 iguais a 220 V

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação de uma condição equilibrada do BD1. A Tabela 5.2 exibe alguns resultados do conjugado e do rendimento decorrentes da aplicação sobre o MIT de tensões com desequilíbrio de tensão, presentes nos bancos de dados BD2 e BD4. Essas condições, conforme descrito no Capítulo 3, foram escolhidas para serem aplicadas simultaneamente as do BD5 e BD6. Nessa Tabela, as variações ΔT e $\Delta \eta$ são calculadas por meio da diferença entre o valor de referência, Tabela 5.1, e os demais valores medidos.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos com tensão equilibrada e perfeitamente senoidal usado como referência

Condição	V_a	V_b	V_c	Ang.	Ang.	T	η
	(V)	(V)	(V)	V_b	V_c	(N.m)	(%)
1	220	220	220	-120	120	8,53	84,79

Tabela 5.2 – Resultados das condições do BD2 e BD4 utilizadas na análise conjunta

Conjunto	Condição	V_a	V_b	V_c	Ang.	Ang.	FD	T	η
		(V)	(V)	(V)	V_b	V_c	(%)	(N.m)	(%)
A	2	189,3	197,6	213,2	-120	120	3,15	8,02	80,79
	3	194,9	194,9	216,1	-120	120	3,15	8,00	80,79
	4	202,0	197,7	221,3	-120	120	3,15	7,99	81,08
	5	215,4	206,3	232,4	-120	120	3,15	8,00	80,96
	6	212,1	208,2	229,3	-125	120	3,15	8,13	83,93
	7	213,8	209,8	231,0	-125	120	3,15	8,12	83,11
	8	205,3	201,5	222,0	-125	120	1,57	8,11	82,99
	9	204,8	208,7	225,6	-125	120	3,15	8,09	83,25

A Tabela 5.3 expõe os resultados obtidos com a submissão do MIT às condições escolhidas do BD5, onde se constata distorções harmônicas oriundas da presença de uma ordem harmônica, que foram aplicadas simultaneamente às combinações de tensões desequilibradas.

Tabela 5.3 – Resultados das condições do BD5 utilizadas na análise simultânea

Conjunto	Condição	Ordem harmônica	DTT (%)	T (N.m)	η (%)
B	10	2	2	8,49	84,86
	11	2	4	8,51	84,52
	12	4	2	8,46	84,87
	13	5	2	8,50	84,89
	14	5	4	8,53	84,78
	15	5	6	8,58	84,58
	16	7	2	8,60	84,58
	17	7	4	8,60	84,56
	18	7	6	8,57	84,65

A Tabela 5.4 expõe os resultados obtidos com a utilização das condições do banco de dados onde se têm distorções harmônicas decorrentes da presença de duas ordens harmônicas (BD6), selecionadas para aplicação simultânea a tensões desequilibradas.

Tabela 5.4 – Resultados das condições do BD6 utilizadas na análise simultânea

Conjunto	Condição	Ordem harmônica	DTT (%)	T (N.m)	η (%)
C	19	2 e 5	2,83	8,5	84,02
	20	2 e 5	5,66	8,45	83,67
	21	4 e 7	2,83	8,5	84,13
	22	2 e 4	2,83	8,37	84,13
	23	2 e 7	2,83	8,3	84,05
	24	2 e 7	5,66	8,22	83,64
	25	4 e 5	2,83	8,2	84,02
	26	5 e 7	2,83	8,24	83,8
	27	5 e 7	5,66	8,25	83,74

5.2.1 – Aplicação simultânea do BD2 e BD4 com o BD5

Uma parte das condições representantes da aplicação conjunta dos distúrbios é decorrente da combinação de tensões desequilibradas do BD2 e do BD4 com distorções harmônicas do BD5. Esse agrupamento dos bancos de dados originou os conjuntos de D a K, descritos no Capítulo 3. As Figuras 5.1 e 5.2 exibem os resultados dos conjuntos de D a K obtidos para o conjugado e para o rendimento, respectivamente, com a aplicação conjunta dos referidos bancos de dados.

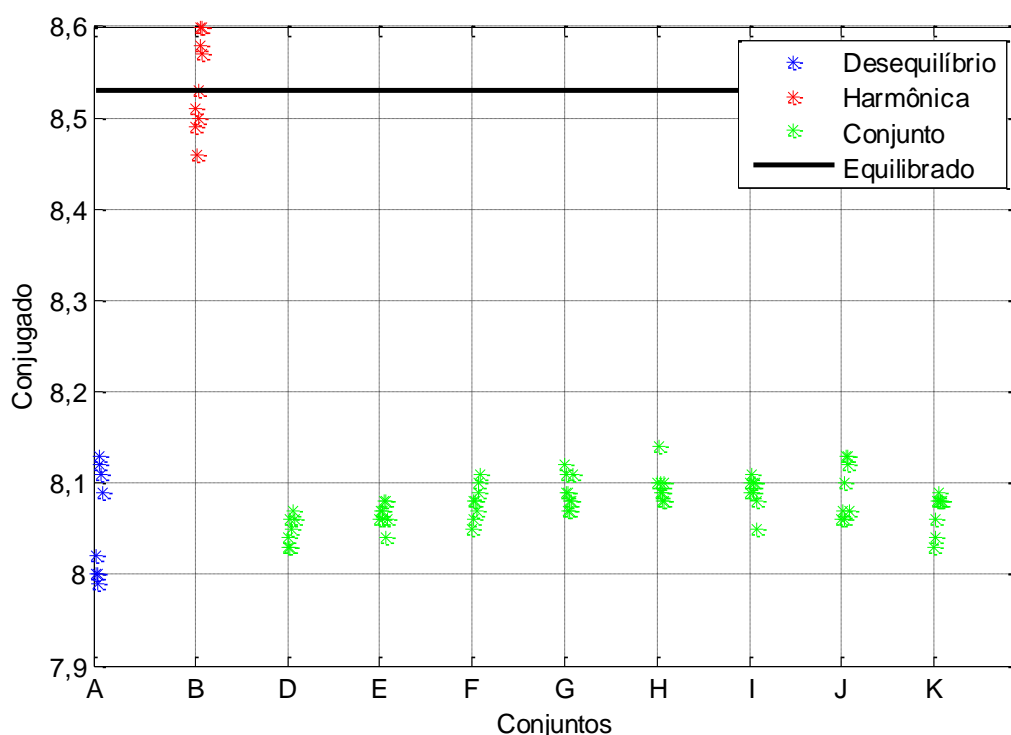


Figura 5.1 – Conjugado com a aplicação dos conjuntos A a K.

Nota-se na Figura 5.1, que a inserção de harmônica não afeta significativamente o conjugado, visto que os asteriscos representantes do conjunto B encontram-se em torno da reta indicativa da condição equilibrada. Por outro lado, os conjuntos A e de D a K estão relacionados com valores inferiores à condição equilibrada. Dessa forma, pode-se inferir que a inserção da distorção harmônica, proveniente de apenas uma ordem, em uma condição desequilibrada, não acarreta mudanças significativas ao valor do conjugado. De forma similar, a Figura 5.2 apresenta a mesma análise para o rendimento.

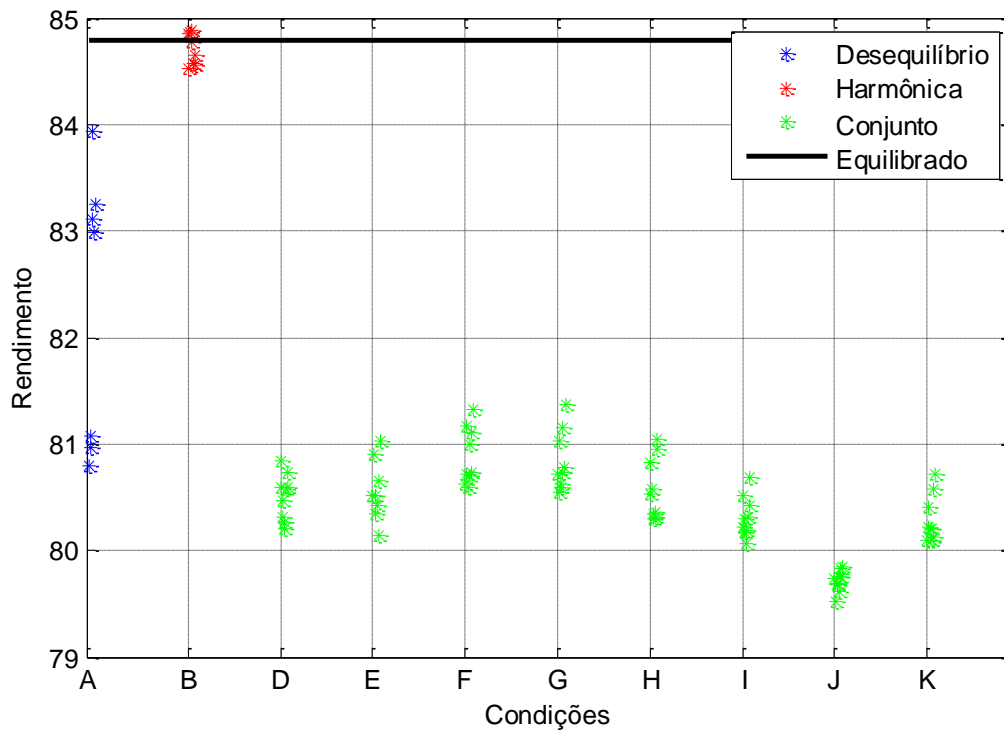


Figura 5.2 – Rendimento com a aplicação dos conjuntos de A a K.

Da Figura 5.2 nota-se, diferentemente ao encontrado para o conjugado, que a adição de harmônica a uma condição desequilibrada culmina na redução do valor do rendimento. Entretanto, como explorado no Capítulo 4 e confirmado pelos resultados do conjunto B, localizados em torno da reta indicativa da condição equilibrada, somente a inserção de uma ordem harmônica não promove efeitos expressivos. Porém, essa adição a tensões desequilibradas, culmina em uma redução do rendimento. Essa diminuição será quantificada com a apresentação da Tabela 5.5 ainda nesta seção.

A Figura 5.3 mostra o conjugado em função da variação do FD e do DTT. Nota-se nessa figura, que diferentes condições com o mesmo valor de FD e de DTT podem resultar em diversos conjugados. Assim como concluído no Capítulo 4, onde se constatou que o FD não é um bom indicador para relacionar a condição desequilibrada ao valor do conjugado, o FD e o DTT também não se mostraram bons indicadores dos efeitos encontrados quando há a presença simultânea dos dois mencionados distúrbios.

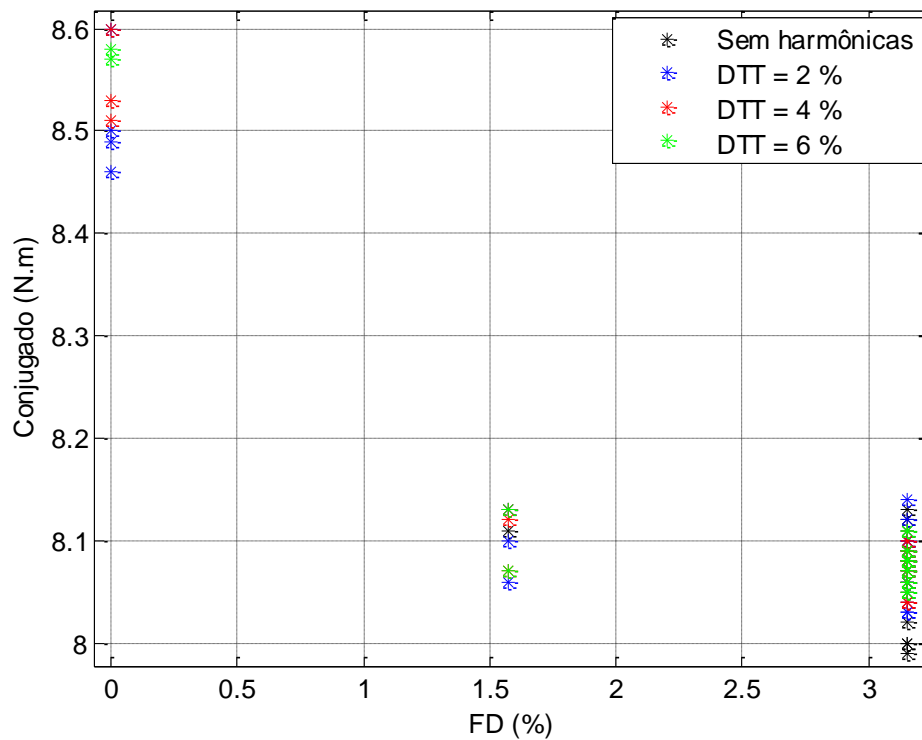


Figura 5.3 – Conjugado em função do FD e DTT para o BD2, BD4 e BD5.

Assim como a Figura 5.3, a Figura 5.4 mostra o rendimento em função da variação dos indicadores FD e DTT.

Da mesma forma que ilustrado para o conjugado, a Figura 5.4 mostra que o FD e o DTT não são bons indicadores para correlacionar a distorção harmônica e o desequilíbrio aos seus efeitos causados ao rendimento. Isso ocorre, pois, um valor fixo de FD e de DTT relaciona-se a diversos valores de rendimentos.

Para quantificar as análises feitas por meio dos gráficos das Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, a Tabela 5.5 revela os resultados da aplicação simultânea, dos dados do BD2 e do BD4, e da distorção harmônica de tensão, BD5. A primeira coluna dessa Tabela mostra o nome de cada conjunto de condições composto pela combinação de uma condição desequilibrada, apresentada na segunda coluna (Cond. Deseq.), combinada a uma das 9 condições com distorção harmônica (Cond. Harm.), especificada na terceira coluna.

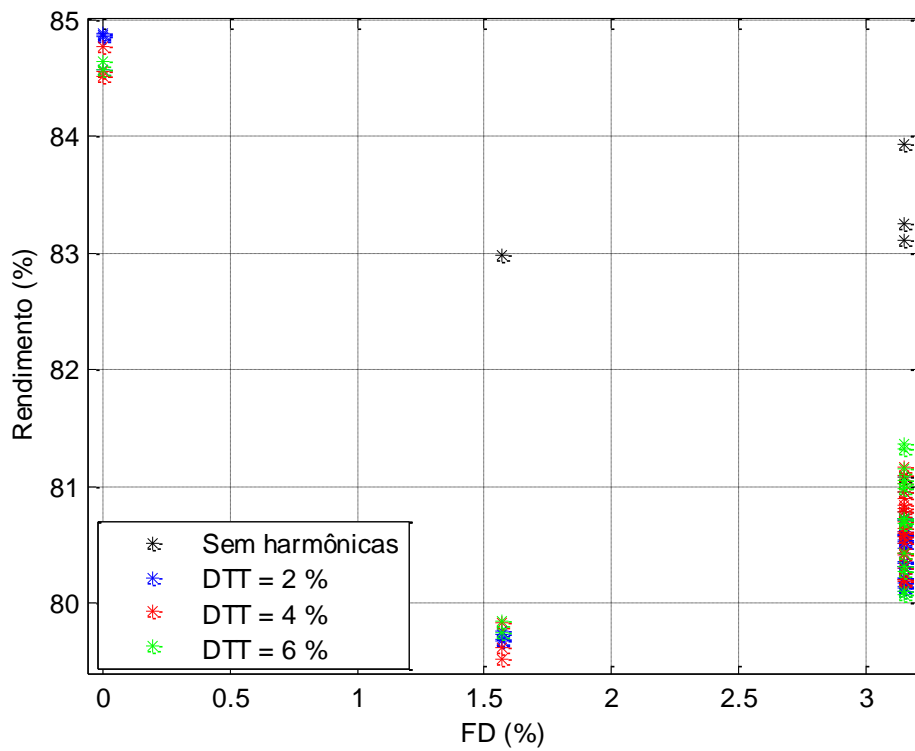


Figura 5.4 – Rendimento em função do FD e DTT para o BD2, BD4 e BD5.

Tabela 5.5 – Resultados da aplicação dos conjuntos de D à K

Conj.	Cond. Deseq.	Cond. Harm.	T (N.m)	η (%)	Conj.	Cond. Deseq.	Cond. Harm.	T (N.m)	η (%)
D	2	10	8,03	80,59	H	6	10	8,1	80,53
	2	11	8,04	80,84		6	11	8,10	80,82
	2	12	8,03	80,47		6	12	8,14	80,58
	2	13	8,06	80,31		6	13	8,10	80,35
	2	14	8,05	80,20		6	14	8,09	80,30
	2	15	8,05	80,27		6	15	8,09	80,31
	2	16	8,07	80,57		6	16	8,08	80,36
	2	17	8,06	80,60		6	17	8,10	80,95
	2	18	8,06	80,73		6	18	8,08	81,05
E	3	10	8,06	80,52	I	7	10	8,09	80,22
	3	11	8,07	80,90		7	11	8,10	80,52
	3	12	8,07	80,51		7	12	8,11	80,30

Tabela 5.5 – Resultados da aplicação dos conjuntos de D à K (continuação)

Conj.	Cond. Deseq.	Cond. Harm.	T (N.m)	η (%)	Conj.	Cond. Deseq.	Cond. Harm.	T (N.m)	η (%)
F	3	13	8,06	80,35	J	7	13	8,11	80,17
	3	14	8,08	80,43		7	14	8,10	80,19
	3	15	8,08	80,43		7	15	8,09	80,07
	3	16	8,04	80,14		7	16	8,10	80,32
	3	17	8,08	80,65		7	17	8,08	80,43
	3	18	8,06	81,03		7	18	8,05	80,69
	4	10	8,05	80,62		8	10	8,06	79,74
	4	11	8,06	81,17		8	11	8,07	79,52
	4	12	8,08	80,72		8	12	8,06	79,69
	4	13	8,08	80,59		8	13	8,10	79,68
	4	14	8,07	80,70		8	14	8,13	79,62
	4	15	8,07	80,99		8	15	8,13	79,75
	4	16	8,10	80,73		8	16	8,13	79,76
	4	17	8,09	81,1		8	17	8,12	79,83
G	4	18	8,11	81,33	8	18	8,07	79,85	
	5	10	8,12	80,72	K	9	10	8,03	80,10
	5	11	8,11	81,03		9	11	8,04	80,41
	5	12	8,09	80,54		9	12	8,06	80,22
	5	13	8,09	80,59		9	13	8,08	80,20
	5	14	8,07	80,62		9	14	8,09	80,20
	5	15	8,07	81,15		9	15	8,08	80,10
	5	16	8,08	80,73		9	16	8,08	80,13
	5	17	8,08	80,78		9	17	8,08	80,57
5	18	8,11	81,37	9		18	8,08	80,71	

Constata-se, na Tabela 5.5, uma pequena diferença entre os valores máximos e mínimos do conjugado (0,1 N.m) e do rendimento (1,85%) dos conjuntos de D a K, ou seja, 1,23% e 2,2%

dos seus valores nominais. Comparando os resultados da Tabela 5.5 com os da Tabela 5.1, onde se encontra a condição equilibrada, nota-se que ocorre uma redução mais acentuada no conjugado e no rendimento quando há presença do desequilíbrio e da distorção harmônica. Já em relação aos valores da Tabela 5.2, cujos valores são decorrentes da aplicação de tensões desequilibradas, a redução observada para o conjugado é pouco acentuada. Isso permite concluir que a inserção de desequilíbrio provoca maiores reduções que as harmônicas. No caso do rendimento, comparando com a Tabela 5.2, observa-se uma diminuição mais elevada com a inserção de harmônicas nos conjuntos de H a K (em média 16,15 vezes maior que o encontrado de D a G). Isso permite concluir que as maiores reduções de rendimento ocorrem quando se insere distorção harmônica nas condições com desequilíbrio de módulo e ângulo simultaneamente. Além disso, considerando as condições avaliadas, infere-se que o aumento no valor da distorção harmônica não culmina em reduções significativas para o conjugado e para o rendimento. A maior diminuição é observada quando se insere o distúrbio e não quando se aumenta o índice.

