

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA
ÊNFASE EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

MODELOS PARA QUANTIFICAÇÃO DAS PERDAS PROVOCADAS POR
HARMÔNICAS PARA ESTUDOS DE RETORNO DE INVESTIMENTO

Por

Fábio Couto Amorim

Prof. Braz J. Cardoso Filho, Ph.D

(Orientador)

Belo Horizonte, Junho / 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica

Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica

Modelos para Quantificação das Perdas Provocadas por Harmônicas para Estudos
de Retorno de Investimento

Fábio Couto Amorim

Orientador: Prof. Braz J. Cardoso Filho, Ph.D

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários a obtenção do Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

Belo Horizonte, Junho / 2012

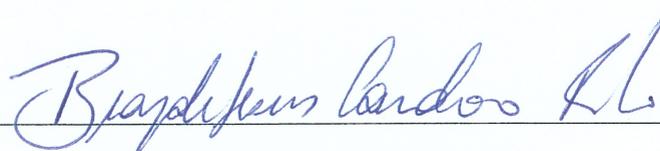
Modelos para Quantificação das Perdas Provocadas por Harmônicas para Estudos de Retorno de Investimento

Fábio Couto Amorim

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários a obtenção do *Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica*.

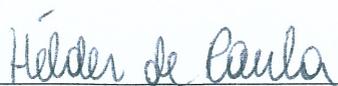
Aprovada em 24 de Julho de 2012.

Por:



Prof. Braz J. Cardoso Filho, Ph.D

(Orientador)



Prof. Hélder de Paula, Ph.D

(Relator)

*A minha esposa Alexandra e minha filha
Carolina pelo incentivo, compreensão, apoio e carinho.*

Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Braz J. Cardoso Filho, pela contribuição para execução deste trabalho através da transferência de parte do seu grande conhecimento, total disponibilidade física e de recursos pessoais para execução das medições em campo, apresentação de experiências de vida e outras cooperações.

Ao amigo Eurides Silva e aos profissionais Welney Paiva, Elim Geraldo Pereira e Luiz Viana pelo apoio técnico.

A todos que contribuíram de alguma forma na construção deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho contribui com elementos para a discussão sobre o prejuízo das distorções harmônicas nas indústrias sob o ponto de vista financeiro. É apresentada uma aplicação simples e direta de um equacionamento baseado em cálculos e medições obtidas em campo, tendo como objetivo quantificar as perdas provocadas por harmônicas para aplicação em estudos específicos onde uma grande precisão não é requerida, como por exemplo, análises de viabilidade econômica. O foco principal é sobre o modelo para quantificação das perdas em motores de indução com rotor em gaiola, devido a sua grande importância no contexto industrial. Para possibilitar uma aplicação mais direta de toda a teoria das harmônicas e suas perdas relacionadas, foram adaptados e transcritos modelos descritos na literatura técnica acrescidas de explicações próprias e de outras fontes, proporcionando uma compilação de dados relacionados ao objetivo de quantificar perdas harmônicas. Os modelos foram base para produção de um equacionamento orientado à aplicação de valores de entrada que podem ser obtidos através de ensaios de rotina e medições, viabilizando uma aplicação prática do trabalho. Para uma validação inicial dos modelos e equações foi realizado um estudo de caso que analisou dois motores submetidos a um ponto de acoplamento comum (*PCC*) com forma de onda de tensão distorcida em uma indústria local, sendo base para quatro extrapolações de cenários com foco em demonstrar a viabilidade para continuidade dos estudos.

Palavras-chave: Perdas. Perdas Harmônicas. Quantificação de Perdas. Medição de Perdas. Cálculo de Perdas. Componentes Harmônicas. Harmônicas. Análise Econômica. Análise Financeira. Viabilidade Econômica.

ABSTRACT

This paper contributes to the discussion on financial losses in industries caused by harmonic distortions. It presents a simple and direct application of calculations and measurements obtained in the field. The goal is to quantify the losses caused by harmonics aimed at specific studies in which great accuracy is not required as, for example, in the analysis of economic viability. The main focus is on the losses modeling and quantification in squirrel-cage motors, due to their great importance in the industrial context. In order to enable a more direct application of the whole harmonics theory and related losses, models described in technical literature were adapted and transcribed in the text. Explanations from the author and from other sources, providing a compilation of data related to the quantification of harmonic losses, are also provided. In order to validate the models and equations, a case study is presented. This case study is based on two motors connected to a point of common coupling (*PCC*) in a local industry, where the voltage waveform distortion was characterized. The results obtained formed the basis for four theoretical scenarios, focused on demonstrating the feasibility of continuing studies.

Key-words: Losses. Harmonic Losses. Losses Quantification. Losses Measurements. Losses Calculation. Harmonic Components. Harmonic. Economic Analysis. Financial Analysis. Economic Viability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de circuito para análise de barra	32
Figura 2 - (a) Fluxo de potência para componente fundamental (b) Fluxo de potência para componetes harmônicas.....	35
Figura 3 – Fonte de Corrente.....	38
Figura 4 – Fonte de Tensão.....	38
Figura 5 – Circuito Equivalente para Motor de Indução (Modelo).....	39
Figura 6 – Circuito Equivalente para Motor de Indução (Modelo Alternativo).....	40
Figura 7 – Modelo do Circuito do Estator e de Magnetização de um Motor de Indução Adaptado para Aplicação em Estudos de Harmônicas deste Trabalho	44
Figura 8 – Gráfico de perdas no núcleo em função da densidade de fluxo magnético	47
Figura 9 – Modelo do Circuito do Rotor de um Motor de Indução para Aplicação em Estudos de Harmônicas incluindo o efeito pelicular	54
Figura 10 – Modelo do Circuito do Motor de Indução Adaptado para Aplicação nos Estudos de Harmônicas deste Trabalho.....	59
Figura 11 – Modelo do Transformador	59
Figura 12 – Modelo do Cabo.....	61
Figura 13 – Modelo de Capacitor.....	63
Figura 14 – Modelo de Indutor	65
Figura 15 – Circuito Equivalente para Máquina Síncrona de Polos Lisos Trabalhando como Gerador	67
Figura 16 – Circuito Equivalente para Máquina Síncrona de Polos Lisos Trabalhando como Gerador, com as duas componentes da reatância síncrona.....	67

Figura 17 – Modelo de Máquina Síncrona Trabalhando como Gerador para Aplicação em Estudos de Harmônicas	68
Figura 18 – Instrumento Coletando Medidas.....	70
Figura 19 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Elevador de Caçambas.....	73
Figura 20 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ventilador ar Exaustor	73
Figura 21 – Forma de Onda de Tensão e Corrente - Sistema Centrífugo	74
Figura 22 – Forma de Onda de Tensão e Corrente - Rotor de Cimento.....	74
Figura 23 – Forma de Onda de Tensão e Corrente - Rotor de Escória	75
Figura 24 – Circuito Monofásico do Estudo de Caso	75
Figura 25 – Curva Potência VS Escorregamento.....	82
Figura 26 – Corrente de Estator VS Escorregamento	82
Figura 27 – Conjugado VS Escorregamento	83
Figura 28 – Rendimento VS Escorregamento	83
Figura 29 – Fator de Potência VS Escorregamento	84
Figura 30 – Análise Financeira do Estudo de Caso	89
Figura 31 – Análise Financeira do Estudo de Caso - Cenário 1	91
Figura 32 – Gráfico de Perdas Totais Devido à Harmônicas em função da THD _V	95
Figura 33 – Gráfico de Perdas Totais Devido à Harmônicas em função da THD _V (Fase Quadrática)	96
Figura 34 – Gráfico de Perdas Totais Devido à Harmônicas em função da THD _V (Fase Linear)	96
Figura 35 – Análise Financeira do Estudo de Caso - Cenário 2 - THD _V de 25%.....	100
Figura 36 – Análise Financeira do Estudo de Caso - Cenário 2 - THD _V de 40%.....	100