Quando se fala de análise conjunta de efeitos é importante avaliar como ocorre a interação entre eles. A Tabela 5.6 expõe as variações do conjugado e do rendimento para condições desequilibradas, com distorção harmônica e com ambos os fenômenos simultaneamente (conjuntos de D a K), com vistas a possibilitar essa análise. Os valores apresentados são as reduções, em porcentagem do valor nominal, em relação à condição equilibrada. As variações $\Delta T_{Des.}$, $\Delta T_{Harm.}$ e $\Delta T_{Conj.}$ representam a diferença, em relação à condição equilibrada, do valor do conjugado para a condição somente com desequilíbrio, somente com harmônicas e com os dois distúrbios simultaneamente, respectivamente. De maneira análoga, $\Delta \eta_{Des.}$, $\Delta \eta_{Harm.}$ e $\Delta \eta_{Conj.}$ são as variações para o rendimento.

Tabela 5.6 – Variações do conjugado e rendimento para condições desequilibradas, com distorção harmônica e com ambos os fenômenos simultaneamente.

Conj.	$\Delta T_{Des.}$ (%)	$\Delta T_{Harm.}$ (%)	$\Delta T_{Conj.}$ (%)	$\Delta \eta_{Des.}$ (%)	$\Delta \eta_{Harm.}$ (%)	$\Delta \eta_{Conj.}$ (%)	Conj.	$\Delta T_{Deseq.}$ (%)	$\Delta T_{Harm.}$ (%)	$\Delta T_{Conj.}$ (%)	$\Delta \eta_{Deseq.}$ (%)	$\Delta \eta_{Harm.}$ (%)	$\Delta \eta_{Conj.}$ (%)
D	6,30	0,49	6,17	4,76	0,59	4,99	H	4,94	0,49	5,31	1,02	0,59	5,07
	6,30	0,25	6,05	4,76	0,29	4,70		4,94	0,25	5,31	1,02	0,29	4,72
	6,30	0,86	6,17	4,76	1,03	5,14		4,94	0,86	4,81	1,02	1,03	5,01
	6,30	0,37	5,80	4,76	0,44	5,33		4,94	0,37	5,31	1,02	0,44	5,28
	6,30	0	5,93	4,76	0	5,46		4,94	0	5,43	1,02	0	5,34
	6,30	-0,62	5,93	4,76	-0,73	5,37		4,94	-0,62	5,43	1,02	-0,73	5,33
	6,30	-0,86	5,68	4,76	-1,03	5,02		4,94	-0,86	5,56	1,02	-1,03	5,27
	6,30	-0,86	5,80	4,76	-1,03	4,98		4,94	-0,86	5,31	1,02	-1,03	4,57
	6,30	-0,49	5,80	4,76	-0,59	4,83		4,94	-0,49	5,56	1,02	-0,59	4,45
E	6,54	0,49	5,80	4,76	0,59	5,08	I	5,06	0,49	5,43	2	0,59	5,43
	6,54	0,25	5,68	4,76	0,29	4,63		5,06	0,25	5,31	2	0,29	5,08
	6,54	0,86	5,68	4,76	1,03	5,09		5,06	0,86	5,19	2	1,03	5,34
	6,54	0,37	5,80	4,76	0,44	5,28		5,06	0,37	5,19	2	0,44	5,49
	6,54	0	5,56	4,76	0	5,18		5,06	0	5,31	2	0	5,47
	6,54	-0,62	5,56	4,76	-0,73	5,18		5,06	-0,62	5,43	2	-0,73	5,61
	6,54	-0,86	6,05	4,76	-1,03	5,53		5,06	-0,86	5,31	2	-1,03	5,32
	6,54	-0,86	5,56	4,76	-1,03	4,92		5,06	-0,86	5,56	2	-1,03	5,18
	6,54	-0,49	5,80	4,76	-0,59	4,47		5,06	-0,49	5,93	2	-0,59	4,88

Tabela 5.7 – Variações do conjugado e rendimento para condições desequilibradas, com distorção harmônica e com ambos os fenômenos simultaneamente. (continuação)

Conj.	$\Delta T_{Des.}$ (%)	$\Delta T_{Harm.}$ (%)	$\Delta T_{Conj.}$ (%)	$\Delta \eta_{Des.}$ (%)	$\Delta \eta_{Harm.}$ (%)	$\Delta \eta_{Conj.}$ (%)	Conj.	$\Delta T_{Deseq.}$ (%)	$\Delta T_{Harm.}$ (%)	$\Delta T_{Conj.}$ (%)	$\Delta \eta_{Deseq.}$ (%)	$\Delta \eta_{Harm.}$ (%)	$\Delta \eta_{Conj.}$ (%)
F	6,67	0,49	5,93	4,41	0,59	4,96	J	5,19	0,49	5,80	2,14	0,59	6,00
	6,67	0,25	5,80	4,41	0,29	4,30		5,19	0,25	5,68	2,14	0,29	6,27
	6,67	0,86	5,56	4,41	1,03	4,84		5,19	0,86	5,80	2,14	1,03	6,06
	6,67	0,37	5,56	4,41	0,44	4,99		5,19	0,37	5,31	2,14	0,44	6,08
	6,67	0	5,68	4,41	0	4,86		5,19	0	4,94	2,14	0	6,15
	6,67	-0,62	5,68	4,41	-0,73	4,52		5,19	-0,62	4,94	2,14	-0,73	5,99
	6,67	-0,86	5,31	4,41	-1,03	4,83		5,19	-0,86	4,94	2,14	-1,03	5,98
	6,67	-0,86	5,43	4,41	-1,03	4,39		5,19	-0,86	5,06	2,14	-1,03	5,90
	6,67	-0,49	5,19	4,41	-0,59	4,11		5,19	-0,49	5,68	2,14	-0,59	5,87
G	6,54	0,49	5,06	4,55	0,59	4,84	K	5,43	0,49	6,17	1,83	0,59	5,58
	6,54	0,25	5,19	4,55	0,29	4,47		5,43	0,25	6,05	1,83	0,29	5,21
	6,54	0,86	5,43	4,55	1,03	5,05		5,43	0,86	5,80	1,83	1,03	5,43
	6,54	0,37	5,43	4,55	0,44	4,99		5,43	0,37	5,56	1,83	0,44	5,46
	6,54	0	5,68	4,55	0	4,96		5,43	0	5,43	1,83	0	5,46
	6,54	-0,62	5,68	4,55	-0,73	4,33		5,43	-0,62	5,56	1,83	-0,73	5,58
	6,54	-0,86	5,56	4,55	-1,03	4,83		5,43	-0,86	5,56	1,83	-1,03	5,54
	6,54	-0,86	5,56	4,55	-1,03	4,77		5,43	-0,86	5,56	1,83	-1,03	5,02
	6,54	-0,49	5,19	4,55	-0,59	4,07		5,43	-0,49	5,56	1,83	-0,59	4,85

Nota-se da Tabela 5.6, considerando todas as condições, que as variações $\Delta T_{\text{conj.}}$ e $\Delta \eta_{\text{conj.}}$ atingem valores até 6,17% e 6,27%, respectivamente. Fazendo-se uma comparação entre as condições apresentadas nessa Tabela, observa-se que a inserção da distorção harmônica com apenas uma ordem não causa mudanças significativas no conjugado. A maior variação encontrada entre o resultado apenas com desequilíbrio e os valores de conjugado medidos com a presença de distorção harmônica é de 1,5%. Avaliando o rendimento, essa variação é um pouco maior, cerca de 4,3%. Dessa forma, ratifica-se que a inserção de harmônicas, a uma condição onde o desequilíbrio está presente, culmina em alterações maiores para o rendimento.

Ainda na Tabela 5.6, observa-se que a soma dos efeitos causados ao conjugado pela presença do desequilíbrio ($\Delta T_{\text{Des.}}$) e da distorção harmônica ($\Delta T_{\text{Harm.}}$) pode ser 1,4 vezes maior ou 1,3 vezes menor que o valor medido ($\Delta T_{\text{Conj.}}$) na atuação conjunta dos distúrbios. No caso do rendimento, a soma das reduções provocadas pela presença do desequilíbrio ($\Delta \eta_{\text{Des.}}$) e da distorção harmônica ($\Delta \eta_{\text{Harm.}}$) pode ser 1,13 vezes maior ou 500 vezes menor que o valor medido ($\Delta \eta_{\text{Conj.}}$) para a ocorrência simultânea. Dessa forma, infere-se que os efeitos verificados na presença simultânea dos fenômenos não correspondem à soma dos que foram observados individualmente. Adicionalmente, nota-se que, na maioria dos casos, a diminuição no rendimento medido com a aplicação conjunta dos distúrbios é bem maior que a soma dos efeitos. Isso permite concluir que o rendimento é uma grandeza mais sensível do que o conjugado.

As Figuras 5.5 e 5.6 são apresentadas com o objetivo tornar possível a avaliação da influência da ordem harmônica nos efeitos causados ao conjugado e ao rendimento, respectivamente, pela presença da distorção e do desequilíbrio.

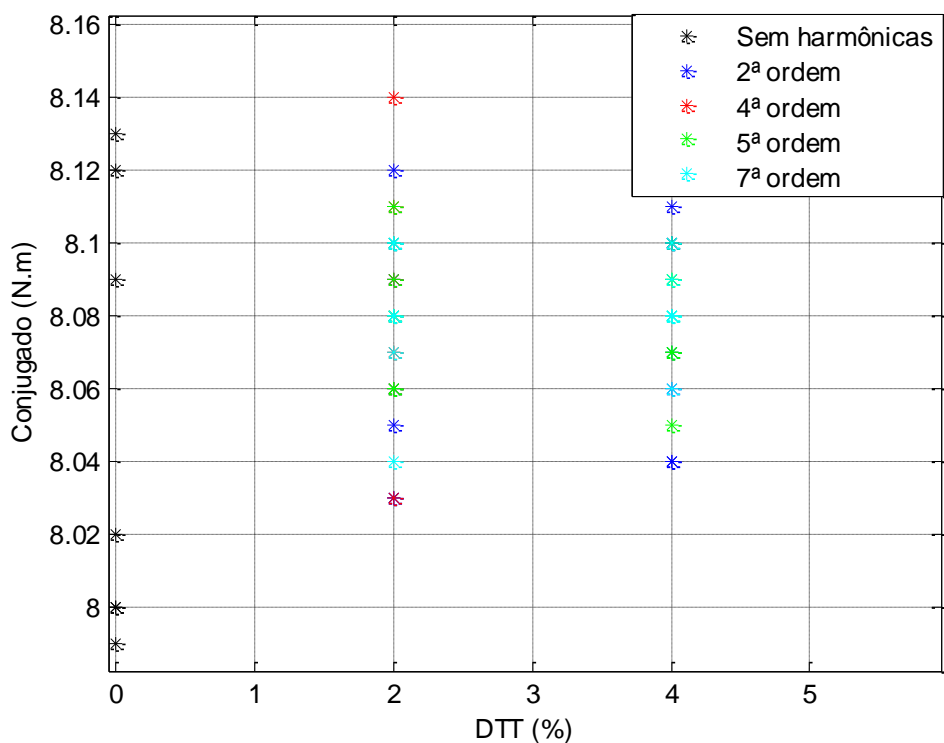


Figura 5.5 – Conjugado em função da DTT com cores para a ordem harmônica e FD = 3,5%.

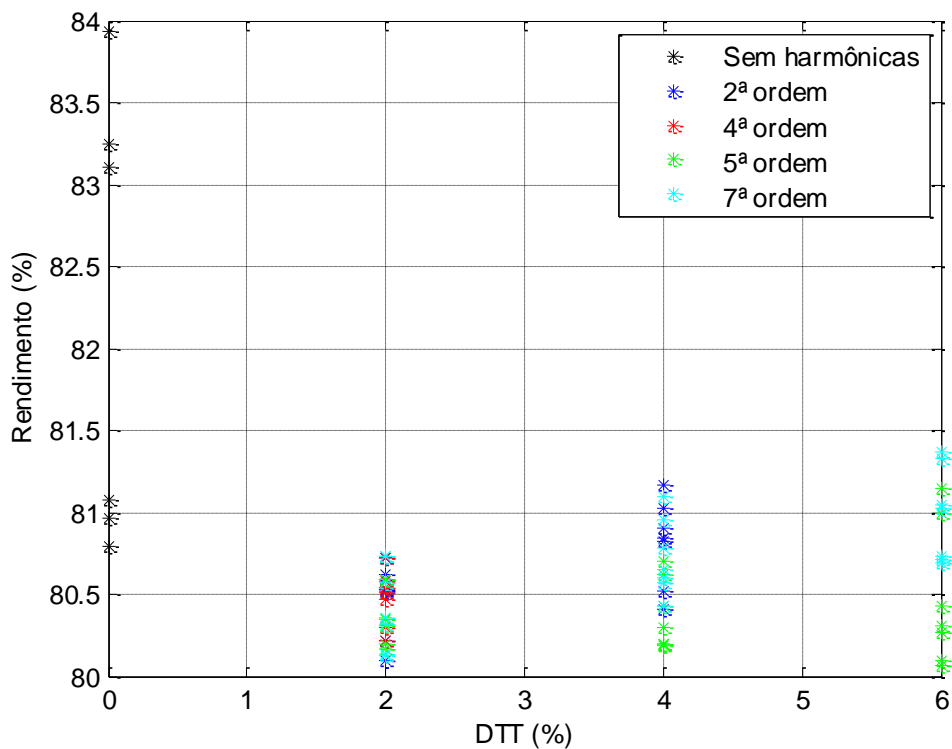


Figura 5.6 – Rendimento em função da DTT com cores para a ordem harmônica e FD = 3,5%.

Nota-se nas Figuras 5.5 e 5.6, que fixando o FD, a DTT e a ordem harmônica, têm-se diversos valores de conjugados e de rendimentos. Além disso, dentro dos limites estudados, não foi possível observar uma relação entre a ordem harmônica e os efeitos vistos nas grandezas avaliadas.

5.2.2 – Aplicação simultânea do BD2 e BD4 com o BD6

Como descrito no Capítulo 3, as condições da Tabela 5.4 são combinadas com as tensões desequilibradas do BD2 e do BD4, expostas na Tabela 5.2, para originar os conjuntos de L a S. Os resultados com a aplicação desses dados para o conjugado e para o rendimento estão apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente.

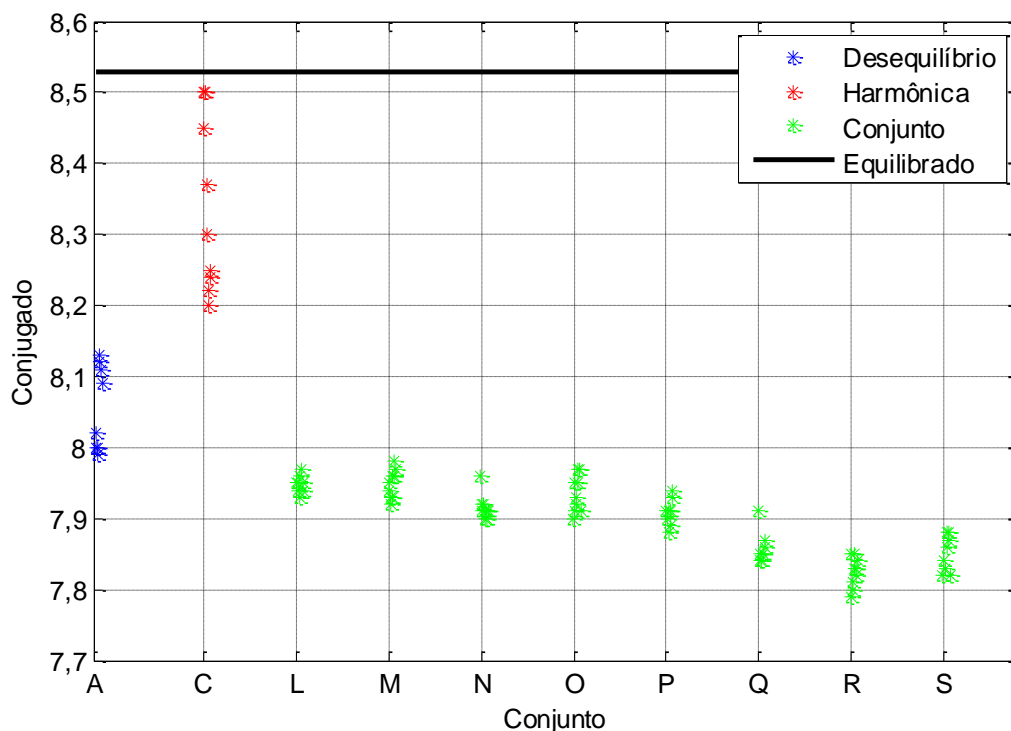


Figura 5.7 – Conjugado com a aplicação do BD2, BD4 e BD6 individual e simultaneamente.

Na Figura 5.7, observa-se o desequilíbrio sendo mais nocivo ao conjugado do que a distorção harmônica. Além disso, confrontando-se os resultados da aplicação individual dos distúrbios no MIT, conjuntos A e C, com a ocorrência simultânea dos dois fenômenos, L a S, percebe-se que as maiores reduções do conjugado ocorrem na última situação.

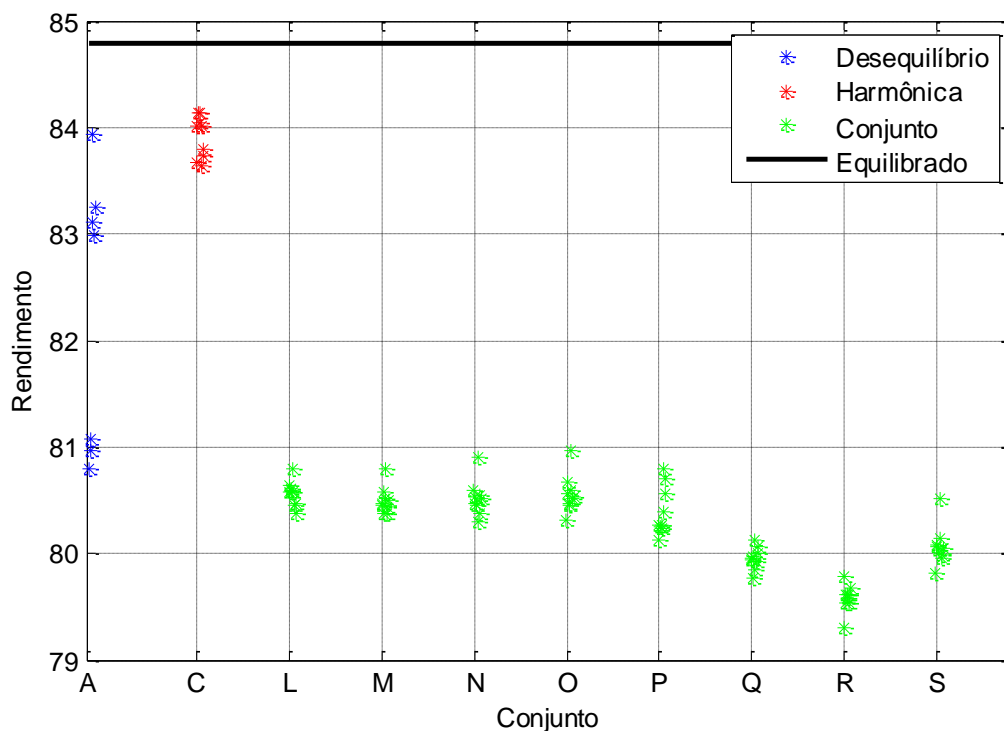


Figura 5.8 – Rendimento com a aplicação do BD2, BD4 e BD6 individual e simultaneamente.