Figura 37 – Modelo do Circuito do Motor de Indução para Sequência Positiva	104
Figura 38 – Modelo do Circuito do Motor de Indução para Sequência Negativa.....	104
Figura 39 – Curva de <i>Derating</i> de Motores de Indução.....	105
Figura 40 – Análise Financeira do Estudo de Caso - Cenário 4	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Efeitos Provocados Pelas Harmônicas	29
Tabela 2 – Premissas do Trabalho	31
Tabela 3 – Descrição dos Componentes do Modelo do Circuito do Estator e de Magnetização	44
Tabela 4 – Descrição dos Componentes das Equações de (8) a (10).....	45
Tabela 5 – Descrição dos Componentes das Equações de (11) a (33).....	51
Tabela 6 – Descrição dos Componentes do Modelo de Motor de Indução para Aplicação em Estudos de Harmônicas	55
Tabela 7 – Descrição dos Componentes das Equações de (35) a (44).....	56
Tabela 8 – Definição do Sinal para Aplicação na Equação (44)	58
Tabela 9 – Descrição dos Componentes do Modelo do Transformador	60
Tabela 10 – Descrição dos Componentes das Equações de (45) a (47).....	60
Tabela 11 – Descrição dos Componentes do Modelo de Cabos	62
Tabela 12 – Descrição dos Componentes das Equações de (48) a (52).....	62
Tabela 13 – Descrição dos Componentes do Modelo de Capacitor	64
Tabela 14 – Descrição dos Componentes das Equações de (53) e (54).....	64
Tabela 15 – Descrição dos Componentes do Modelo de Indutor	65
Tabela 16 – Descrição dos Componentes das Equações de (55) a (57).....	66
Tabela 17 – Descrição dos Componentes do Modelo de Máquina Síncrona Trabalhando como Gerador para Aplicação em Estudos de Harmônicas	68
Tabela 18 – Descrição dos Componentes das Equações de (58) a (60).....	69
Tabela 19 – Cargas do Sistema.....	71

Tabela 20 – Cargas do Sistema Analisadas no Estudo de Caso	72
Tabela 21 – Cargas não Lineares do Sistema Analisadas no Estudo de Caso	74
Tabela 22 – Dados de Catálogo do Motor do Elevador de Caçambas	76
Tabela 23 – Dados de Catálogo do Motor do Ventilador Ar Exaustor.....	77
Tabela 24 – Descrição dos Componentes das Equações de (61) a (69).....	80
Tabela 25 – Parâmetros Típicos de Motor de Indução (Valores em pu).....	81
Tabela 26 – Parâmetros Necessários para Iniciar Efetuar os Ajustes das Curvas....	81
Tabela 27 – Valores dos Componentes da Figura 24 (Motor do Elevador de Caçambas)	84
Tabela 28 – Valores dos Componentes da Figura 24 (Motor do Ventilador Ar Exaustor)	85
Tabela 29 – Perdas nas Cargas Analisadas.....	86
Tabela 30 – Descrição dos Componentes das Equações de (76) e (77).....	88
Tabela 31 – Valores Utilizados nos Cálculos de Ganhos e suas Premissas	88
Tabela 32 – Valores Utilizados nos Cálculos de Ganhos e suas Premissas – Cenário 1	90
Tabela 33 – Perdas Totais e Aumento Médio de Perdas por THD _v	93
Tabela 34 – Valores Utilizados nos Cálculos de Ganhos e suas Premissas – Cenário 2.....	97
Tabela 35 – Perdas Financeiras em Função das Perdas Elétricas e THD _v	98
Tabela 36 – Parâmetros dos Motores (Valores em pu / Ohms)	101
Tabela 37 – Acréscimo de Perdas Por Harmônicas	102
Tabela 38 – Tensões e FDT das Fontes dos Motores dos Estudos	103

Tabela 39 – Aumento das Perdas dos Motores.....	103
Tabela 40 – Valores Utilizados nos Cálculos de Ganhos e suas Premissas – Cenário 4.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS

Orig. Ing.	Sigla original em Inglês
Pág.	Página
Cap.	Capítulo
p. ex.	Por exemplo

LISTA DE SIGLAS

A	Coeficiente IEEE para correção do efeito pelicular na resistência para motor de indução, transformador e indutor
A_r	Área efetiva que é atravessada pelo fluxo enlaçado
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
B	Coeficiente IEEE para correção do efeito pelicular na resistência para motor de indução, transformador e indutor
B_m	Densidade de fluxo magnético de pico
C	Capacitância
CAT	Categoria
C_{max}	Conjugado máximo
C_n	Conjugado nominal
C_{nom}	Conjugado nominal
COD	Código
C_p	Conjugado de partida
CR	Fator de gaiola para resistência
CX	Fator de gaiola para indutância
\hat{E}_2	FCEM (de fase) gerada pelo fluxo de entreferro resultante
\hat{E}_{af}	Tensão gerada
ENA	Energy Networks Association
\hat{E}_R	Tensão eficaz
f	Frequência da componente fundamental

FCEM	Força contra-eletromotriz
FDT	Fator de desequilíbrio de tensão
f_e	Frequência do fluxo magnético
FP	Fator de potência nominal do motor
FS	Fator de serviço
G	Gerador
G_A	Ganho anual da ação
(h)	Componente harmônica referenciada
h	Componente harmônica
h_A	Horas úteis para a análise
h_{PA}	Horas paradas anualmente
h_{TA}	Horas Disponíveis para Trabalho por Ano
I	Corrente elétrica
\hat{I}_1	Corrente de estator
\hat{I}_{1VZ}	Corrente de estator para motor a vazio
\hat{I}_2	Corrente do rotor (componente de carga)
\hat{I}_a	Corrente de armadura
I_b	Corrente Base
\hat{I}_C	Corrente sobre R_C (componente de perdas no núcleo)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

I_h	Amplitude de corrente
\hat{I}_m	Corrente de magnetização sobre X_m (componente de magnetização)
I_n	Corrente nominal
$I_{nom} (pu)$	Corrente nominal em pu
I_p	Corrente de partida
ISOL. CL.	Classe de isolamento
\hat{I}_φ	Corrente de magnetização (componente de excitação)
K_F	Constante da equação de perdas por correntes de Foucault
K_H	Coefficiente de <i>Steinmetz</i>
KPI	Indicador chave de desempenho (Orig. Ing.: Key Performance Indicator)
L	Indutância
$L_2(h)$	Indutância do rotor referida ao estator (valor corrigido para componente harmônica h)
L_20	Indutância do rotor referida ao estator com valor para corrente contínua
L_{cb}	Indutância do cabo
M	Coefficiente IEEE para correção do efeito pelicular na resistência para cabo
n	Numero
N	Numero de espiras em uma bobina
ONS	Operador Nacional do Sistema

P	Numero de polos do motor
P_b	Potência Base
PB	Payback simples
P_{C1}	Energia convertida para diferentes frequências
PCC	Ponto de Acoplamento Comum (Orig. Ing.: Point of Common Coupling)
P_E	Potência de entreferro
P_F	Perdas por correntes de Foucault
P_{g1}	Energia do gerador
P_{gh}	Energia harmônica do gerador
P_H	Perdas por histerese
P_{I1}	Energia transferida para carga
P_{Ih}	Energia harmônica na carga
P_{mec}	Potência eletromecânica
P_{mec}	Potência Mecânica
P_N	Perdas por efeito joule no cobre do rotor e perdas no núcleo
P_{PF}	Proporção de perdas por correntes de Foucault
P_{PH}	Proporção de perdas por histerese
P_{R1}	Perdas por efeito joule no cobre do estator
P_{ROT}	Perdas rotacionais
P_{rotor}	Potência perda térmica no condutor da gaiola do rotor
P_{S1}	Perda adicional para frequência fundamental