Como mostra a Figura 5.8, da mesma forma que encontrado para o conjugado, quando avalia-se a presença de apenas um distúrbio, o desequilíbrio é o mais nocivo ao rendimento do motor. Além disso, a aplicação conjunta dos fenômenos é a situação onde se tem uma maior redução no valor do rendimento. Para avaliar a eficácia dos índices utilizados na quantificação do desequilíbrio e da distorção harmônica, as Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os valores do conjugado e do rendimento, respectivamente, em função da variação do FD e do DTT.

Nota-se na Figura 5.9 que quando se fixa o FD e o DTT, têm-se diversos valores de conjugado. Como concluído no Capítulo 4, o FD não é um bom indicador para relacionar a condição desequilibrada ao valor do conjugado. Quando se tem a presença conjunta de distúrbios, o FD e o DTT não se apresentam como bons indicadores para distinguir os efeitos encontrados no MIT.

Assim como analisado na Figura 5.6, a Figura 5.10 ratifica a ineficiência dos índices FD e DTT para quantificar o efeito causado no rendimento por uma condição desequilibrada e com harmônicas.

Com o objetivo de tornar as análises mais precisas, a Tabela 5.7 traz os resultados medidos com a aplicação simultânea de condições dos bancos de dados com desequilíbrio, BD2 e BD4, e com distorção harmônica, BD6.

Tabela 5.8 – Resultados da aplicação dos conjuntos de K a R

Conj.	Deseq.	Harm.	T (N.m)	η (%)	Conj.	Deseq.	Harm.	T (N.m)	η (%)
L	2	19	7,95	80,58	P	6	19	7,91	80,27
	2	20	7,95	80,64		6	20	7,91	80,12
	2	21	7,94	80,61		6	21	7,90	80,25
	2	22	7,95	80,6		6	22	7,91	80,24
	2	23	7,93	80,58		6	23	7,88	80,26
	2	24	7,96	80,79		6	24	7,89	80,80
	2	25	7,97	80,45		6	25	7,91	80,39
	2	26	7,95	80,38		6	26	7,94	80,70
	2	27	7,94	80,47		6	27	7,93	80,56
M	3	19	7,95	80,45	Q	7	19	7,91	79,94
	3	20	7,94	80,47		7	20	7,91	79,96
	3	21	7,93	80,58		7	21	7,84	79,77
	3	22	7,92	80,37		7	22	7,85	79,97
	3	23	7,93	80,52		7	23	7,84	79,84
	3	24	7,96	80,79		7	24	7,84	80,12
	3	25	7,98	80,44		7	25	7,85	79,92
	3	26	7,96	80,37		7	26	7,87	80,07
	3	27	7,97	80,50		7	27	7,86	80,01
N	4	19	7,96	80,59	R	8	19	7,85	79,79
	4	20	7,92	80,53		8	20	7,79	79,30

Tabela 5.7 – Resultados da aplicação dos conjuntos de K a R (continuação)

Conj.	Deseq.	Harm.	T (N.m)	η (%)	Conj.	Deseq.	Harm.	T (N.m)	η (%)
N	4	21	7,91	80,47	R	8	21	7,80	79,62
	4	22	7,92	80,45		8	22	7,81	79,53
	4	23	7,90	80,30		8	23	7,83	79,61
	4	24	7,91	80,90		8	24	7,85	79,58
	4	25	7,90	80,38		8	25	7,83	79,62
	4	26	7,91	80,55		8	26	7,82	79,54
	4	27	7,91	80,52		8	27	7,84	79,68
O	5	19	7,90	80,31	S	9	19	7,82	79,82
	5	20	7,91	80,56		9	20	7,84	80,07
	5	21	7,95	80,67		9	21	7,84	80,08
	5	22	7,93	80,47		9	22	7,83	80,04
	5	23	7,92	80,45		9	23	7,86	80,15
	5	24	7,95	80,96		9	24	7,88	80,52
	5	25	7,97	80,59		9	25	7,87	79,95
	5	26	7,97	80,52		9	26	7,88	79,99
	5	27	7,91	80,53		9	27	7,82	80,05

Como visto na seção anterior, comparando-se a Tabela 5.7 com a 5.2, constata-se que as reduções mais acentuadas no conjugado e no rendimento são encontradas para as situações com desequilíbrio de módulo e ângulo, ou seja, os conjuntos de P a S. Nestas condições, a diminuição é, em média, 10,23 vezes maior que de L a O. Também concordando com as conclusões da seção anterior, para a faixa de valores estudada, o aumento do DTT não provoca reduções significativas no conjugado e no rendimento.

Quando se fala de análise conjunta de efeitos é importante avaliar como ocorre a interação entre eles. A Tabela 5.8 expõe os resultados para possibilitar essa avaliação. Os valores apresentados são as reduções, em porcentagem do valor nominal, em relação à condição equilibrada. As variações $\Delta T_{Des.}$, $\Delta T_{Harm.}$, $\Delta T_{Conj.}$, $\Delta \eta_{Des.}$, $\Delta \eta_{Harm.}$ e $\Delta \eta_{Conj.}$ são as mesmas apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.9 – Variações do conjugado e rendimento para condições desequilibradas, com distorção harmônica e com ambos os fenômenos simultaneamente

Conj.	$\Delta T_{Des.}$ (%)	$\Delta T_{Harm.}$ (%)	$\Delta T_{Conj.}$ (%)	$\Delta \eta_{Des.}$ (%)	$\Delta \eta_{Harm.}$ (%)	$\Delta \eta_{Conj.}$ (%)	Conj.	$\Delta T_{Deseq.}$ (%)	$\Delta T_{Harm.}$ (%)	$\Delta T_{Conj.}$ (%)	$\Delta \eta_{Deseq.}$ (%)	$\Delta \eta_{Harm.}$ (%)	$\Delta \eta_{Conj.}$ (%)
L	6,30	0,37	7,16	4,76	0,92	5,01	P	4,94	0,37	7,65	1,02	0,92	5,37
	6,30	0,99	7,16	4,76	1,33	4,93		4,94	0,99	7,65	1,02	1,33	5,55
	6,30	0,37	7,28	4,76	0,78	4,97		4,94	0,37	7,78	1,02	0,78	5,40
	6,30	1,98	7,16	4,76	0,78	4,98		4,94	1,98	7,65	1,02	0,78	5,41
	6,30	2,84	7,41	4,76	0,88	5,01		4,94	2,84	8,02	1,02	0,88	5,39
	6,30	3,83	7,04	4,76	1,37	4,76		4,94	3,83	7,90	1,02	1,37	4,74
	6,30	4,07	6,91	4,76	0,92	5,16		4,94	4,07	7,65	1,02	0,92	5,23
	6,30	3,58	7,16	4,76	1,18	5,24		4,94	3,58	7,28	1,02	1,18	4,86
	6,30	3,46	7,28	4,76	1,25	5,14		4,94	3,46	7,41	1,02	1,25	5,03
M	6,54	0,37	7,16	4,76	0,92	5,16	Q	5,06	0,37	7,65	2	0,92	5,77
	6,54	0,99	7,28	4,76	1,33	5,14		5,06	0,99	7,65	2	1,33	5,74
	6,54	0,37	7,41	4,76	0,78	5,01		5,06	0,37	8,52	2	0,78	5,97
	6,54	1,98	7,53	4,76	0,78	5,26		5,06	1,98	8,40	2	0,78	5,73
	6,54	2,84	7,41	4,76	0,88	5,08		5,06	2,84	8,52	2	0,88	5,89
	6,54	3,83	7,04	4,76	1,37	4,76		5,06	3,83	8,52	2	1,37	5,55
	6,54	4,07	6,79	4,76	0,92	5,17		5,06	4,07	8,40	2	0,92	5,79
	6,54	3,58	7,04	4,76	1,18	5,26		5,06	3,58	8,15	2	1,18	5,61
	6,54	3,46	6,91	4,76	1,25	5,10		5,06	3,46	8,27	2	1,25	5,68

Tabela 5.8 – Variações do conjugado e rendimento para condições desequilibradas, com distorção harmônica e com ambos os fenômenos simultaneamente (continuação)

Conj.	$\Delta T_{Des.}$ (%)	$\Delta T_{Harm.}$ (%)	$\Delta T_{Conj.}$ (%)	$\Delta \eta_{Des.}$ (%)	$\Delta \eta_{Harm.}$ (%)	$\Delta \eta_{Conj.}$ (%)	Conj.	$\Delta T_{Deseq.}$ (%)	$\Delta T_{Harm.}$ (%)	$\Delta T_{Conj.}$ (%)	$\Delta \eta_{Deseq.}$ (%)	$\Delta \eta_{Harm.}$ (%)	$\Delta \eta_{Conj.}$ (%)
N	6,67	0,37	7,04	4,41	0,92	4,99	R	5,19	0,37	8,40	2,14	0,92	5,95
	6,67	0,99	7,53	4,41	1,33	5,07		5,19	0,99	9,14	2,14	1,33	6,53
	6,67	0,37	7,65	4,41	0,78	5,14		5,19	0,37	9,01	2,14	0,78	6,15
	6,67	1,98	7,53	4,41	0,78	5,16		5,19	1,98	8,89	2,14	0,78	6,25
	6,67	2,84	7,78	4,41	0,88	5,34		5,19	2,84	8,64	2,14	0,88	6,16
	6,67	3,83	7,65	4,41	1,37	4,63		5,19	3,83	8,40	2,14	1,37	6,20
	6,67	4,07	7,78	4,41	0,92	5,24		5,19	4,07	8,64	2,14	0,92	6,15
	6,67	3,58	7,65	4,41	1,18	5,04		5,19	3,58	8,77	2,14	1,18	6,24
	6,67	3,46	7,65	4,41	1,25	5,08		5,19	3,46	8,52	2,14	1,25	6,08
O	6,54	0,37	7,78	4,55	0,92	5,33	S	5,43	0,37	8,77	1,83	0,92	5,91
	6,54	0,99	7,65	4,55	1,33	5,03		5,43	0,99	8,52	1,83	1,33	5,61
	6,54	0,37	7,16	4,55	0,78	4,90		5,43	0,37	8,52	1,83	0,78	5,60
	6,54	1,98	7,41	4,55	0,78	5,14		5,43	1,98	8,64	1,83	0,78	5,65
	6,54	2,84	7,53	4,55	0,88	5,16		5,43	2,84	8,27	1,83	0,88	5,52
	6,54	3,83	7,16	4,55	1,37	4,55		5,43	3,83	8,02	1,83	1,37	5,08
	6,54	4,07	6,91	4,55	0,92	4,99		5,43	4,07	8,15	1,83	0,92	5,76
	6,54	3,58	6,91	4,55	1,18	5,08		5,43	3,58	8,02	1,83	1,18	5,71
	6,54	3,46	7,65	4,55	1,25	5,07		5,43	3,46	8,77	1,83	1,25	5,64

Nota-se na Tabela 5.8 que as variações ΔT e $\Delta \eta$ atingem valores até 9,14% e 6,53% dos seus respectivos valores nominais. Além disso, observa-se que, no caso das condições do BD6 e comparando com os resultados da Tabela 5.2, a inserção de harmônicas às condições desequilibradas sempre culmina em uma redução do conjugado e do rendimento. Comparando com as condições onde se tem apenas desequilíbrio, encontram-se reduções de até 4% e 4,5% do valor nominal para o conjugado e o rendimento, respectivamente.

Os valores máximos da Tabela 5.8 são aproximadamente 1,48% maiores para o conjugado e 1,04% para o rendimento, respectivamente, do que os valores exibidos na Tabela 5.5. Em relação a diminuição encontrada na comparação entre a condição desequilibrada e a conjunta, na Tabela 5.8 é possível observar reduções de até 2,66% maiores para o conjugado e 1,05% para o rendimento.

Ainda na Tabela 5.8, observa-se que a soma dos efeitos causados ao conjugado pela presença do desequilíbrio ($\Delta T_{Des.}$) e da distorção harmônica ($\Delta T_{Harm.}$) pode ser 1,5 vezes maior ou 1,6 vezes menor que o valor medido ($\Delta T_{Conj.}$). No caso do rendimento, a soma das reduções provocadas pela presença do desequilíbrio ($\Delta \eta_{Des.}$) e da distorção harmônica ($\Delta \eta_{Harm.}$) pode ser 1,29 vezes maior ou 3 vezes menor que o valor medido ($\Delta \eta_{Conj.}$). Da mesma forma que na seção anterior, infere-se que não há tendência dos efeitos verificados na presença simultânea dos fenômenos corresponderem à soma dos que foram observados individualmente. Adicionalmente, nota-se que, na maioria dos casos, as diferenças encontradas entre a sobreposição dos efeitos e o valor medido para os dois distúrbios ocorrendo concomitantemente são maiores para o rendimento, sendo a queda no valor real superior ao resultado da adição das diminuições das medições individuais.

As Figuras 5.9 e 5.10 são apresentadas com o objetivo de avaliar a influência da ordem harmônica nos efeitos causados ao conjugado e ao rendimento, respectivamente, pela presença da distorção.

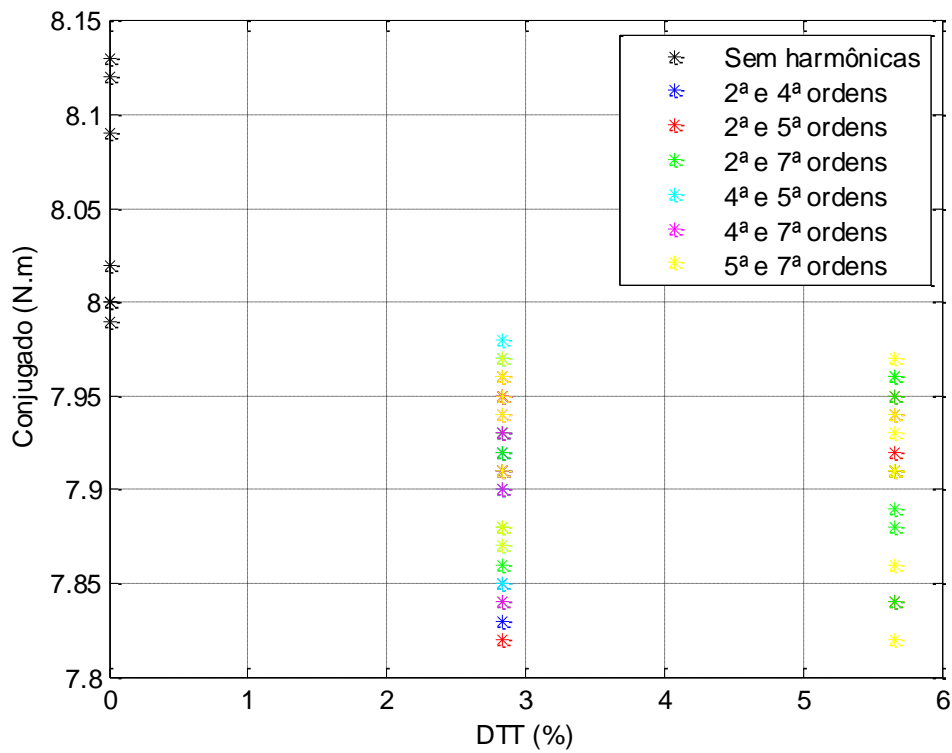


Figura 5.11 – Conjugado em função do DTT com cores para a ordem harmônica e FD = 3,5%.

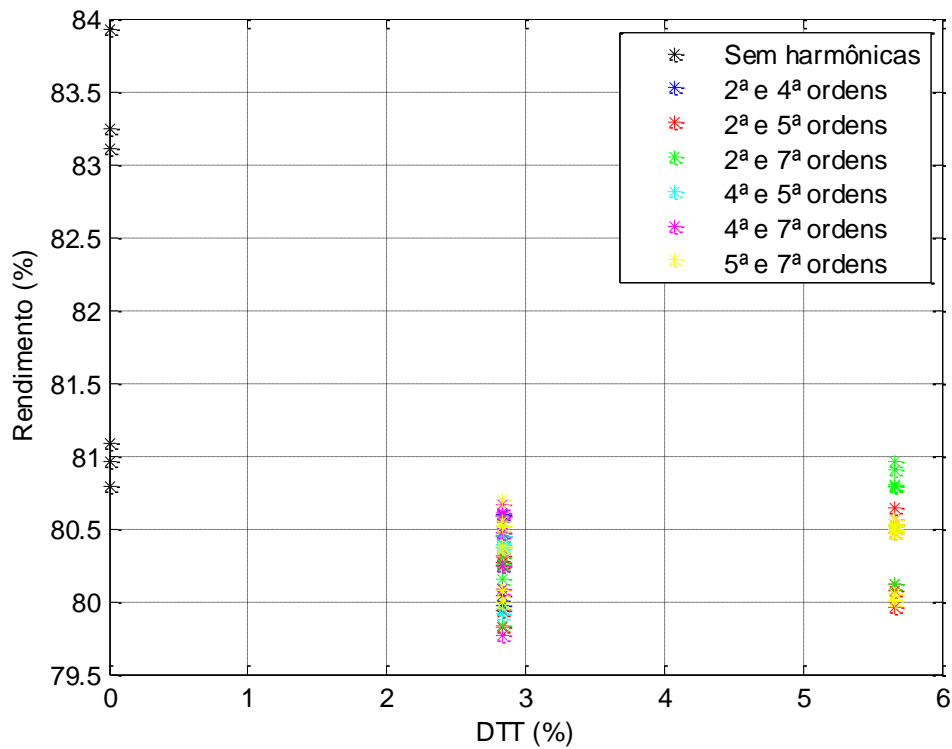


Figura 5.12 – Rendimento em função do DTT com cores para a ordem harmônica e FD = 3,5%.

Nota-se nas Figuras 5.5 e 5.6, que se fixando o FD, a DTT e a ordem harmônica, têm-se diversos valores de conjugados e de rendimentos. Além disso, dentro dos limites estudados, não foi possível observar uma relação entre a ordem harmônica e os efeitos vistos nas grandezas avaliadas.