P_{sh}	Energia harmônica da linha
P_T	Perdas Totais Consequentes das Harmônicas
P_{VZ}	Potência de entrada do motor quando a vazio
R	Resistência elétrica
R_1	Resistência efetiva do estator
R_2	Resistência do rotor referido
R_{20}	Resistência do rotor referida ao estator
R_a	Resistência de armadura
R_C	Resistência de perdas no núcleo
$R_{cb}(h)$	Resistência do cabo com valor corrigido para componente harmônica h
R_{dcarm}	Resistência de armadura com valor para corrente contínua
R_{dcest}	Resistência efetiva de estator com valor para corrente contínua
$R_{descarga}$	Resistência de descarga do capacitor
REG	Regime
$R_g(h)$	Resistência de armadura com valor corrigido para componente harmônica referenciada
R_{gh}	Resistência da impedância harmônica do gerador
$R_{ind}(h)$	Resistência do indutor com valor corrigido para componente harmônica h
R_l	Carga puramente resistiva

R_{perda}	Resistência que representa a perda dielétrica no capacitor
$RPMr$	Velocidade do rotor do motor
$RPMs$	Velocidade síncrona do campo girante do motor
R_S	Resistência da impedância da linha
R_{sh}	Resistência da impedância harmônica da linha
$R_T(h)$	Resistência do primário com valor corrigido para componente harmônica h
S	Escorregamento (Orig. Ing.: Slip)
$Seq (-)$	Componente para sequência negativa
$Seq (+)$	Componente para sequência positiva
Sh	Escorregamento para frequência harmônica
t	Espessura das chapas laminadas do núcleo
T	Período
$T_{b\ mec}$	Torque Base
THD	Distorção harmônica total (Orig. Ing.: Total Harmonic Distortion)
THD_V	Distorção harmônica total de tensão
TIE	Interligação
$T_{nom\ (pu)}$	Torque nominal em pu
\hat{V}_1	Tensão de fase de terminal do estator
\hat{V}_{1VZ}	Tensão de fase de terminal do estator no ensaio a vazio

\hat{V}_a	Tensão terminal
V_b	Tensão Fase Neutro Base
V_h	Amplitude de tensão
$V_{rel}(h)$	Proporcionalidade entre a tensão da componente harmônica e a fundamental
X''	Reatância subtransitória
X''_d	Reatância subtransitória de eixo direto
X''_q	Reatância subtransitória eixo de quadratura
X_1	Reatância de dispersão do estator
X_2	Reatância de dispersão do rotor
X_{al}	Reatância de dispersão de armadura
X_{ald}	Reatância de dispersão de armadura de eixo direto
X_{alq}	Reatância de dispersão de armadura de quadratura
X_{cb}	Reatância do cabo para frequência da fundamental
$X_{cb}(h)$	Reatância do cabo com valor corrigido para componente harmônica h
$X_{cp}(h)$	Reatância do capacitor com valor corrigido para componente harmônica h
$X_g(h)$	Reatância subtransitória com valor corrigido para componente harmônica referenciada
X_{gh}	Reatância da impedância harmônica do gerador
$X_{ind}(h)$	Reatância do indutor com valor corrigido para componente harmônica h

X_m	Reatância de magnetização
$X_M(h)$	Reatância de magnetização com valor corrigido para componente harmônica h
X_S	Reatância da impedância da linha
X_s	Reatância síncrona
X_{sh}	Reatância da impedância harmônica da linha
$X_T(h)$	Reatância de dispersão de primário com valor corrigido para componente harmônica h
X_φ	Reatância de magnetização
X_φ	Reatância de magnetização de eixo de quadratura
$X_{\varphi d}$	Reatância de magnetização de eixo direto
Z_b	Impedância Base
λ	Fluxo enlaçado por uma bobina
ρ	Resistividade
ϕ	Defasagem angular
ω	Frequência angular
ω_0	Velocidade angular síncrona
ω_b	Velocidade Base
$\omega_{b\text{ mec}}$	Velocidade Mecânica Base
$\omega_{e\text{ nom}}$	Velocidade Angular Nominal
ωh	Velocidade angular da componente harmônica
ωr	Velocidade angular do rotor

LISTA DE SÍMBOLOS / UNIDADES

<i>%</i>	Por cento
<i>A</i>	Ampere
<i>CV</i>	Cavalo vapor
<i>F</i>	Faraday
<i>H</i>	Henry
<i>h</i>	Horas
<i>H/m</i>	Henry por metro
<i>Hz</i>	Hertz
<i>in</i>	Polegadas
<i>k</i>	Kilo
<i>kgfm</i>	Kilo grama força por metro
<i>Kilolines/in²</i>	Kilolinhas por polegada quadrada
<i>kWh</i>	Kilowatt-hora
<i>Lines/cm²</i>	Linhas por centímetro quadrado (Gauss)
<i>m²</i>	Metro quadrado
<i>mm</i>	milímetros
<i>N</i>	Newton
<i>pu</i>	Por unidade
<i>R\$</i>	Reais
<i>rad/s</i>	Radianos por segundos

<i>RPM</i>	Rotações por minuto
<i>Tesla/cm²</i>	Tesla por centímetro quadrado
<i>V</i>	Volts
<i>W</i>	Watts
<i>Watts/cm³</i>	Watts por centímetro cúbico
<i>Watts/in³</i>	Watts por polegada cúbica
<i>Wb</i>	Weber
<i>Weber/m²</i>	Weber por metro quadrado
Ω	Ohms
Ω/m	Ohms por metro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	28
2.	PREMISSAS.....	30
3.	DESENVOLVIMENTO	32
4.	HARMÔNICAS E PERDAS RELACIONADAS	33
4.1	Harmônicas	33
4.2	Perdas Devido às Harmônicas	35
5.	MODELOS PARA DEFINIÇÃO DAS PERDAS POR HARMÔNICAS.....	36
5.1	Fontes	37
5.2	Motores de Indução.....	39
5.2.1	<i>Adequação na Estrutura do Circuito do Estator e de Magnetização..</i>	<i>42</i>
5.2.2	<i>Correção das Perdas por Histerese e Correntes de Foucault.....</i>	<i>45</i>
5.2.3	<i>Determinação e Proporção das Perdas por Histerese e Correntes de Foucault</i>	<i>46</i>
5.2.4	<i>Determinação do Fator de Correção das Perdas por Histerese e Correntes de Foucault</i>	<i>47</i>
5.2.5	<i>Aplicação do Fator de Correção das Perdas por Histerese e Correntes de Foucault</i>	<i>51</i>
5.2.6	<i>Obtenção da Nova Resistência de Perdas no Núcleo.....</i>	<i>53</i>
5.2.7	<i>Modelo do Circuito do Rotor.....</i>	<i>54</i>
5.2.8	<i>Modelo do Motor de Indução.....</i>	<i>58</i>
5.3	Transformadores	59
5.4	Cabos	61

5.5	Capacitores	63
5.6	Indutores	64
5.7	Geradores	66
6.	ESTUDO DE CASO	70
6.1	Descrição do Caso	70
6.2	Técnica Utilizada para Obtenção dos Parâmetros dos Motores	76
6.3	Valores Calculados	85
6.4	Valores Medidos	87
6.5	Análise Financeira	87
6.5.1	<i>Cenário 1 – Considerando Efeito de Perdas sobre Todas as Cargas da Indústria do Estudo de Caso</i>	<i>90</i>
6.5.2	<i>Cenário 2 – Considerando Distorções Harmônicas de Tensão Mais Severas Aplicadas ao Cenário 1</i>	<i>92</i>
6.5.3	<i>Cenário 3 – Análise das Perdas Relativas para Motores de Pequeno, Médio e Grande Porte</i>	<i>101</i>
6.5.4	<i>Cenário 4 – Análise do Acréscimo de Perdas Devido ao Desequilíbrio de Tensão</i>	<i>102</i>
7.	CONCLUSÃO	107
	REFERÊNCIAS	108
	ANEXOS	110
	ANEXO A - DADOS PARA CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO DA FIGURA 8	111
	ANEXO B – CÓDIGO MATLAB PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE MOTORES DE INDUÇÃO	113