5.3 – Principais resultados

A comparação entre os resultados de todos os bancos de dados será feita utilizando-se a Tabela 5.9. As colunas $\Delta T_{\text{máxima}}$ e $\Delta T_{\text{média}}$ representam as variações, máxima e média, obtidas por meio da diferença entre o valor da condição equilibrada e o menor conjugado encontrado, ou a média dos conjugados encontrados, respectivamente. De maneira análoga, as variáveis $\Delta \eta_{\text{máxima}}$ e $\Delta \eta_{\text{média}}$ são as variações máxima e média para o rendimento. Os valores apresentados nessa Tabela são referentes às condições cujo V_1 ou tensão na fundamental são iguais a 220 V.

Tabela 5.10 – Variações médias e máximas do conjugado e do rendimento para todos os bancos de dados

Banco de Dados	$\Delta T_{\text{máxima}}$ (%)	$\Delta T_{\text{média}}$ (%)	$\Delta \eta_{\text{máxima}}$ (%)	$\Delta \eta_{\text{média}}$ (%)
2	6,93	3,47	5,15	3,07
4	5,43	3,62	2,57	0,95
5	0,87	0	0,56	0,12
6	4,2	2,59	1,43	1,03
2 e 4 com 5	6,17	5,56	6,27	5,15
2 e 4 com 6	9,14	7,79	6,53	5,37

Comparando as variações encontradas na Tabela 5.9, nota-se que os casos onde há desequilíbrio e distorção harmônica, BD2 e BD4 com BD5 e BD2 e BD4 com BD6, possuem as maiores reduções médias ($\Delta T_{\text{média}}$ e $\Delta \eta_{\text{média}}$). Analisando as alterações máximas, o banco de dados com desequilíbrio e harmônicas de duas ordens resulta nas maiores variações máximas ($\Delta T_{\text{máxima}}$ e $\Delta \eta_{\text{máxima}}$). Dessa forma, conclui-se que a tendência é haver maiores atenuações no valor do conjugado e do rendimento quando há desequilíbrio e distorção simultaneamente.

Avaliando os valores médios ($\Delta T_{\text{média}}$ e $\Delta \eta_{\text{média}}$) da Tabela 5.9, nota-se que a soma das variações individuais dos bancos de dados BD2 ou BD4 com o BD5 ou BD6 sempre resulta em valores menores do que a média das medições com a aplicação conjunta. Com isso, permite-se concluir que a interação dos distúrbios não resulta em uma sobreposição de efeitos, mas sim em algo maior. Com essa conclusão, sugere-se uma averiguação quanto a conformidade dos limites estabelecidos nas normas.

5.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou de forma detalhada os resultados de conjugado e rendimento obtidos com a aplicação simultânea da combinação dos bancos de dados BD2 e BD4 com o BD5 e o BD6, conforme explicitado no Capítulo 3. Adicionalmente, expõe-se uma tabela com os principais resultados de todos os bancos de dados para viabilizar a comparação.

Os conjuntos de D a K mostram que, em relação a condição equilibrada, ocorre uma redução mais acentuada no conjugado e no rendimento quando há presença do desequilíbrio e da distorção harmônica simultaneamente. Porém, quando a inserção da distorção harmônica é proveniente de apenas uma ordem, a redução do conjugado em relação a condição desequilibrada é pouco acentuada. Isso permite concluir que a inserção de desequilíbrio provoca maiores reduções que as harmônicas. No caso do rendimento, observa-se uma diminuição mais elevada com a inserção de harmônicas nos conjuntos de H a K, ou seja, as maiores reduções ocorrem quando se insere distorção harmônica nas condições com desequilíbrio de módulo e ângulo simultaneamente. Já para os casos onde houve a inserção de harmônicas, de duas ordens diferentes, em condições desequilibradas, o resultado sempre foi uma redução do conjugado e do rendimento. Além disso, considerando as condições avaliadas, infere-se que o aumento no valor da distorção harmônica não culmina em reduções significativas para o conjugado e para o rendimento.

A avaliação conjunta dos distúrbios revela que a inserção de harmônicas, a uma condição onde o desequilíbrio está presente, culmina em alterações maiores para o rendimento do que para o conjugado. Além disso, infere-se que os efeitos provocados pela presença simultânea do desequilíbrio e da distorção harmônica não correspondem à soma dos efeitos causados

individualmente. Adicionalmente, não foi possível observar uma relação entre a ordem harmônica e os efeitos vistos nas grandezas avaliadas.

Em relação aos índices FD e DTT, eles não se mostraram bons indicadores dos efeitos encontrados quando há a presença simultânea dos dois mencionados distúrbios.

Capítulo 6 – Conclusões

Para facilitar a identificação das contribuições dessa dissertação, esse capítulo está centrado numa síntese das principais conclusões obtidas com as análises expostas ao longo do texto. Adicionalmente são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

As conclusões que serão apresentadas foram obtidas com a análise das medições realizadas em laboratório. Os ensaios experimentais compreenderam a aplicação, sobre um MIT conectado em delta, de seis bancos de dados, a saber: BD1 composto por tensões equilibradas, BD2 formado por tensões desequilibradas apenas em suas magnitudes, BD3 constituído por tensões desequilibradas apenas em seus ângulos, BD4 com desequilíbrio nos módulos e ângulos das tensões, BD5 composto por distorção harmônica de uma ordem e, por fim, o BD6 com distorção harmônica proveniente de duas ordens. A aplicação conjunta de distúrbios utilizou uma combinação do BD2, BD4, BD5 e BD6.

No Capítulo 1, houve uma abordagem introdutória do tema estudado para situar o leitor no contexto que essa dissertação se insere. Nele, foram expostos os objetivos pretendidos com as análises ora realizadas, enumeraram-se as principais contribuições e, por fim, exibiu-se a estrutura utilizada no presente trabalho.

O Capítulo 2 exibiu a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Foram indicados os conceitos e as definições acerca do desequilíbrio e a distorção harmônica de tensão. Ressaltou-se as causas para o surgimento de cada um dos mencionados fenômenos, seus efeitos, os métodos utilizados para a quantificação e as normas mais relevantes que envolvem esses distúrbios. Ao final, foi exibido o estado da arte sobre esse tema. Foram ainda exploradas as contribuições dos trabalhos mais relevantes a respeito desse assunto.

O Capítulo 3 descreveu a estrutura utilizada para os ensaios laboratoriais, desde a geração das tensões de forma controlada até a forma de aquisição das grandezas analisadas. Além disso, foi demonstrada a metodologia empregada na criação dos bancos de dados empregados nas análises apresentadas ao longo do texto.

Com a análise do BD1 exposta no Capítulo 4, conclui-se que o conjugado aumenta com uma elevação na tensão de sequência positiva. O BD2 mostrou que, para um valor fixo de V_1 , quanto menor for a tensão de sequência negativa, maior será o conjugado. Esta conclusão também pode ser estendida ao rendimento. A presença de V_2 não só faz fluir I_2 , como seu aumento culmina na elevação de I_2 e na diminuição de I_1 , considerando um valor fixo de V_1 . Observou-se também que a inserção de V_2 aumenta o intervalo de variação do conjugado, do rendimento, das potências de entrada e de saída para um determinado valor de V_1 . Além disso, o incremento de V_2 leva a uma redução na potência de entrada e de saída. O BD3 evidencia que os ângulos desequilibrados não mudam o valor do conjugado e do rendimento.

No Capítulo 4, verificou-se que o FD não é um bom indicador para relacionar o desequilíbrio com os efeitos no conjugado e no rendimento. No entanto, I_2 mostrou-se um bom indicador para o valor do conjugado. A corrente I_2 será maior, quanto mais baixo for o conjugado, e para um determinado valor de I_2 , há um intervalo muito pequeno de variação do conjugado.

Ainda no Capítulo 4, comparando o BD5 com o BD6, nota-se que a presença de duas harmônicas de frequências diferentes causa mais efeitos que apenas uma ordem. Além disso, fica evidente em vários casos que a alteração do valor da tensão na fundamental é mais prejudicial do que a inserção de harmônicas. Dessa forma, conclui-se que a influência dos fenômenos aplicados isoladamente é pequena, sendo desprezível em alguns casos.

O Capítulo 5 mostrou que a inserção de somente uma ordem harmônica não promove efeitos expressivos. Porém, harmônicas de uma ordem somadas a tensões desequilibradas culminam, na maioria dos casos, em uma redução do conjugado e do rendimento. Já quando são inseridas duas ordens harmônicas, sempre haverá diminuição do valor encontrado dessas grandezas em relação às condições contendo somente desequilíbrio.

No Capítulo 5, observou-se que ocorre uma redução considerável no conjugado e no rendimento devido à presença do desequilíbrio e da distorção harmônica, quando comparado com os valores obtidos com a condição equilibrada. Adicionalmente, constatou-se que, comparando com o conjugado, o rendimento é mais sensível a inserção de harmônicas e desequilíbrio. Notou-se ainda que as maiores reduções de rendimento ocorrem quando se insere distorção harmônica nas condições com desequilíbrio de módulo e ângulo. Além disso,

considerando os limites avaliados, infere-se que o aumento no valor da distorção harmônica não culmina em reduções significativas para o conjugado e para o rendimento.

Ainda no Capítulo 5, observou-se que o FD, a DTT e a ordem harmônica não são bons indicadores dos efeitos causados no conjugado e no rendimento pela presença simultânea dos distúrbios. Concluiu-se também, comparando os bancos de dados BD2, BD4, BD5 e BD6, que as maiores reduções no conjugado e no rendimento concentram-se em BD2 e BD4. As análises mostram diminuições mais acentuadas, em média, nos casos onde há desequilíbrio e distorção harmônica. Analisando as alterações máximas, o desequilíbrio com distorção harmônica de duas ordens geram as maiores reduções. Dessa forma, considerando-se os casos avaliados no presente trabalho, conclui-se que há uma grande probabilidade das maiores atenuações no valor do conjugado e do rendimento ocorrerem quando há desequilíbrio e distorção simultaneamente.

Em relação à interação dos distúrbios avaliada no Capítulo 5, os efeitos provocados pela presença simultânea do desequilíbrio e da distorção harmônica não correspondem à soma dos efeitos causados individualmente. Em média, a soma dos efeitos é menor que o valor medido para o conjugado e para o rendimento. Com isso, permite-se concluir que a interação dos distúrbios não resulta em uma sobreposição de efeitos, mas sim em algo maior. Esta análise é útil para despertar o interesse em verificar a adequação dos limites individuais hoje estabelecidos pelas normas que versam sobre desequilíbrio de tensão e harmônicas, para condições em que estes fenômenos se manifestam simultaneamente na rede elétrica.

6.1 – Propostas de trabalhos futuros

Para dar continuidade a essa linha de pesquisa e com o intuito de preencher as lacunas identificadas na literatura atual, os seguintes trabalhos futuros são propostos:

- Fazer a análise dos efeitos do conjugado e do rendimento considerando limites mais elevados para o FD e o DTT;
- Averiguar se outros motores apresentam o mesmo comportamento apresentado nessa dissertação;

- Analisar o comportamento do motor quando este é submetido a distorções harmônicas em frequências não múltiplas da fundamental;
- Elaborar um modelo do circuito equivalente monofásico do MIT que seja capaz de reproduzir resultados satisfatórios quando houver uma alimentação com desequilíbrio e distorção harmônica;
- Avaliar os efeitos de outros distúrbios aplicados conjuntamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, J.P.G., Emanuel, A.E. (2000). “Induction Motors Loss of Life Due to Voltage Imbalance and Harmonics: A Preliminary Study” Publicado em: 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, vol. 1, p. 75-80.
- ABREU, J.P.G., Emanuel, A.E. (2001). “Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and Its Estimated Cost.” Publicado em: IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, n° 1.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (2012) “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.” Revisão 4, data de vigência: fevereiro de 2012 a dezembro de 2014.
- BEATY, H. W., Santoso, S., Dugan, R. C. E Mcgranaghan, M. F. (2002) “Electric Power Systems Quality”, 2. ed., Mcgraw-hill.
- BRITO, C. M. C. e Leão, R. P. S. (2006) “Desempenho de um Motor de Indução Trifásico Submetido a Distorções Harmônicas na Tensão de Alimentação” Publicado em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.
- DUARTE, S. X., Kagan, N. (2010) “A Power-Quality Index to Assess the Impact of Voltage Harmonic Distortions and Unbalance to Three-Phase Induction Motors.” Publicado em: IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 25, n° 3, p. 1846-1854.
- FAIZ, J., Ebrahimpour, H. (2005) “Precise derating of three-phase induction motors with unbalanced voltages.” Publicado em: Conference Record of the 2005: Industry Applications Conference; Fourtieth IAS Annual Meeting, vol. 1, p. 485-491.
- FAIZ, J., Ebrahimpour, H., Pillay, P. (2004) “Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor.” Publicado em: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, n° 4, p. 657-662.

- FERREIRA Filho, A. L. (2008) “Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio frente à Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão.” Tese de Doutorado, Universidade de Brasília.
- FORTESCUE, C.L. (1918) “Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks.” Publicado em: 34th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineering, Atlantic City, N. J., p. 1027-1140.
- IEC 61000-4-30 (2008) “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.” International Standard, Edition 2.0.
- IEEE 1159-1993 (1993) “IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.” Power Systems Engineering Committee of the Industrial and Commercial Power Systems Department of the IEEE Industry Applications Society.
- IEEE 1159-2009 (2009) “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.” Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power & Energy Society.
- IEEE 141-1995 (1995) “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.” IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality.
- Jesus, N. C. (2007) “Monitoramento e Simulação de Motores sob Condições Não-Ideais: Efeito Combinado Desequilíbrio e Distorção Harmônica” Publicado em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.
- KINI, P. G. e Bansal, R. C. (2010) “Effect of Voltage and Load Variations on Efficiencies of a Motor-Pump System.” Publicado em: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, nº 2, p. 287-292.
- LEE, C. Y. (1999) “Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor.” Publicado em: IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, nº 2, p. 202–208.

- LEE, C. Y., Lee W. J. (1999) “Effects of Nonsinusoidal Voltage on the Operation Performance of a Three-phase Induction Motor.” Publicado em: IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, nº 2.
- MIRABBASI, D., Seifossadat, G., Heidari, M. (2009) “Effect of Unbalanced Voltage on Operation of Induction Motors and Its Detection” Publicado em: International Conference on Electrical and Electronics Engineering. p. I-189 - I-192.
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico (2011) “Boletim de carga mensal – Julho/2014”. Publicado em: http://www.ons.org.br/download/sala_imprensa/Boletim_Mensal-jul-2014_preliminar.pdf.
- ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico (2011) “Procedimentos De Rede, Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes.” Revisão 2.0, data de vigência 11 de novembro de 2011.
- SIDDIQUE, A., Yadava, G.S., Singh, B. (2004) “Effect of Voltage Unbalance on Induction Motors”. Publicado em: Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, p. 26-29.
- SILVA, V. P., Bispo, D., Silva, S. F. De P. E Delaiba, A. C. (2010) “Estudo do Comportamento de Motores de Indução Quando Submetidos à Alimentação Não Ideal.” Publicado em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.

APÊNDICE A – BANCOS DE DADOS

Este apêndice apresentará tabelas com os valores que formam cada banco de dados utilizado no trabalho.

A.1 – BD1 – Condições equilibradas

Tabela A.1- Condições equilibradas que constituem o BD1

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ângulo V _b (°)	Ângulo V _c (°)	FD (%)
189	189	189	-120	120	0
190	190	190	-120	120	0
191	191	191	-120	120	0
192	192	192	-120	120	0
193	193	193	-120	120	0
194	194	194	-120	120	0
195	195	195	-120	120	0
196	196	196	-120	120	0
197	197	197	-120	120	0
198	198	198	-120	120	0
199	199	199	-120	120	0
200	200	200	-120	120	0
201	201	201	-120	120	0
202	202	202	-120	120	0
203	203	203	-120	120	0
204	204	204	-120	120	0
205	205	205	-120	120	0
206	206	206	-120	120	0
207	207	207	-120	120	0
208	208	208	-120	120	0
209	209	209	-120	120	0
210	210	210	-120	120	0

V_a	V_b	V_c	$\hat{\text{Ângulo}} V_b$	$\hat{\text{Ângulo}} V_c$	FD
(V)	(V)	(V)	(°)	(°)	(%)
211	211	211	-120	120	0
212	212	212	-120	120	0
213	213	213	-120	120	0
214	214	214	-120	120	0
215	215	215	-120	120	0
216	216	216	-120	120	0
217	217	217	-120	120	0
218	218	218	-120	120	0
219	219	219	-120	120	0
220	220	220	-120	120	0
221	221	221	-120	120	0
222	222	222	-120	120	0
223	223	223	-120	120	0
224	224	224	-120	120	0
225	225	225	-120	120	0
226	226	226	-120	120	0
227	227	227	-120	120	0
228	228	228	-120	120	0
229	229	229	-120	120	0
230	230	230	-120	120	0
231	231	231	-120	120	0
232	232	232	-120	120	0
233	233	233	-120	120	0

A.2 – BD2 – Desequilíbrio na magnitude das tensões

Tabela A.2 – Condições com desequilíbrio nas magnitudes que constituem o BD2

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
109,2	109,8	111	0,5	123,6	123,2	125,2	0,5	118,8	118,1	120,1	0,5
109,3	109,6	111,1	0,5	123,8	123,1	125,2	0,5	119,1	119,8	121,1	0,5
109,6	109,3	111,1	0,5	124	124,8	126,2	0,5	119,2	119,6	121,2	0,5
109,8	109,2	111	0,5	124,2	124,6	126,2	0,5	119,6	119,2	121,2	0,5
110,1	110,8	112	0,5	124,4	124,4	126,3	0,5	119,8	119,1	121,1	0,5
110,3	110,6	112,1	0,5	124,6	124,2	126,2	0,5	120,1	120,8	122,1	0,5
110,6	110,3	112,1	0,5	124,8	124	126,2	0,5	120,2	120,6	122,2	0,5
110,8	110,1	112	0,5	125	125,8	127,2	0,5	120,4	120,4	122,2	0,5
111,1	111,8	113,1	0,5	125,2	125,6	127,2	0,5	120,6	120,2	122,2	0,5
111,3	111,6	113,1	0,5	125,4	125,4	127,3	0,5	120,8	120,1	122,1	0,5
111,4	111,4	113,1	0,5	125,6	125,2	127,2	0,5	121,1	121,8	123,1	0,5
111,6	111,3	113,1	0,5	125,8	125	127,2	0,5	121,2	121,6	123,2	0,5
111,8	111,1	113,1	0,5	126	126,8	128,2	0,5	121,6	121,2	123,2	0,5
112,1	112,8	114,1	0,5	126,2	126,6	128,3	0,5	121,8	121,1	123,1	0,5
112,3	112,6	114,1	0,5	126,6	126,2	128,3	0,5	122,1	122,8	124,2	0,5
112,4	112,4	114,1	0,5	126,8	126	128,2	0,5	122,2	122,6	124,2	0,5
112,6	112,3	114,1	0,5	127	127,8	129,2	0,5	122,4	122,4	124,2	0,5
112,8	112,1	114,1	0,5	127,2	127,6	129,3	0,5	122,6	122,2	124,2	0,5
113,1	113,8	115,1	0,5	127,4	127,4	129,3	0,5	122,8	122,1	124,2	0,5
113,3	113,6	115,1	0,5	127,6	127,2	129,3	0,5	123,1	123,8	125,2	0,5
113,4	113,4	115,1	0,5	127,8	127	129,2	0,5	123,2	123,6	125,2	0,5
113,6	113,3	115,1	0,5	128	128,8	130,2	0,5	123,4	123,4	125,2	0,5
113,8	113,1	115,1	0,5	128,2	128,6	130,3	0,5	132,5	132,1	134,3	0,5
114,1	114,8	116,1	0,5	128,4	128,4	130,3	0,5	132,8	132	134,2	0,5
114,3	114,6	116,1	0,5	128,6	128,2	130,3	0,5	133	133,8	135,3	0,5
114,4	114,4	116,2	0,5	128,8	128	130,2	0,5	133,1	133,5	135,3	0,5