ANEXO C – VALORES DO CIRCUITO DA FIGURA 24 – PLANILHA DE CÁLCULOS.....	116
ANEXO D – VALORES MEDIDOS NO ESTUDO DE CASO	122
ANEXO E – TABELA COMPARATIVA – VALORES CALCULADOS VS VALORES MEDIDOS NO ESTUDO DE CASO.....	124

1. INTRODUÇÃO

As indústrias consumidoras de energia elétrica e interligadas aos sistemas de potência procuram atendimento às determinações das entidades regulamentadoras da qualidade da energia do país onde estão instaladas, tanto do ponto de vista de consumidores que exigem um bom produto, quanto de cargas inseridas neste sistema, capazes de distorcer¹ a forma de onda da tensão no *PCC* em que estão inseridas, que pode ser o mesmo do fornecimento para outro consumidor, que será prejudicado com esta falta de qualidade pontual ou do sistema, quando em uma grande distorção. Com o objetivo de não provocarem deformação na forma de onda da tensão do sistema em que estão inseridas e manter a distorção harmônica total (THD²) dentro dos valores estabelecidos pelas regulamentações locais, as indústrias utilizam filtros passivos conectados em suas entradas de energia, calculados para mitigarem as harmônicas existentes em determinadas frequências, estabelecendo desta forma, uma identificação pelo sistema de característica de cargas lineares, com pouca distorção das formas de onda. Similar à necessidade de manter a THD dentro de limites estabelecidos, existe o controle do fator de potência da planta para que este apresente valores dentro de limites regulamentados, sendo geralmente adotada a solução de correção no ponto de entrada. Esta solução tem vantagem peculiar, pois para construção dos bancos de correção são principalmente utilizados capacitores para ajustar o fator de potência a valores desejados, podendo ser calculados para também corrigir distorções harmônicas, quando combinados com outros componentes (p. ex. indutores), ficando este conjunto com dupla função, mitigar as harmônicas indesejadas e corrigir o fator de potência. A solução de mitigar harmônicas na entrada é mais simples se comparada a uma ação de redução dos efeitos das harmônicas atuando diretamente em todas as cargas que provocam estes individualmente dentro da indústria, pois como acontece na compensação de fator de potência nas entradas, esta ação vai corrigir os valores indesejados do

¹ Consumidores que possuem características equivalentes a grandes cargas não lineares.

² Sigla designada para denominar distorção harmônica total (total harmonic distortion), utilizada pelo International Electrotechnical Commission (IEC) em sua série normativa 61000, pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) em sua norma 519 de 1992 e pela Energy Networks Association (ENA) em sua recomendação de engenharia G5/4-1 de 2005. O Operador Nacional do Sistema (ONS) determina a sigla DTHT no seu Procedimento de Rede Rev.3 para determinação similar da distorção harmônica total de tensão. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina a sigla DTT no seu Procedimento de Distribuição Rev.0 para determinação similar da distorção harmônica total de tensão.

ponto de vista do sistema para a indústria para valores dentro dos limites estabelecidos, visto que a indústria será uma carga equivalentemente adequada quando identificada pelo sistema. Porém, do ponto de entrada desta indústria, onde ocorre a correção, até todas as suas cargas não lineares, ainda vão circular correntes harmônicas, provocando fenômenos prejudiciais aos seus circuitos e ao seu sistema como um todo. Conforme descrito em [ARR 03], Pág. 143, os principais efeitos das tensões e correntes harmônicas estão destacados na Tabela 1. É sabido que inserção de diversos filtros distribuídos pode provocar algumas consequências (p. ex. dificuldades de manutenção e ressonâncias imprevistas), porém, não é o foco deste trabalho a análise destas.