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
114,6	114,3	116,1	0,5	129	129,8	131,2	0,5	133,5	133,1	135,3	0,5
114,8	114,1	116,1	0,5	129,2	129,6	131,3	0,5	133,8	133	135,3	0,5
115,1	115,8	117,1	0,5	129,4	129,4	131,3	0,5	134	134,8	136,3	0,5
115,3	115,6	117,1	0,5	129,6	129,2	131,3	0,5	134,1	134,5	136,3	0,5
115,6	115,3	117,1	0,5	129,8	129	131,2	0,5	134,5	134,1	136,3	0,5
115,8	115,1	117,1	0,5	130	130,8	132,2	0,5	134,8	134	136,3	0,5
116,1	116,8	118,1	0,5	130,2	130,6	132,3	0,5	135	135,8	137,3	0,5
116,2	116,6	118,2	0,5	130,3	130,3	132,3	0,5	135,1	135,5	137,3	0,5
116,6	116,2	118,2	0,5	130,6	130,2	132,3	0,5	135,5	135,1	137,3	0,5
116,8	116,1	118,1	0,5	130,8	130	132,2	0,5	135,8	135	137,3	0,5
117,1	117,8	119,1	0,5	131	131,8	133,2	0,5	136	136,8	138,3	0,5
117,2	117,6	119,2	0,5	131,2	131,5	133,3	0,5	136,1	136,5	138,3	0,5
117,6	117,2	119,2	0,5	131,3	131,3	133,3	0,5	136,5	136,1	138,3	0,5
117,8	117,1	119,1	0,5	131,5	131,2	133,3	0,5	136,8	136	138,3	0,5
118,1	118,8	120,1	0,5	131,8	131	133,2	0,5	136,9	137,8	139,3	0,5
118,2	118,6	120,2	0,5	132	132,8	134,2	0,5	137,1	137,5	139,4	0,5
118,4	118,4	120,2	0,5	132,1	132,5	134,3	0,5	137,5	137,1	139,4	0,5
118,6	118,2	120,2	0,5	132,3	132,3	134,3	0,5	137,8	136,9	139,3	0,5
109,3	110,6	113,1	1	123,2	122,4	126,4	1	118,2	119,6	122,3	1
109,6	110,2	113,2	1	123,6	122,1	126,3	1	118,5	119,2	122,4	1
110,2	109,6	113,2	1	123,1	124,6	127,3	1	118,8	118,8	122,4	1
110,6	109,3	113,1	1	123,4	124,1	127,5	1	119,2	118,5	122,4	1
110,3	111,6	114,1	1	123,8	123,8	127,5	1	119,6	118,2	122,3	1
110,6	111,2	114,2	1	124,1	123,4	127,5	1	119,1	120,6	123,3	1
111,2	110,6	114,2	1	124,6	123,1	127,3	1	119,4	120,2	123,4	1
111,6	110,3	114,1	1	124,1	125,6	128,4	1	120,2	119,4	123,4	1
111,3	112,6	115,1	1	124,4	125,1	128,5	1	120,6	119,1	123,3	1
111,5	112,2	115,2	1	124,7	124,7	128,5	1	120,1	121,6	124,3	1
111,9	111,9	115,3	1	125,1	124,4	128,5	1	120,4	121,2	124,4	1

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
112,2	111,5	115,2	1	125,6	124,1	128,4	1	120,8	120,8	124,4	1
112,6	111,3	115,1	1	125,1	126,6	129,4	1	121,2	120,4	124,4	1
112,3	113,6	116,1	1	125,4	126,1	129,5	1	121,6	120,1	124,3	1
112,5	113,2	116,2	1	126,1	125,4	129,5	1	121,1	122,6	125,3	1
112,9	112,9	116,3	1	126,6	125,1	129,4	1	121,4	122,2	125,4	1
113,2	112,5	116,2	1	126	127,6	130,4	1	121,8	121,8	125,5	1
113,6	112,3	116,1	1	126,4	127,1	130,5	1	122,2	121,4	125,4	1
113,2	114,6	117,2	1	126,7	126,7	130,6	1	122,6	121,1	125,3	1
113,5	114,2	117,3	1	127,1	126,4	130,5	1	122,1	123,6	126,3	1
114,2	113,5	117,3	1	127,6	126	130,4	1	132,5	131	135,5	1
114,6	113,2	117,2	1	127	128,6	131,4	1	131,9	133,5	136,5	1
114,2	115,6	118,2	1	127,3	128,1	131,5	1	132,3	133,1	136,6	1
114,5	115,2	118,3	1	128,1	127,3	131,5	1	132,7	132,7	136,7	1
114,8	114,8	118,3	1	128,6	127	131,4	1	133,1	132,3	136,6	1
115,2	114,5	118,3	1	128	129,5	132,4	1	133,5	131,9	136,5	1
115,6	114,2	118,2	1	128,3	129,1	132,6	1	132,9	134,5	137,5	1
115,2	116,6	119,2	1	129,1	128,3	132,6	1	133,3	134,1	137,7	1
115,5	116,2	119,3	1	129,5	128	132,4	1	133,7	133,7	137,7	1
115,8	115,8	119,3	1	129	130,5	133,5	1	134,1	133,3	137,7	1
116,2	115,5	119,3	1	129,3	130,1	133,6	1	134,5	132,9	137,5	1
116,6	115,2	119,2	1	130,1	129,3	133,6	1	133,9	135,5	138,6	1
116,2	117,6	120,2	1	130,5	129	133,5	1	134,3	135,1	138,7	1
116,5	117,2	120,3	1	130	131,5	134,5	1	135,1	134,3	138,7	1
117,2	116,5	120,3	1	130,3	131,1	134,6	1	135,5	133,9	138,6	1
117,6	116,2	120,2	1	131,1	130,3	134,6	1	134,9	136,5	139,6	1
117,2	118,6	121,2	1	131,5	130	134,5	1	135,2	136,1	139,7	1
117,5	118,2	121,3	1	131	132,5	135,5	1	135,6	135,6	139,7	1
117,8	117,8	121,4	1	131,3	132,1	135,6	1	136,1	135,2	139,7	1
118,2	117,5	121,3	1	131,7	131,7	135,7	1	136,5	134,9	139,6	1

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
118,6	117,2	121,2	1	132,1	131,3	135,6	1	122,4	123,2	126,4	1
109,3	109,3	114,3	1,5	117,2	119,4	123,4	1,5	117,7	118,8	123,5	1,5
109,4	111,4	115,2	1,5	118,8	117,7	123,5	1,5	118,2	120,4	124,4	1,5
109,8	110,9	115,3	1,5	119,4	117,2	123,4	1,5	118,7	119,8	124,6	1,5
110,9	109,8	115,3	1,5	122,1	122,1	127,7	1,5	119,2	119,2	124,6	1,5
111,4	109,4	115,2	1,5	122,7	121,6	127,7	1,5	119,8	118,7	124,6	1,5
110,4	112,4	116,2	1,5	123,4	121,2	127,5	1,5	120,4	118,2	124,4	1,5
110,8	111,8	116,3	1,5	122,1	124,3	128,5	1,5	119,2	121,4	125,4	1,5
111,3	111,3	116,4	1,5	122,6	123,7	128,7	1,5	119,6	120,7	125,6	1,5
111,8	110,8	116,3	1,5	123,1	123,1	128,8	1,5	120,7	119,6	125,6	1,5
112,4	110,4	116,2	1,5	123,7	122,6	128,7	1,5	121,4	119,2	125,4	1,5
111,4	113,4	117,2	1,5	124,3	122,1	128,5	1,5	120,2	122,4	126,5	1,5
111,8	112,8	117,4	1,5	123,1	125,3	129,6	1,5	120,6	121,7	126,6	1,5
112,8	111,8	117,4	1,5	123,6	124,7	129,7	1,5	121,2	121,2	126,7	1,5
113,4	111,4	117,2	1,5	124,1	124,1	129,8	1,5	121,7	120,6	126,6	1,5
112,4	114,4	118,2	1,5	124,7	123,6	129,7	1,5	122,4	120,2	126,5	1,5
112,8	113,8	118,4	1,5	125,3	123,1	129,6	1,5	121,2	123,4	127,5	1,5
113,3	113,3	118,5	1,5	124,1	126,3	130,6	1,5	121,6	122,7	127,7	1,5
113,8	112,8	118,4	1,5	124,6	125,7	130,8	1,5	129	131,3	135,7	1,5
114,4	112,4	118,2	1,5	125,7	124,6	130,8	1,5	129,5	130,6	135,9	1,5
113,3	115,4	119,3	1,5	126,3	124,1	130,6	1,5	130,6	129,5	135,9	1,5
113,8	114,8	119,4	1,5	125,1	127,3	131,6	1,5	131,3	129	135,7	1,5
114,3	114,3	119,5	1,5	125,5	126,7	131,8	1,5	129,9	132,3	136,7	1,5
114,8	113,8	119,4	1,5	126,1	126,1	131,8	1,5	130,4	131,6	136,9	1,5
115,4	113,3	119,3	1,5	126,7	125,5	131,8	1,5	131,6	130,4	136,9	1,5
114,3	116,4	120,3	1,5	127,3	125,1	131,6	1,5	132,3	129,9	136,7	1,5
114,7	115,8	120,5	1,5	126	128,3	132,6	1,5	130,3	128	134,7	1,5
115,2	115,2	120,5	1,5	126,5	127,7	132,8	1,5	130,9	133,3	137,8	1,5
115,8	114,7	120,5	1,5	127,7	126,5	132,8	1,5	131,4	132,6	138	1,5

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
116,4	114,3	120,3	1,5	128,3	126	132,6	1,5	132	132	138	1,5
115,3	117,4	121,3	1,5	127	129,3	133,7	1,5	132,6	131,4	138	1,5
115,7	116,8	121,5	1,5	127,5	128,7	133,8	1,5	133,3	130,9	137,8	1,5
116,8	115,7	121,5	1,5	128,1	128,1	133,9	1,5	131,9	134,3	138,8	1,5
117,4	115,3	121,3	1,5	128,7	127,5	133,8	1,5	132,4	133,6	139	1,5
116,3	118,4	122,4	1,5	129,3	127	133,7	1,5	133	133	139,1	1,5
116,7	117,8	122,5	1,5	128	130,3	134,7	1,5	133,6	132,4	139	1,5
117,2	117,2	122,6	1,5	128,5	129,7	134,9	1,5	134,3	131,9	138,8	1,5
117,8	116,7	122,5	1,5	129	129	134,9	1,5	132,9	135,3	139,8	1,5
118,4	116,3	122,4	1,5	129,7	128,5	134,9	1,5	135,3	132,9	139,8	1,5
110,5	109,1	116,4	2	116,3	119,2	124,5	2	123,7	125,3	132	2
109,5	112,2	117,2	2	116,9	118,4	124,7	2	124,5	124,5	132,1	2
110,1	111,5	117,5	2	118,4	116,9	124,7	2	125,3	123,7	132	2
110,7	110,7	117,5	2	119,2	116,3	124,5	2	126,1	123,1	131,8	2
111,5	110,1	117,5	2	117,3	120,2	125,5	2	124,1	127,1	132,8	2
112,2	109,5	117,2	2	117,9	119,3	125,8	2	124,7	126,2	133	2
110,5	113,2	118,3	2	118,6	118,6	125,8	2	126,2	124,7	133	2
111,1	112,4	118,5	2	119,3	117,9	125,8	2	127,1	124,1	132,8	2
112,4	111,1	118,5	2	120,2	117,3	125,5	2	125	128,1	133,8	2
113,2	110,5	118,3	2	118,3	121,2	126,6	2	125,7	127,2	134,1	2
111,5	114,2	119,3	2	118,9	120,3	126,8	2	127,2	125,7	134,1	2
112	113,4	119,5	2	120,3	118,9	126,8	2	128,1	125	133,8	2
112,7	112,7	119,6	2	121,2	118,3	126,6	2	126	129,1	134,9	2
113,4	112	119,5	2	119,2	122,1	127,6	2	126,7	128,2	135,1	2
114,2	111,5	119,3	2	119,8	121,3	127,8	2	128,2	126,7	135,1	2
112,4	115,2	120,4	2	120,5	120,5	127,9	2	129,1	126	134,9	2
113	114,4	120,6	2	121,3	119,8	127,8	2	127	130,1	135,9	2
113,7	113,7	120,6	2	109,1	110,5	116,4	2	127,6	129,2	136,2	2
114,4	113	120,6	2	122,1	119,2	127,6	2	129,2	127,6	136,2	2

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
115,2	112,4	120,4	2	120,2	123,1	128,7	2	130,1	127	135,9	2
113,4	116,2	121,4	2	120,8	122,3	128,9	2	128	131,1	137	2
114	115,4	121,6	2	121,5	121,5	129	2	128,6	130,2	137,2	2
115,4	114	121,6	2	122,3	120,8	128,9	2	129,4	129,4	137,3	2
116,2	113,4	121,4	2	123,1	120,2	128,7	2	130,2	128,6	137,2	2
114,4	117,2	122,4	2	121,2	124,1	129,7	2	131,1	128	137	2
115	116,4	122,6	2	121,8	123,3	129,9	2	128,9	132,1	138	2
115,6	115,6	122,7	2	122,5	122,5	130	2	129,6	131,2	138,2	2
116,4	115	122,6	2	123,3	121,8	129,9	2	130,3	130,3	138,3	2
117,2	114,4	122,4	2	124,1	121,2	129,7	2	131,2	129,6	138,2	2
115,4	118,2	123,5	2	122,1	125,1	130,7	2	132,1	128,9	138	2
115,9	117,4	123,7	2	122,8	124,3	131	2	129,9	133,1	139	2
116,6	116,6	123,8	2	124,3	122,8	131	2	130,6	132,2	139,3	2
117,4	115,9	123,7	2	125,1	122,1	130,7	2	132,2	130,6	139,3	2
118,2	115,4	123,5	2	123,1	126,1	131,8	2	133,1	129,9	139	2
110,2	110,2	118,7	2,5	116,1	117,9	125,9	2,5	122,1	125,9	133	2,5
111,1	109,4	118,6	2,5	117,9	116,1	125,9	2,5	122,9	124,8	133,3	2,5
109,6	113	119,4	2,5	119	115,4	125,6	2,5	123,8	123,8	133,4	2,5
110,3	112,1	119,6	2,5	116,4	119,9	126,7	2,5	124,8	122,9	133,3	2,5
111,2	111,2	119,7	2,5	117,1	118,9	127	2,5	125,9	122,1	133	2,5
112,1	110,3	119,6	2,5	118,9	117,1	127	2,5	123,1	126,9	134	2,5
113	109,6	119,4	2,5	119,9	116,4	126,7	2,5	123,9	125,8	134,3	2,5
110,6	114	120,4	2,5	117,3	120,9	127,7	2,5	124,8	124,8	134,4	2,5
111,3	113	120,7	2,5	118,1	119,9	128	2,5	125,8	123,9	134,3	2,5
112,1	112,1	120,8	2,5	119	119	128,1	2,5	126,9	123,1	134	2,5
113	111,3	120,7	2,5	119,9	118,1	128	2,5	124,1	127,9	135,1	2,5
114	110,6	120,4	2,5	120,9	117,3	127,7	2,5	124,9	126,8	135,4	2,5
111,6	115	121,5	2,5	118,3	121,9	128,8	2,5	125,8	125,8	135,5	2,5
112,3	114	121,7	2,5	119	120,9	129,1	2,5	126,8	124,9	135,4	2,5

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
114	112,3	121,7	2,5	119,9	119,9	129,2	2,5	127,9	124,1	135,1	2,5
115	111,6	121,5	2,5	120,9	119	129,1	2,5	125	128,9	136,1	2,5
112,5	116	122,5	2,5	109,4	111,1	118,6	2,5	125,8	127,8	136,4	2,5
113,2	115	122,8	2,5	121,9	118,3	128,8	2,5	127,8	125,8	136,4	2,5
114,1	114,1	122,9	2,5	119,3	122,9	129,8	2,5	128,9	125	136,1	2,5
115	113,2	122,8	2,5	120	121,9	130,1	2,5	126	129,9	137,2	2,5
116	112,5	122,5	2,5	120,9	120,9	130,2	2,5	126,8	128,8	137,5	2,5
113,5	117	123,5	2,5	121,9	120	130,1	2,5	127,7	127,7	137,6	2,5
114,2	116	123,8	2,5	122,9	119,3	129,8	2,5	128,8	126,8	137,5	2,5
115,1	115,1	123,9	2,5	120,2	123,9	130,9	2,5	129,9	126	137,2	2,5
116	114,2	123,8	2,5	121	122,9	131,2	2,5	126,9	130,9	138,2	2,5
117	113,5	123,5	2,5	121,9	121,9	131,3	2,5	127,8	129,7	138,5	2,5
114,4	118	124,6	2,5	122,9	121	131,2	2,5	129,7	127,8	138,5	2,5
115,2	117	124,9	2,5	123,9	120,2	130,9	2,5	130,9	126,9	138,2	2,5
116	116	125	2,5	121,2	124,9	131,9	2,5	127,9	131,8	139,2	2,5
117	115,2	124,9	2,5	122	123,8	132,2	2,5	128,7	130,7	139,5	2,5
118	114,4	124,6	2,5	123,8	122	132,2	2,5	130,7	128,7	139,5	2,5
115,4	119	125,6	2,5	124,9	121,2	131,9	2,5	131,8	127,9	139,2	2,5
109,6	111,7	120,7	3	116,4	116,4	127,2	3	122,2	122,2	133,6	3
110,6	110,6	120,8	3	117,5	115,4	127,1	3	123,4	121,1	133,4	3
111,7	109,6	120,7	3	118,7	114,5	126,8	3	124,7	120,2	133,1	3
109,7	113,8	121,5	3	115,4	119,7	127,8	3	121,2	125,7	134,2	3
110,6	112,6	121,8	3	116,3	118,5	128,1	3	122,1	124,4	134,5	3
111,6	111,6	121,9	3	118,5	116,3	128,1	3	124,4	122,1	134,5	3
112,6	110,6	121,8	3	119,7	115,4	127,8	3	125,7	121,2	134,2	3
113,8	109,7	121,5	3	116,4	120,7	128,9	3	122,1	126,7	135,2	3
110,7	114,8	122,5	3	117,3	119,5	129,2	3	123,1	125,4	135,6	3
111,5	113,6	122,9	3	118,3	118,3	129,3	3	125,4	123,1	135,6	3
112,5	112,5	123	3	119,5	117,3	129,2	3	126,7	122,1	135,2	3

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
113,6	111,5	122,9	3	120,7	116,4	128,9	3	123,1	127,7	136,3	3
114,8	110,7	122,5	3	117,3	121,7	129,9	3	124	126,4	136,6	3
111,6	115,8	123,6	3	118,3	120,5	130,3	3	125,1	125,1	136,7	3
112,5	114,6	123,9	3	119,3	119,3	130,4	3	126,4	124	136,6	3
114,6	112,5	123,9	3	109,6	109,6	119,8	3	127,7	123,1	136,3	3
115,8	111,6	123,6	3	120,5	118,3	130,3	3	124	128,6	137,3	3
112,6	116,8	124,7	3	121,7	117,3	129,9	3	125	127,3	137,7	3
113,4	115,6	125	3	118,3	122,7	131	3	126,1	126,1	137,8	3
114,5	114,5	125,1	3	119,2	121,5	131,3	3	127,3	125	137,7	3
115,6	113,4	125	3	121,5	119,2	131,3	3	128,6	124	137,3	3
116,8	112,6	124,7	3	122,7	118,3	131	3	125	129,6	138,4	3
113,5	117,8	125,7	3	119,3	123,7	132	3	125,9	128,3	138,7	3
114,4	116,6	126	3	120,2	122,4	132,4	3	128,3	125,9	138,7	3
115,4	115,4	126,1	3	121,3	121,3	132,5	3	129,6	125	138,4	3
116,6	114,4	126	3	122,4	120,2	132,4	3	125,9	130,6	139,4	3
117,8	113,5	125,7	3	123,7	119,3	132	3	126,9	129,3	139,8	3
114,5	118,7	126,8	3	120,2	124,7	133,1	3	128	128	139,9	3
115,4	117,5	127,1	3	121,1	123,4	133,4	3	129,3	126,9	139,8	3
130,6	125,9	139,4	3	118,5	113,6	127,9	3,5	120,3	123	134,7	3,5
109,8	112,2	122,9	3,5	114,5	119,5	129	3,5	121,6	121,6	134,8	3,5
112,2	109,8	122,9	3,5	115,6	118,1	129,3	3,5	123	120,3	134,7	3,5
109,8	114,6	123,6	3,5	116,8	116,8	129,5	3,5	124,5	119,2	134,3	3,5
110,8	113,2	124	3,5	118,1	115,6	129,3	3,5	120,2	125,5	135,4	3,5
111,9	111,9	124,1	3,5	119,5	114,5	129	3,5	121,3	124	135,8	3,5
113,2	110,8	124	3,5	115,5	120,5	130	3,5	124	121,3	135,8	3,5
114,6	109,8	123,6	3,5	116,5	119,1	130,4	3,5	125,5	120,2	135,4	3,5
110,7	115,6	124,7	3,5	119,1	116,5	130,4	3,5	121,1	126,4	136,4	3,5
111,7	114,2	125,1	3,5	120,5	115,5	130	3,5	122,2	124,9	136,8	3,5
112,9	112,9	125,2	3,5	116,4	121,5	131,1	3,5	123,5	123,5	137	3,5

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	FD (%)
114,2	111,7	125,1	3,5	117,5	120,1	131,5	3,5	124,9	122,2	136,8	3,5
115,6	110,7	124,7	3,5	120,1	117,5	131,5	3,5	126,4	121,1	136,4	3,5
111,7	116,6	125,8	3,5	109	109	120,9	3,5	122,1	127,4	137,5	3,5
112,7	115,2	126,1	3,5	121,5	116,4	131,1	3,5	123,2	125,9	137,9	3,5
113,9	113,9	126,3	3,5	117,4	122,5	132,2	3,5	124,5	124,5	138	3,5
115,2	112,7	126,1	3,5	118,4	121	132,5	3,5	125,9	123,2	137,9	3,5
116,6	111,7	125,8	3,5	119,7	119,7	132,7	3,5	127,4	122,1	137,5	3,5
112,6	117,6	126,8	3,5	121	118,4	132,5	3,5	123	128,4	138,6	3,5
113,6	116,2	127,2	3,5	122,5	117,4	132,2	3,5	124,2	126,9	139	3,5
114,8	114,8	127,3	3,5	118,3	123,5	133,2	3,5	125,5	125,5	139,1	3,5
116,2	113,6	127,2	3,5	119,4	122	133,6	3,5	126,9	124,2	139	3,5
117,6	112,6	126,8	3,5	120,6	120,6	133,8	3,5	128,4	123	138,6	3,5
113,6	118,5	127,9	3,5	122	119,4	133,6	3,5	124	129,4	139,6	3,5
114,6	117,1	128,3	3,5	123,5	118,3	133,2	3,5	129,4	124	139,6	3,5
117,1	114,6	128,3	3,5	119,2	124,5	134,3	3,5				

A.3 – BD3 – Desequilíbrio nos ângulos das tensões

Tabela A.3 - Condições com desequilíbrio nos ângulos que constituem o BD3

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ângulo V _b (°)	Ângulo V _c (°)	FD (%)
220	220	220	-120	120	0
220	220	220	-115	120	2,91
220	220	220	-125	120	2,91
220	220	220	-120	115	2,91
220	220	220	-120	125	2,91

A.4 – BD4 – Desequilíbrio nas magnitudes e nos ângulos

Tabela A. 4 - Condições com desequilíbrio nas magnitudes e nos ângulos que constituem o BD4

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
199,38	200,57	202,81	-115	120	226,12	223,42	231,16	-115	120
199,38	200,57	202,81	-125	120	226,12	223,42	231,16	-125	120
199,38	200,57	202,81	-120	115	226,12	223,42	231,16	-120	115
199,38	200,57	202,81	-120	125	226,12	223,42	231,16	-120	125
199,62	200,22	202,89	-115	120	225,13	227,83	232,93	-125	120
199,62	200,22	202,89	-125	120	225,13	227,83	232,93	-120	115
199,62	200,22	202,89	-120	115	225,13	227,83	232,93	-120	125
199,62	200,22	202,89	-120	125	225,69	227,07	233,13	-125	120
200,22	199,62	202,89	-115	120	225,69	227,07	233,13	-120	115
200,22	199,62	202,89	-125	120	225,69	227,07	233,13	-120	125
200,22	199,62	202,89	-120	115	227,07	225,69	233,13	-115	120
200,22	199,62	202,89	-120	125	227,07	225,69	233,13	-125	120
200,57	199,38	202,81	-115	120	227,07	225,69	233,13	-120	115
200,57	199,38	202,81	-125	120	227,07	225,69	233,13	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
200,57	199,38	202,81	-120	115	227,83	225,13	232,93	-115	120
200,57	199,38	202,81	-120	125	227,83	225,13	232,93	-125	120
201,09	202,30	204,56	-115	120	227,83	225,13	232,93	-120	115
201,09	202,30	204,56	-125	120	227,83	225,13	232,93	-120	125
201,09	202,30	204,56	-120	115	226,83	229,57	234,69	-125	120
201,09	202,30	204,56	-120	125	226,83	229,57	234,69	-120	115
201,35	201,96	204,64	-115	120	226,83	229,57	234,69	-120	125
201,35	201,96	204,64	-125	120	227,40	228,79	234,90	-125	120
201,35	201,96	204,64	-120	115	227,40	228,79	234,90	-120	115
201,35	201,96	204,64	-120	125	227,40	228,79	234,90	-120	125
201,96	201,35	204,64	-115	120	228,06	228,06	234,97	-125	120
201,96	201,35	204,64	-125	120	228,06	228,06	234,97	-120	115
201,96	201,35	204,64	-120	115	228,06	228,06	234,97	-120	125
201,96	201,35	204,64	-120	125	228,79	227,40	234,90	-115	120
202,30	201,09	204,56	-115	120	228,79	227,40	234,90	-125	120
202,30	201,09	204,56	-125	120	228,79	227,40	234,90	-120	115
202,30	201,09	204,56	-120	115	228,79	227,40	234,90	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
202,30	201,09	204,56	-120	125	229,57	226,83	234,69	-115	120
202,82	204,04	206,30	-115	120	229,57	226,83	234,69	-125	120
202,82	204,04	206,30	-125	120	229,57	226,83	234,69	-120	115
202,82	204,04	206,30	-120	115	229,57	226,83	234,69	-120	125
202,82	204,04	206,30	-120	125	196,29	199,88	206,58	-125	120
203,07	203,69	206,39	-115	120	196,29	199,88	206,58	-120	115
203,07	203,69	206,39	-125	120	196,29	199,88	206,58	-120	125
203,07	203,69	206,39	-120	115	196,29	199,88	206,58	-125	125
203,07	203,69	206,39	-120	125	197,04	198,86	206,86	-125	120
203,69	203,07	206,39	-115	120	197,04	198,86	206,86	-120	115
203,69	203,07	206,39	-125	120	197,04	198,86	206,86	-120	125
203,69	203,07	206,39	-120	115	197,90	197,90	206,95	-115	120
203,69	203,07	206,39	-120	125	197,90	197,90	206,95	-125	120
204,04	202,82	206,30	-115	120	197,90	197,90	206,95	-120	115
204,04	202,82	206,30	-125	120	197,90	197,90	206,95	-120	125
204,04	202,82	206,30	-120	115	198,86	197,04	206,86	-115	120
204,04	202,82	206,30	-120	125	198,86	197,04	206,86	-125	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
204,54	205,75	208,05	-115	120	198,86	197,04	206,86	-120	115
204,54	205,75	208,05	-125	120	198,86	197,04	206,86	-120	125
204,54	205,75	208,05	-120	115	199,88	196,29	206,58	-115	120
204,54	205,75	208,05	-120	125	199,88	196,29	206,58	-125	120
204,80	205,40	208,14	-115	120	199,88	196,29	206,58	-120	115
204,80	205,40	208,14	-125	120	199,88	196,29	206,58	-120	125
204,80	205,40	208,14	-120	115	197,99	201,59	208,37	-125	120
204,80	205,40	208,14	-120	125	197,99	201,59	208,37	-120	115
205,09	205,09	208,18	-115	120	197,99	201,59	208,37	-120	125
205,09	205,09	208,18	-125	120	197,99	201,59	208,37	-125	125
205,09	205,09	208,18	-120	115	198,74	200,57	208,64	-125	120
205,09	205,09	208,18	-120	125	198,74	200,57	208,64	-120	115
205,40	204,80	208,14	-115	120	198,74	200,57	208,64	-120	125
205,40	204,80	208,14	-125	120	199,62	199,62	208,73	-115	120
205,40	204,80	208,14	-120	115	199,62	199,62	208,73	-125	120
205,40	204,80	208,14	-120	125	199,62	199,62	208,73	-120	115
205,75	204,54	208,05	-115	120	199,62	199,62	208,73	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
205,75	204,54	208,05	-125	120	200,57	198,74	208,64	-115	120
205,75	204,54	208,05	-120	115	200,57	198,74	208,64	-125	120
205,75	204,54	208,05	-120	125	200,57	198,74	208,64	-120	115
206,25	207,48	209,80	-115	120	200,57	198,74	208,64	-120	125
206,25	207,48	209,80	-125	120	201,59	197,99	208,37	-115	120
206,25	207,48	209,80	-120	115	201,59	197,99	208,37	-125	120
206,25	207,48	209,80	-120	125	201,59	197,99	208,37	-120	115
206,51	207,14	209,89	-115	120	201,59	197,99	208,37	-120	125
206,51	207,14	209,89	-125	120	199,69	203,33	210,15	-125	120
206,51	207,14	209,89	-120	115	199,69	203,33	210,15	-120	115
206,51	207,14	209,89	-120	125	199,69	203,33	210,15	-120	125
207,14	206,51	209,89	-115	120	199,69	203,33	210,15	-125	125
207,14	206,51	209,89	-125	120	200,43	202,29	210,43	-125	120
207,14	206,51	209,89	-120	115	200,43	202,29	210,43	-120	115
207,14	206,51	209,89	-120	125	200,43	202,29	210,43	-120	125
207,48	206,25	209,80	-115	120	202,29	200,43	210,43	-115	120
207,48	206,25	209,80	-125	120	202,29	200,43	210,43	-125	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
207,48	206,25	209,80	-120	115	202,29	200,43	210,43	-120	115
207,48	206,25	209,80	-120	125	202,29	200,43	210,43	-120	125
207,97	209,21	211,55	-115	120	203,33	199,69	210,15	-115	120
207,97	209,21	211,55	-125	120	203,33	199,69	210,15	-125	120
207,97	209,21	211,55	-120	115	203,33	199,69	210,15	-120	115
207,97	209,21	211,55	-120	125	203,33	199,69	210,15	-120	125
208,23	208,87	211,64	-115	120	201,39	205,04	211,92	-125	120
208,23	208,87	211,64	-125	120	201,39	205,04	211,92	-120	115
208,23	208,87	211,64	-120	115	201,39	205,04	211,92	-120	125
208,23	208,87	211,64	-120	125	201,39	205,04	211,92	-125	125
208,54	208,54	211,67	-115	120	202,15	204,00	212,21	-125	120
208,54	208,54	211,67	-125	120	202,15	204,00	212,21	-120	115
208,54	208,54	211,67	-120	115	202,15	204,00	212,21	-120	125
208,54	208,54	211,67	-120	125	203,03	203,03	212,30	-125	120
208,87	208,23	211,64	-115	120	203,03	203,03	212,30	-120	115
208,87	208,23	211,64	-125	120	203,03	203,03	212,30	-120	125
208,87	208,23	211,64	-120	115	204,00	202,15	212,21	-115	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
208,87	208,23	211,64	-120	125	204,00	202,15	212,21	-125	120
209,21	207,97	211,55	-115	120	204,00	202,15	212,21	-120	115
209,21	207,97	211,55	-125	120	204,00	202,15	212,21	-120	125
209,21	207,97	211,55	-120	115	205,04	201,39	211,92	-115	120
209,21	207,97	211,55	-120	125	205,04	201,39	211,92	-125	120
209,70	210,95	213,30	-115	120	205,04	201,39	211,92	-120	115
209,70	210,95	213,30	-125	120	205,04	201,39	211,92	-120	125
209,70	210,95	213,30	-120	115	203,07	206,75	213,70	-125	120
209,70	210,95	213,30	-120	125	203,07	206,75	213,70	-120	115
209,96	210,58	213,39	-115	120	203,07	206,75	213,70	-120	125
209,96	210,58	213,39	-125	120	203,84	205,72	213,99	-125	120
209,96	210,58	213,39	-120	115	203,84	205,72	213,99	-120	115
209,96	210,58	213,39	-120	125	203,84	205,72	213,99	-120	125
210,58	209,96	213,39	-115	120	205,72	203,84	213,99	-115	120
210,58	209,96	213,39	-125	120	205,72	203,84	213,99	-125	120
210,58	209,96	213,39	-120	115	205,72	203,84	213,99	-120	115
210,58	209,96	213,39	-120	125	205,72	203,84	213,99	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
210,95	209,70	213,30	-115	120	206,75	203,07	213,70	-115	120
210,95	209,70	213,30	-125	120	206,75	203,07	213,70	-125	120
210,95	209,70	213,30	-120	115	206,75	203,07	213,70	-120	115
210,95	209,70	213,30	-120	125	206,75	203,07	213,70	-120	125
211,41	212,68	215,05	-115	120	204,76	208,49	215,48	-125	120
211,41	212,68	215,05	-125	120	204,76	208,49	215,48	-120	115
211,41	212,68	215,05	-120	115	204,76	208,49	215,48	-120	125
211,41	212,68	215,05	-120	125	205,54	207,43	215,76	-125	120
211,67	212,31	215,14	-115	120	205,54	207,43	215,76	-120	115
211,67	212,31	215,14	-125	120	205,54	207,43	215,76	-120	125
211,67	212,31	215,14	-120	115	206,44	206,44	215,87	-125	120
211,67	212,31	215,14	-120	125	206,44	206,44	215,87	-120	115
211,99	211,99	215,17	-115	120	206,44	206,44	215,87	-120	125
211,99	211,99	215,17	-125	120	207,43	205,54	215,76	-125	120
211,99	211,99	215,17	-120	115	207,43	205,54	215,76	-120	115
211,99	211,99	215,17	-120	125	207,43	205,54	215,76	-120	125
212,31	211,67	215,14	-115	120	208,49	204,76	215,48	-115	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
212,31	211,67	215,14	-125	120	208,49	204,76	215,48	-125	120
212,31	211,67	215,14	-120	115	208,49	204,76	215,48	-120	115
212,31	211,67	215,14	-120	125	208,49	204,76	215,48	-120	125
212,68	211,41	215,05	-115	120	206,46	210,20	217,27	-125	120
212,68	211,41	215,05	-125	120	206,46	210,20	217,27	-120	115
212,68	211,41	215,05	-120	115	206,46	210,20	217,27	-120	125
212,68	211,41	215,05	-120	125	207,24	209,15	217,55	-125	120
213,13	214,39	216,80	-115	120	207,24	209,15	217,55	-120	115
213,13	214,39	216,80	-125	120	207,24	209,15	217,55	-120	125
213,13	214,39	216,80	-120	115	209,15	207,24	217,55	-125	120
213,13	214,39	216,80	-120	125	209,15	207,24	217,55	-120	115
213,39	214,05	216,89	-115	120	209,15	207,24	217,55	-120	125
213,39	214,05	216,89	-125	120	210,20	206,46	217,27	-115	120
213,39	214,05	216,89	-120	115	210,20	206,46	217,27	-125	120
213,39	214,05	216,89	-120	125	210,20	206,46	217,27	-120	115
213,70	213,70	216,92	-115	120	210,20	206,46	217,27	-120	125
213,70	213,70	216,92	-125	120	208,14	211,93	219,05	-125	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
213,70	213,70	216,92	-120	115	208,14	211,93	219,05	-120	115
213,70	213,70	216,92	-120	125	208,14	211,93	219,05	-120	125
214,05	213,39	216,89	-115	120	208,94	210,86	219,33	-125	120
214,05	213,39	216,89	-125	120	208,94	210,86	219,33	-120	115
214,05	213,39	216,89	-120	115	208,94	210,86	219,33	-120	125
214,05	213,39	216,89	-120	125	209,86	209,86	219,43	-125	120
214,39	213,13	216,80	-115	120	209,86	209,86	219,43	-120	115
214,39	213,13	216,80	-125	120	209,86	209,86	219,43	-120	125
214,39	213,13	216,80	-120	115	210,86	208,94	219,33	-125	120
214,39	213,13	216,80	-120	125	210,86	208,94	219,33	-120	115
214,84	216,13	218,53	-115	120	210,86	208,94	219,33	-120	125
214,84	216,13	218,53	-125	120	211,93	208,14	219,05	-115	120
214,84	216,13	218,53	-120	115	211,93	208,14	219,05	-125	120
214,84	216,13	218,53	-120	125	211,93	208,14	219,05	-120	115
215,12	215,76	218,64	-115	120	211,93	208,14	219,05	-120	125
215,12	215,76	218,64	-125	120	209,84	213,65	220,84	-125	120
215,12	215,76	218,64	-120	115	209,84	213,65	220,84	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
215,12	215,76	218,64	-120	125	209,84	213,65	220,84	-120	125
215,43	215,43	218,67	-115	120	210,63	212,57	221,11	-125	120
215,43	215,43	218,67	-125	120	210,63	212,57	221,11	-120	115
215,43	215,43	218,67	-120	115	210,63	212,57	221,11	-120	125
215,43	215,43	218,67	-120	125	211,55	211,55	221,22	-125	120
215,76	215,12	218,64	-115	120	211,55	211,55	221,22	-120	115
215,76	215,12	218,64	-125	120	211,55	211,55	221,22	-120	125
215,76	215,12	218,64	-120	115	212,57	210,63	221,11	-125	120
215,76	215,12	218,64	-120	125	212,57	210,63	221,11	-120	115
216,13	214,84	218,53	-115	120	212,57	210,63	221,11	-120	125
216,13	214,84	218,53	-125	120	213,65	209,84	220,84	-115	120
216,13	214,84	218,53	-120	115	213,65	209,84	220,84	-125	120
216,13	214,84	218,53	-120	125	213,65	209,84	220,84	-120	115
216,56	217,86	220,28	-115	120	213,65	209,84	220,84	-120	125
216,56	217,86	220,28	-125	120	211,54	215,38	222,60	-125	120
216,56	217,86	220,28	-120	115	211,54	215,38	222,60	-120	115
216,56	217,86	220,28	-120	125	211,54	215,38	222,60	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
216,84	217,49	220,39	-115	120	212,33	214,29	222,90	-125	120
216,84	217,49	220,39	-125	120	212,33	214,29	222,90	-120	115
216,84	217,49	220,39	-120	115	212,33	214,29	222,90	-120	125
216,84	217,49	220,39	-120	125	213,27	213,27	223,00	-125	120
217,15	217,15	220,42	-115	120	213,27	213,27	223,00	-120	115
217,15	217,15	220,42	-125	120	213,27	213,27	223,00	-120	125
217,15	217,15	220,42	-120	115	214,29	212,33	222,90	-125	120
217,15	217,15	220,42	-120	125	214,29	212,33	222,90	-120	115
217,49	216,84	220,39	-115	120	214,29	212,33	222,90	-120	125
217,49	216,84	220,39	-125	120	215,38	211,54	222,60	-125	120
217,49	216,84	220,39	-120	115	215,38	211,54	222,60	-120	115
217,49	216,84	220,39	-120	125	215,38	211,54	222,60	-120	125
217,86	216,56	220,28	-115	120	213,22	217,10	224,39	-125	120
217,86	216,56	220,28	-125	120	213,22	217,10	224,39	-120	115
217,86	216,56	220,28	-120	115	213,22	217,10	224,39	-120	125
217,86	216,56	220,28	-120	125	214,03	216,00	224,68	-125	120
218,29	219,59	222,03	-115	120	214,03	216,00	224,68	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
218,29	219,59	222,03	-125	120	214,03	216,00	224,68	-120	125
218,29	219,59	222,03	-120	115	214,96	214,96	224,79	-125	120
218,29	219,59	222,03	-120	125	214,96	214,96	224,79	-120	115
218,55	219,23	222,14	-115	120	214,96	214,96	224,79	-120	125
218,55	219,23	222,14	-125	120	216,00	214,03	224,68	-125	120
218,55	219,23	222,14	-120	115	216,00	214,03	224,68	-120	115
218,55	219,23	222,14	-120	125	216,00	214,03	224,68	-120	125
219,23	218,55	222,14	-115	120	217,10	213,22	224,39	-125	120
219,23	218,55	222,14	-125	120	217,10	213,22	224,39	-120	115
219,23	218,55	222,14	-120	115	217,10	213,22	224,39	-120	125
219,23	218,55	222,14	-120	125	214,91	218,83	226,17	-125	120
219,59	218,29	222,03	-115	120	214,91	218,83	226,17	-120	115
219,59	218,29	222,03	-125	120	214,91	218,83	226,17	-120	125
219,59	218,29	222,03	-120	115	215,73	217,72	226,47	-125	120
219,59	218,29	222,03	-120	125	215,73	217,72	226,47	-120	115
220,00	221,32	223,78	-115	120	215,73	217,72	226,47	-120	125
220,00	221,32	223,78	-125	120	217,72	215,73	226,47	-125	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
220,00	221,32	223,78	-120	115	217,72	215,73	226,47	-120	115
220,00	221,32	223,78	-120	125	217,72	215,73	226,47	-120	125
220,28	220,94	223,88	-115	120	218,83	214,91	226,17	-125	120
220,28	220,94	223,88	-125	120	218,83	214,91	226,17	-120	115
220,28	220,94	223,88	-120	115	218,83	214,91	226,17	-120	125
220,28	220,94	223,88	-120	125	216,61	220,54	227,96	-125	120
220,59	220,59	223,92	-115	120	216,61	220,54	227,96	-120	115
220,59	220,59	223,92	-125	120	216,61	220,54	227,96	-120	125
220,59	220,59	223,92	-120	115	217,42	219,43	228,25	-125	120
220,59	220,59	223,92	-120	125	217,42	219,43	228,25	-120	115
220,94	220,28	223,88	-115	120	217,42	219,43	228,25	-120	125
220,94	220,28	223,88	-125	120	218,38	218,38	228,35	-125	120
220,94	220,28	223,88	-120	115	218,38	218,38	228,35	-120	115
220,94	220,28	223,88	-120	125	218,38	218,38	228,35	-120	125
221,32	220,00	223,78	-115	120	219,43	217,42	228,25	-125	120
221,32	220,00	223,78	-125	120	219,43	217,42	228,25	-120	115
221,32	220,00	223,78	-120	115	219,43	217,42	228,25	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
221,32	220,00	223,78	-120	125	220,54	216,61	227,96	-125	120
221,72	223,05	225,53	-115	120	220,54	216,61	227,96	-120	115
221,72	223,05	225,53	-125	120	220,54	216,61	227,96	-120	125
221,72	223,05	225,53	-120	115	218,31	222,27	229,74	-125	120
221,72	223,05	225,53	-120	125	218,31	222,27	229,74	-120	115
222,00	222,67	225,63	-115	120	218,31	222,27	229,74	-120	125
222,00	222,67	225,63	-125	120	219,12	221,15	230,03	-125	120
222,00	222,67	225,63	-120	115	219,12	221,15	230,03	-120	115
222,00	222,67	225,63	-120	125	219,12	221,15	230,03	-120	125
222,33	222,33	225,67	-115	120	221,15	219,12	230,03	-125	120
222,33	222,33	225,67	-125	120	221,15	219,12	230,03	-120	115
222,33	222,33	225,67	-120	115	221,15	219,12	230,03	-120	125
222,33	222,33	225,67	-120	125	222,27	218,31	229,74	-125	120
222,67	222,00	225,63	-115	120	222,27	218,31	229,74	-120	115
222,67	222,00	225,63	-125	120	222,27	218,31	229,74	-120	125
222,67	222,00	225,63	-120	115	219,99	223,99	231,51	-125	120
222,67	222,00	225,63	-120	125	219,99	223,99	231,51	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
223,05	221,72	225,53	-115	120	219,99	223,99	231,51	-120	125
223,05	221,72	225,53	-125	120	220,82	222,86	231,82	-125	120
223,05	221,72	225,53	-120	115	220,82	222,86	231,82	-120	115
223,05	221,72	225,53	-120	125	220,82	222,86	231,82	-120	125
223,43	224,77	227,28	-115	120	221,79	221,79	231,92	-125	120
223,43	224,77	227,28	-125	120	221,79	221,79	231,92	-120	115
223,43	224,77	227,28	-120	115	221,79	221,79	231,92	-120	125
223,43	224,77	227,28	-120	125	222,86	220,82	231,82	-125	120
223,71	224,40	227,38	-115	120	222,86	220,82	231,82	-120	115
223,71	224,40	227,38	-125	120	222,86	220,82	231,82	-120	125
223,71	224,40	227,38	-120	115	223,99	219,99	231,51	-125	120
223,71	224,40	227,38	-120	125	223,99	219,99	231,51	-120	115
224,04	224,04	227,42	-115	120	223,99	219,99	231,51	-120	125
224,04	224,04	227,42	-125	120	221,69	225,72	233,29	-125	120
224,04	224,04	227,42	-120	115	221,69	225,72	233,29	-120	115
224,04	224,04	227,42	-120	125	221,69	225,72	233,29	-120	125
224,40	223,71	227,38	-115	120	222,52	224,58	233,60	-125	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
224,40	223,71	227,38	-125	120	222,52	224,58	233,60	-120	115
224,40	223,71	227,38	-120	115	222,52	224,58	233,60	-120	125
224,40	223,71	227,38	-120	125	223,50	223,50	233,71	-125	120
224,77	223,43	227,28	-115	120	223,50	223,50	233,71	-120	115
224,77	223,43	227,28	-125	120	223,50	223,50	233,71	-120	125
224,77	223,43	227,28	-120	115	224,58	222,52	233,60	-125	120
224,77	223,43	227,28	-120	125	224,58	222,52	233,60	-120	115
225,17	226,50	229,03	-115	120	224,58	222,52	233,60	-120	125
225,17	226,50	229,03	-125	120	225,72	221,69	233,29	-125	120
225,17	226,50	229,03	-120	115	225,72	221,69	233,29	-120	115
225,17	226,50	229,03	-120	125	225,72	221,69	233,29	-120	125
225,44	226,12	229,13	-115	120	223,38	227,44	235,07	-125	120
225,44	226,12	229,13	-125	120	223,38	227,44	235,07	-120	115
225,44	226,12	229,13	-120	115	223,38	227,44	235,07	-120	125
225,44	226,12	229,13	-120	125	224,21	226,29	235,39	-125	120
225,77	225,77	229,17	-115	120	224,21	226,29	235,39	-120	115
225,77	225,77	229,17	-125	120	224,21	226,29	235,39	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
225,77	225,77	229,17	-120	115	226,29	224,21	235,39	-125	120
225,77	225,77	229,17	-120	125	226,29	224,21	235,39	-120	115
226,12	225,44	229,13	-115	120	226,29	224,21	235,39	-120	125
226,12	225,44	229,13	-125	120	227,44	223,38	235,07	-125	120
226,12	225,44	229,13	-120	115	227,44	223,38	235,07	-120	115
226,12	225,44	229,13	-120	125	227,44	223,38	235,07	-120	125
226,50	225,17	229,03	-115	120	225,06	229,17	236,86	-125	120
226,50	225,17	229,03	-125	120	225,06	229,17	236,86	-120	115
226,50	225,17	229,03	-120	115	225,06	229,17	236,86	-120	125
226,50	225,17	229,03	-120	125	225,93	228,01	237,17	-125	120
226,88	228,23	230,78	-115	120	225,93	228,01	237,17	-120	115
226,88	228,23	230,78	-125	120	225,93	228,01	237,17	-120	125
226,88	228,23	230,78	-120	115	228,01	225,93	237,17	-125	120
226,88	228,23	230,78	-120	125	228,01	225,93	237,17	-120	115
227,16	227,85	230,88	-115	120	228,01	225,93	237,17	-120	125
227,16	227,85	230,88	-125	120	229,17	225,06	236,86	-125	120
227,16	227,85	230,88	-120	115	229,17	225,06	236,86	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
227,16	227,85	230,88	-120	125	229,17	225,06	236,86	-120	125
227,49	227,49	230,92	-115	120	194,77	199,51	208,47	-125	120
227,49	227,49	230,92	-125	120	194,77	199,51	208,47	-120	115
227,49	227,49	230,92	-120	115	194,77	199,51	208,47	-120	125
227,49	227,49	230,92	-120	125	194,77	199,51	208,47	-125	125
227,85	227,16	230,88	-115	120	195,76	198,16	208,83	-125	120
227,85	227,16	230,88	-125	120	195,76	198,16	208,83	-120	115
227,85	227,16	230,88	-120	115	195,76	198,16	208,83	-120	125
227,85	227,16	230,88	-120	125	195,76	198,16	208,83	-125	125
228,23	226,88	230,78	-115	120	196,90	196,90	208,95	-125	120
228,23	226,88	230,78	-125	120	196,90	196,90	208,95	-120	115
228,23	226,88	230,78	-120	115	196,90	196,90	208,95	-120	125
228,23	226,88	230,78	-120	125	198,16	195,76	208,83	-125	120
228,60	229,96	232,53	-115	120	198,16	195,76	208,83	-120	115
228,60	229,96	232,53	-125	120	198,16	195,76	208,83	-120	125
228,60	229,96	232,53	-120	115	199,51	194,77	208,47	-125	120
228,60	229,96	232,53	-120	125	199,51	194,77	208,47	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
228,89	229,58	232,63	-115	120	199,51	194,77	208,47	-120	125
228,89	229,58	232,63	-125	120	196,43	201,25	210,27	-125	120
228,89	229,58	232,63	-120	115	196,43	201,25	210,27	-120	115
228,89	229,58	232,63	-120	125	196,43	201,25	210,27	-120	125
229,22	229,22	232,67	-115	120	196,43	201,25	210,27	-125	125
229,22	229,22	232,67	-125	120	197,44	199,88	210,63	-125	120
229,22	229,22	232,67	-120	115	197,44	199,88	210,63	-120	115
229,22	229,22	232,67	-120	125	197,44	199,88	210,63	-120	125
229,58	228,89	232,63	-115	120	197,44	199,88	210,63	-125	125
229,58	228,89	232,63	-125	120	199,88	197,44	210,63	-125	120
229,58	228,89	232,63	-120	115	199,88	197,44	210,63	-120	115
229,58	228,89	232,63	-120	125	199,88	197,44	210,63	-120	125
229,96	228,60	232,53	-115	120	201,25	196,43	210,27	-125	120
229,96	228,60	232,53	-125	120	201,25	196,43	210,27	-120	115
229,96	228,60	232,53	-120	115	201,25	196,43	210,27	-120	125
229,96	228,60	232,53	-120	125	198,11	202,96	212,07	-125	120
197,83	200,22	204,69	-115	120	198,11	202,96	212,07	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
197,83	200,22	204,69	-125	120	198,11	202,96	212,07	-120	125
197,83	200,22	204,69	-120	115	198,11	202,96	212,07	-125	125
197,83	200,22	204,69	-120	125	199,13	201,59	212,44	-125	120
198,34	199,55	204,87	-115	120	199,13	201,59	212,44	-120	115
198,34	199,55	204,87	-125	120	199,13	201,59	212,44	-120	125
198,34	199,55	204,87	-120	115	200,29	200,29	212,56	-125	120
198,34	199,55	204,87	-120	125	200,29	200,29	212,56	-120	115
198,91	198,91	204,94	-115	120	200,29	200,29	212,56	-120	125
198,91	198,91	204,94	-125	120	201,59	199,13	212,44	-125	120
198,91	198,91	204,94	-120	115	201,59	199,13	212,44	-120	115
198,91	198,91	204,94	-120	125	201,59	199,13	212,44	-120	125
199,55	198,34	204,87	-115	120	202,96	198,11	212,07	-125	120
199,55	198,34	204,87	-125	120	202,96	198,11	212,07	-120	115
199,55	198,34	204,87	-120	115	202,96	198,11	212,07	-120	125
199,55	198,34	204,87	-120	125	199,79	204,68	213,86	-125	120
200,22	197,83	204,69	-115	120	199,79	204,68	213,86	-120	115
200,22	197,83	204,69	-125	120	199,79	204,68	213,86	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
200,22	197,83	204,69	-120	115	199,79	204,68	213,86	-125	125
200,22	197,83	204,69	-120	125	200,81	203,29	214,24	-125	120
199,55	201,94	206,46	-115	120	200,81	203,29	214,24	-120	115
199,55	201,94	206,46	-125	120	200,81	203,29	214,24	-120	125
199,55	201,94	206,46	-120	115	201,99	201,99	214,36	-125	120
199,55	201,94	206,46	-120	125	201,99	201,99	214,36	-120	115
200,05	201,26	206,63	-115	120	201,99	201,99	214,36	-120	125
200,05	201,26	206,63	-125	120	203,29	200,81	214,24	-125	120
200,05	201,26	206,63	-120	115	203,29	200,81	214,24	-120	115
200,05	201,26	206,63	-120	125	203,29	200,81	214,24	-120	125
200,62	200,62	206,70	-115	120	204,68	199,79	213,86	-125	120
200,62	200,62	206,70	-125	120	204,68	199,79	213,86	-120	115
200,62	200,62	206,70	-120	115	204,68	199,79	213,86	-120	125
200,62	200,62	206,70	-120	125	201,47	206,41	215,66	-125	120
201,26	200,05	206,63	-115	120	201,47	206,41	215,66	-120	115
201,26	200,05	206,63	-125	120	201,47	206,41	215,66	-120	125
201,26	200,05	206,63	-120	115	201,47	206,41	215,66	-125	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
201,26	200,05	206,63	-120	125	202,49	205,01	216,04	-125	120
201,94	199,55	206,46	-115	120	202,49	205,01	216,04	-120	115
201,94	199,55	206,46	-125	120	202,49	205,01	216,04	-120	125
201,94	199,55	206,46	-120	115	205,01	202,49	216,04	-125	120
201,94	199,55	206,46	-120	125	205,01	202,49	216,04	-120	115
201,25	203,67	208,23	-115	120	205,01	202,49	216,04	-120	125
201,25	203,67	208,23	-125	120	206,41	201,47	215,66	-125	120
201,25	203,67	208,23	-120	115	206,41	201,47	215,66	-120	115
201,25	203,67	208,23	-120	125	206,41	201,47	215,66	-120	125
201,75	202,98	208,40	-115	120	203,15	208,12	217,46	-125	120
201,75	202,98	208,40	-125	120	203,15	208,12	217,46	-120	115
201,75	202,98	208,40	-120	115	203,15	208,12	217,46	-120	125
201,75	202,98	208,40	-120	125	203,15	208,12	217,46	-125	125
202,98	201,75	208,40	-115	120	204,19	206,70	217,84	-125	120
202,98	201,75	208,40	-125	120	204,19	206,70	217,84	-120	115
202,98	201,75	208,40	-120	115	204,19	206,70	217,84	-120	125
202,98	201,75	208,40	-120	125	205,39	205,39	217,96	-125	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
203,67	201,25	208,23	-115	120	205,39	205,39	217,96	-120	115
203,67	201,25	208,23	-125	120	205,39	205,39	217,96	-120	125
203,67	201,25	208,23	-120	115	206,70	204,19	217,84	-125	120
203,67	201,25	208,23	-120	125	206,70	204,19	217,84	-120	115
202,96	205,40	209,99	-115	120	206,70	204,19	217,84	-120	125
202,96	205,40	209,99	-125	120	208,12	203,15	217,46	-125	120
202,96	205,40	209,99	-120	115	208,12	203,15	217,46	-120	115
202,96	205,40	209,99	-120	125	208,12	203,15	217,46	-120	125
203,46	204,71	210,17	-115	120	204,83	209,84	219,26	-125	120
203,46	204,71	210,17	-125	120	204,83	209,84	219,26	-120	115
203,46	204,71	210,17	-120	115	204,83	209,84	219,26	-120	125
203,46	204,71	210,17	-120	125	204,83	209,84	219,26	-125	125
204,05	204,05	210,24	-115	120	205,87	208,42	219,64	-125	120
204,05	204,05	210,24	-125	120	205,87	208,42	219,64	-120	115
204,05	204,05	210,24	-120	115	205,87	208,42	219,64	-120	125
204,05	204,05	210,24	-120	125	208,42	205,87	219,64	-125	120
204,71	203,46	210,17	-115	120	208,42	205,87	219,64	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
204,71	203,46	210,17	-125	120	208,42	205,87	219,64	-120	125
204,71	203,46	210,17	-120	115	209,84	204,83	219,26	-125	120
204,71	203,46	210,17	-120	125	209,84	204,83	219,26	-120	115
205,40	202,96	209,99	-115	120	209,84	204,83	219,26	-120	125
205,40	202,96	209,99	-125	120	206,51	211,57	221,04	-125	120
205,40	202,96	209,99	-120	115	206,51	211,57	221,04	-120	125
205,40	202,96	209,99	-120	125	206,51	211,57	221,04	-125	125
204,66	207,12	211,76	-115	120	207,57	210,13	221,44	-125	120
204,66	207,12	211,76	-125	120	207,57	210,13	221,44	-120	115
204,66	207,12	211,76	-120	115	207,57	210,13	221,44	-120	125
204,66	207,12	211,76	-120	125	208,78	208,78	221,56	-125	120
205,18	206,43	211,93	-115	120	208,78	208,78	221,56	-120	115
205,18	206,43	211,93	-125	120	208,78	208,78	221,56	-120	125
205,18	206,43	211,93	-120	115	210,13	207,57	221,44	-125	120
205,18	206,43	211,93	-120	125	210,13	207,57	221,44	-120	115
205,77	205,77	212,00	-115	120	210,13	207,57	221,44	-120	125
205,77	205,77	212,00	-125	120	211,57	206,51	221,04	-125	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
205,77	205,77	212,00	-120	115	211,57	206,51	221,04	-120	115
205,77	205,77	212,00	-120	125	208,19	213,28	222,85	-125	120
206,43	205,18	211,93	-115	120	208,19	213,28	222,85	-120	125
206,43	205,18	211,93	-125	120	208,19	213,28	222,85	-125	125
206,43	205,18	211,93	-120	115	209,25	211,83	223,23	-125	120
206,43	205,18	211,93	-120	125	209,25	211,83	223,23	-120	115
207,12	204,66	211,76	-115	120	209,25	211,83	223,23	-120	125
207,12	204,66	211,76	-125	120	210,48	210,48	223,37	-125	120
207,12	204,66	211,76	-120	115	210,48	210,48	223,37	-120	115
207,12	204,66	211,76	-120	125	210,48	210,48	223,37	-120	125
206,37	208,85	213,51	-115	120	211,83	209,25	223,23	-125	120
206,37	208,85	213,51	-125	120	211,83	209,25	223,23	-120	115
206,37	208,85	213,51	-120	115	211,83	209,25	223,23	-120	125
206,37	208,85	213,51	-120	125	213,28	208,19	222,85	-125	120
206,88	208,14	213,70	-115	120	213,28	208,19	222,85	-120	115
206,88	208,14	213,70	-125	120	209,87	215,00	224,65	-125	120
206,88	208,14	213,70	-120	115	209,87	215,00	224,65	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
206,88	208,14	213,70	-120	125	209,87	215,00	224,65	-125	125
208,14	206,88	213,70	-115	120	210,95	213,54	225,03	-125	120
208,14	206,88	213,70	-125	120	210,95	213,54	225,03	-120	115
208,14	206,88	213,70	-120	115	210,95	213,54	225,03	-120	125
208,14	206,88	213,70	-120	125	212,18	212,18	225,17	-125	120
208,85	206,37	213,51	-115	120	212,18	212,18	225,17	-120	115
208,85	206,37	213,51	-125	120	212,18	212,18	225,17	-120	125
208,85	206,37	213,51	-120	115	213,54	210,95	225,03	-125	120
208,85	206,37	213,51	-120	125	213,54	210,95	225,03	-120	115
208,07	210,58	215,28	-115	120	213,54	210,95	225,03	-120	125
208,07	210,58	215,28	-125	120	215,00	209,87	224,65	-125	120
208,07	210,58	215,28	-120	115	215,00	209,87	224,65	-120	115
208,07	210,58	215,28	-120	125	211,55	216,71	226,45	-125	120
208,59	209,87	215,47	-115	120	211,55	216,71	226,45	-120	125
208,59	209,87	215,47	-125	120	211,55	216,71	226,45	-125	125
208,59	209,87	215,47	-120	115	212,63	215,26	226,83	-125	120
208,59	209,87	215,47	-120	125	212,63	215,26	226,83	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
209,20	209,20	215,54	-115	120	212,63	215,26	226,83	-120	125
209,20	209,20	215,54	-125	120	215,26	212,63	226,83	-125	120
209,20	209,20	215,54	-120	115	215,26	212,63	226,83	-120	115
209,20	209,20	215,54	-120	125	215,26	212,63	226,83	-120	125
209,87	208,59	215,47	-115	120	216,71	211,55	226,45	-125	120
209,87	208,59	215,47	-125	120	216,71	211,55	226,45	-120	115
209,87	208,59	215,47	-120	115	213,23	218,45	228,23	-125	120
209,87	208,59	215,47	-120	125	213,23	218,45	228,23	-120	125
210,58	208,07	215,28	-115	120	214,31	216,96	228,63	-125	120
210,58	208,07	215,28	-125	120	214,31	216,96	228,63	-120	115
210,58	208,07	215,28	-120	115	214,31	216,96	228,63	-120	125
210,58	208,07	215,28	-120	125	215,57	215,57	228,77	-125	120
209,79	212,30	217,04	-115	120	215,57	215,57	228,77	-120	115
209,79	212,30	217,04	-125	120	215,57	215,57	228,77	-120	125
209,79	212,30	217,04	-120	115	216,96	214,31	228,63	-125	120
209,79	212,30	217,04	-120	125	216,96	214,31	228,63	-120	115
210,31	211,59	217,23	-115	120	216,96	214,31	228,63	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
210,31	211,59	217,23	-125	120	218,45	213,23	228,23	-125	120
210,31	211,59	217,23	-120	115	218,45	213,23	228,23	-120	115
210,31	211,59	217,23	-120	125	214,91	220,16	230,03	-125	120
210,91	210,91	217,30	-115	120	214,91	220,16	230,03	-120	125
210,91	210,91	217,30	-125	120	216,00	218,67	230,43	-125	120
210,91	210,91	217,30	-120	115	216,00	218,67	230,43	-120	115
210,91	210,91	217,30	-120	125	216,00	218,67	230,43	-120	125
211,59	210,31	217,23	-115	120	218,67	216,00	230,43	-125	120
211,59	210,31	217,23	-125	120	218,67	216,00	230,43	-120	115
211,59	210,31	217,23	-120	115	218,67	216,00	230,43	-120	125
211,59	210,31	217,23	-120	125	220,16	214,91	230,03	-125	120
212,30	209,79	217,04	-115	120	220,16	214,91	230,03	-120	115
212,30	209,79	217,04	-125	120	216,59	221,88	231,83	-125	120
212,30	209,79	217,04	-120	115	216,59	221,88	231,83	-120	125
212,30	209,79	217,04	-120	125	217,68	220,39	232,23	-125	120
211,48	214,03	218,81	-115	120	217,68	220,39	232,23	-120	115
211,48	214,03	218,81	-125	120	217,68	220,39	232,23	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
211,48	214,03	218,81	-120	115	220,39	217,68	232,23	-125	120
211,48	214,03	218,81	-120	125	220,39	217,68	232,23	-120	115
212,02	213,30	219,00	-115	120	220,39	217,68	232,23	-120	125
212,02	213,30	219,00	-125	120	221,88	216,59	231,83	-125	120
212,02	213,30	219,00	-120	115	221,88	216,59	231,83	-120	115
212,02	213,30	219,00	-120	125	218,27	223,61	233,64	-125	120
213,30	212,02	219,00	-115	120	218,27	223,61	233,64	-120	125
213,30	212,02	219,00	-125	120	219,38	222,08	234,03	-125	120
213,30	212,02	219,00	-120	115	219,38	222,08	234,03	-120	115
213,30	212,02	219,00	-120	125	219,38	222,08	234,03	-120	125
214,03	211,48	218,81	-115	120	222,08	219,38	234,03	-125	120
214,03	211,48	218,81	-125	120	222,08	219,38	234,03	-120	115
214,03	211,48	218,81	-120	115	222,08	219,38	234,03	-120	125
214,03	211,48	218,81	-120	125	223,61	218,27	233,64	-125	120
213,18	215,76	220,58	-115	120	223,61	218,27	233,64	-120	115
213,18	215,76	220,58	-125	120	219,95	225,32	235,42	-125	120
213,18	215,76	220,58	-120	115	219,95	225,32	235,42	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
213,18	215,76	220,58	-120	125	221,06	223,80	235,84	-125	120
213,72	215,02	220,77	-115	120	221,06	223,80	235,84	-120	125
213,72	215,02	220,77	-125	120	223,80	221,06	235,84	-125	120
213,72	215,02	220,77	-120	115	223,80	221,06	235,84	-120	115
213,72	215,02	220,77	-120	125	225,32	219,95	235,42	-125	120
214,34	214,34	220,84	-115	120	225,32	219,95	235,42	-120	115
214,34	214,34	220,84	-125	120	221,63	227,04	237,22	-125	120
214,34	214,34	220,84	-120	115	221,63	227,04	237,22	-120	125
214,34	214,34	220,84	-120	125	222,76	225,50	237,64	-125	120
215,02	213,72	220,77	-115	120	222,76	225,50	237,64	-120	125
215,02	213,72	220,77	-125	120	224,06	224,06	237,78	-125	120
215,02	213,72	220,77	-120	115	224,06	224,06	237,78	-120	115
215,02	213,72	220,77	-120	125	224,06	224,06	237,78	-120	125
215,76	213,18	220,58	-115	120	225,50	222,76	237,64	-125	120
215,76	213,18	220,58	-125	120	225,50	222,76	237,64	-120	115
215,76	213,18	220,58	-120	115	227,04	221,63	237,22	-125	120
215,76	213,18	220,58	-120	125	227,04	221,63	237,22	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
214,90	217,48	222,34	-115	120	223,30	228,77	239,02	-125	120
214,90	217,48	222,34	-125	120	223,30	228,77	239,02	-120	125
214,90	217,48	222,34	-120	115	224,44	227,21	239,44	-125	120
214,90	217,48	222,34	-120	125	224,44	227,21	239,44	-120	125
215,43	216,75	222,53	-115	120	225,76	225,76	239,58	-125	120
215,43	216,75	222,53	-125	120	225,76	225,76	239,58	-120	115
215,43	216,75	222,53	-120	115	225,76	225,76	239,58	-120	125
215,43	216,75	222,53	-120	125	227,21	224,44	239,44	-125	120
216,06	216,06	222,60	-115	120	227,21	224,44	239,44	-120	115
216,06	216,06	222,60	-125	120	228,77	223,30	239,02	-125	120
216,06	216,06	222,60	-120	115	228,77	223,30	239,02	-120	115
216,06	216,06	222,60	-120	125	193,23	199,17	210,36	-125	120
216,75	215,43	222,53	-115	120	193,23	199,17	210,36	-120	125
216,75	215,43	222,53	-125	120	193,23	199,17	210,36	-125	125
216,75	215,43	222,53	-120	115	194,46	197,49	210,81	-125	120
216,75	215,43	222,53	-120	125	194,46	197,49	210,81	-120	115
217,48	214,90	222,34	-115	120	194,46	197,49	210,81	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
217,48	214,90	222,34	-125	120	194,46	197,49	210,81	-125	125
217,48	214,90	222,34	-120	115	197,49	194,46	210,81	-125	120
217,48	214,90	222,34	-120	125	197,49	194,46	210,81	-120	115
216,59	219,21	224,11	-115	120	197,49	194,46	210,81	-120	125
216,59	219,21	224,11	-125	120	199,17	193,23	210,36	-125	120
216,59	219,21	224,11	-120	115	199,17	193,23	210,36	-120	115
216,59	219,21	224,11	-120	125	194,89	200,88	212,18	-125	120
217,15	218,46	224,30	-115	120	194,89	200,88	212,18	-120	125
217,15	218,46	224,30	-125	120	194,89	200,88	212,18	-125	125
217,15	218,46	224,30	-120	115	196,14	199,19	212,63	-125	120
217,15	218,46	224,30	-120	125	196,14	199,19	212,63	-120	115
218,46	217,15	224,30	-115	120	196,14	199,19	212,63	-120	125
218,46	217,15	224,30	-125	120	196,14	199,19	212,63	-125	125
218,46	217,15	224,30	-120	115	197,59	197,59	212,78	-125	120
218,46	217,15	224,30	-120	125	197,59	197,59	212,78	-120	115
219,21	216,59	224,11	-115	120	197,59	197,59	212,78	-120	125
219,21	216,59	224,11	-125	120	199,19	196,14	212,63	-125	120

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
219,21	216,59	224,11	-120	115	199,19	196,14	212,63	-120	115
219,21	216,59	224,11	-120	125	199,19	196,14	212,63	-120	125
218,31	220,94	225,88	-115	120	200,88	194,89	212,18	-125	120
218,31	220,94	225,88	-125	120	200,88	194,89	212,18	-120	115
218,31	220,94	225,88	-120	115	196,55	202,62	213,98	-125	120
218,31	220,94	225,88	-120	125	196,55	202,62	213,98	-120	125
218,84	220,18	226,07	-115	120	196,55	202,62	213,98	-125	125
218,84	220,18	226,07	-125	120	197,82	200,88	214,45	-125	120
218,84	220,18	226,07	-120	115	197,82	200,88	214,45	-120	115
218,84	220,18	226,07	-120	125	197,82	200,88	214,45	-120	125
219,49	219,49	226,14	-115	120	197,82	200,88	214,45	-125	125
219,49	219,49	226,14	-125	120	199,27	199,27	214,60	-125	120
219,49	219,49	226,14	-120	115	199,27	199,27	214,60	-120	115
219,49	219,49	226,14	-120	125	199,27	199,27	214,60	-120	125
220,18	218,84	226,07	-115	120	200,88	197,82	214,45	-125	120
220,18	218,84	226,07	-125	120	200,88	197,82	214,45	-120	115
220,18	218,84	226,07	-120	115	200,88	197,82	214,45	-120	125

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
220,18	218,84	226,07	-120	125	202,62	196,55	213,98	-125	120
220,94	218,31	225,88	-115	120	202,62	196,55	213,98	-120	115
220,94	218,31	225,88	-125	120	198,22	204,33	215,80	-125	120
220,94	218,31	225,88	-120	115	198,22	204,33	215,80	-120	125
220,94	218,31	225,88	-120	125	198,22	204,33	215,80	-125	125
220,00	222,66	227,63	-125	120	199,50	202,58	216,26	-125	120
220,00	222,66	227,63	-120	115	199,50	202,58	216,26	-120	115
220,00	222,66	227,63	-120	125	199,50	202,58	216,26	-120	125
220,56	221,91	227,83	-115	120	199,50	202,58	216,26	-125	125
220,56	221,91	227,83	-125	120	200,97	200,97	216,42	-125	120
220,56	221,91	227,83	-120	115	200,97	200,97	216,42	-120	115
220,56	221,91	227,83	-120	125	200,97	200,97	216,42	-120	125
221,91	220,56	227,83	-115	120	202,58	199,50	216,26	-125	120
221,91	220,56	227,83	-125	120	202,58	199,50	216,26	-120	115
221,91	220,56	227,83	-120	115	202,58	199,50	216,26	-120	125
221,91	220,56	227,83	-120	125	204,33	198,22	215,80	-125	120
222,66	220,00	227,63	-115	120	204,33	198,22	215,80	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
222,66	220,00	227,63	-125	120	199,88	206,04	217,61	-125	120
222,66	220,00	227,63	-120	115	199,88	206,04	217,61	-120	125
222,66	220,00	227,63	-120	125	199,88	206,04	217,61	-125	125
221,72	224,39	229,39	-125	120	201,16	204,30	218,08	-125	120
221,72	224,39	229,39	-120	115	201,16	204,30	218,08	-120	125
221,72	224,39	229,39	-120	125	201,16	204,30	218,08	-125	125
222,27	223,62	229,60	-125	120	204,30	201,16	218,08	-125	120
222,27	223,62	229,60	-120	115	204,30	201,16	218,08	-120	115
222,27	223,62	229,60	-120	125	206,04	199,88	217,61	-125	120
223,62	222,27	229,60	-115	120	206,04	199,88	217,61	-120	115
223,62	222,27	229,60	-125	120	201,56	207,76	219,43	-125	120
223,62	222,27	229,60	-120	115	201,56	207,76	219,43	-120	125
223,62	222,27	229,60	-120	125	201,56	207,76	219,43	-125	125
224,39	221,72	229,39	-115	120	202,84	205,99	219,90	-125	120
224,39	221,72	229,39	-125	120	202,84	205,99	219,90	-120	125
224,39	221,72	229,39	-120	115	205,99	202,84	219,90	-125	120
224,39	221,72	229,39	-120	125	205,99	202,84	219,90	-120	115

V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)	V _a (V)	V _b (V)	V _c (V)	Ang. V _b (°)	Ang. V _c (°)
223,42	226,12	231,16	-125	120	207,76	201,56	219,43	-125	120
223,42	226,12	231,16	-120	115	207,76	201,56	219,43	-120	115
223,42	226,12	231,16	-120	125	203,22	209,47	221,23	-125	120
223,99	225,34	231,37	-125	120	203,22	209,47	221,23	-120	125
223,99	225,34	231,37	-120	115	203,22	209,47	221,23	-125	125
225,34	223,99	231,37	-125	120	204,52	207,69	221,72	-125	120
225,34	223,99	231,37	-120	115	204,52	207,69	221,72	-120	125
225,34	223,99	231,37	-120	125					

A.5 – BD5 – Distorção em uma ordem harmônica

Tabela A.5 - Condições com apenas uma ordem harmônica que constituem o BD5

DIT (%)				DTT
2ª ordem	4ª ordem	5ª ordem	7ª ordem	(%)
1	0	0	0	1
2	0	0	0	2
3	0	0	0	3
4	0	0	0	4
0	1	0	0	1
0	2	0	0	2
0	3	0	0	3
0	0	1	0	1
0	0	2	0	2
0	0	3	0	3
0	0	4	0	4
0	0	5	0	5
0	0	6	0	6
0	0	7	0	7
0	0	8	0	8
0	0	9	0	9
0	0	0	1	1
0	0	0	2	2
0	0	0	3	3
0	0	0	4	4
0	0	0	5	5
0	0	0	6	6
0	0	0	7	7
0	0	0	8	8

A.6 – BD6 – Distorção em duas ordens harmônicas

Tabela A.6 - Condições com duas ordens harmônicas que constituem o BD6

DIT (%)				DTT (%)
2 ^a ordem	4 ^a ordem	5 ^a ordem	7 ^a ordem	
1	0	1	0	1,41
2	0	2	0	2,83
3	0	3	0	4,24
4	0	4	0	5,66
0	1	0	1	1,41
0	2	0	2	2,83
0	3	0	3	4,24
1	1	0	0	1,41
2	2	0	0	2,83
3	3	0	0	4,24
1	0	0	1	1,41
2	0	0	2	2,83
3	0	0	3	4,24
4	0	0	4	5,66
0	1	1	0	1,41
0	2	2	0	2,83
0	3	3	0	4,24
0	0	1	1	1,41
0	0	2	2	2,83
0	0	3	3	4,24
0	0	4	4	5,66
0	0	5	5	7,07
0	0	6	6	8,49
0	0	7	7	9,90