Tabela 1 – Principais Efeitos Provocados Pelas Harmônicas

Item	Efeito
1	Redução na eficiência de geração, transmissão e utilização da energia elétrica.
2	A possibilidade de ampliação dos níveis de harmônicas resultantes de ressonâncias série e paralelas
3	O envelhecimento do isolamento dos componentes das instalações elétricas, com consequente diminuição da sua vida útil.
4	Mal funcionamento de sistemas ou componentes de uma planta

Fonte: Referência [ARR 03]

Com a constante redução dos recursos naturais não renováveis e a necessidade de redução drástica na emissão de gases prejudiciais ao clima e a atmosfera, devem ser analisadas todas as possibilidades energéticas de redução do consumo ou a utilização mais eficiente da quantidade atualmente consumida. Muitas vezes, a redução do consumo implica em redução de produtividade, o que não é desejado ou aceito pelas indústrias que tem como um dos objetivos do seu planejamento estratégico o aumento do faturamento e da produção, sendo esta uma ação menos utilizada nas grandes empresas industriais. Porém, a utilização eficiente da energia é um ótimo negócio, pois proporciona um rendimento melhor das instalações, refletindo sua ação em um melhor valor para um dos indicadores chave de desempenho (KPI) mais observado atualmente pelos setores de produção, que é a relação da “quantidade produzida versus energia utilizada neste processo produtivo”. Desta forma, ele fica melhor quando para uma mesma quantidade

produzida utilizamos menos energia através da eficiência ou até mesmo quando com uma mesma quantidade de energia é conseguida uma maior produção.

Para alcançar a proposta deste estudo são necessárias basicamente duas etapas de análise. A primeira, contemplada neste trabalho, é a quantificação através de medições e cálculos da energia utilizada para suprir as perdas provocadas pelo efeito citado no item 1 da Tabela 1, sendo esta posteriormente vinculada a um potencial financeiro para aplicação na segunda linha de estudo. Possuindo um foco prático e direto, o principal objetivo da primeira linha é detalhar as perdas provocadas pelas harmônicas nos circuitos de potência internos a uma indústria, verificando seus valores físicos e financeiros, para posteriormente justificar o investimento em tecnologias de mitigação existentes ou novas, objeto da segunda linha. A segunda etapa, trabalho futuro, é a análise financeira do montante que poderá ser aplicado para aplicação em soluções de mitigação do efeito descrito, reduzindo o consumo da energia elétrica, sem alterar a quantidade disponibilizada para as máquinas produtivas, ou seja, sem redução da produção, refletindo positivamente no índice alvo. Após a análise destas etapas será possível obter algumas conclusões e indicações de novos estudos complementares.

2. PREMISSAS

As premissas deste trabalho têm como objetivo principal focar os estudos em questões de maior influência nos resultados, limitando assim sua abrangência, porém, de forma alguma, com perda da sua relevância, pois apenas restringe questões de menor impacto nos objetivos finais do trabalho, conforme explicitado para cada item. Enfim, perde-se em abrangência, mas se ganha em profundidade, facilidade de aplicação e cumprimento dos objetivos propostos. Não é objetivo direto das premissas, porém são consequências da sua adoção a orientação para o leitor das expectativas quanto os resultados que poderão ser encontrados neste trabalho e a identificação mais imediata da possibilidade de aplicação deste trabalho em seu estudo ou caso.

Tabela 2 – Premissas do Trabalho

Item	Premissa	Justificativa
1	O foco principal é sobre o modelo para quantificação das perdas em motores de indução com rotor em gaiola	Limitar a abrangência do estudo, porém, investindo esforço sobre uma importância carga presente no contexto industrial.
2	Apenas serão consideradas no trabalho as perdas por harmônicas para os componentes apresentados no item 5.	Limitar a abrangência do estudo, porém, considerando componentes de bastante relevância no quesito perdas devido a existência de componentes harmônicas.
3	As formulações e resultados foram desenvolvidos para aplicação em circuitos equivalentes ao circuito conceito apresentado na Figura 1, considerando os componentes existentes em cada caso.	Limitar a abrangência do estudo e possibilitar a aplicação do trabalho em diversas configurações similares, desde que transformadas e circuitos com equivalência elétrica.
4	As análises são por barramento e em configurações definidas, mesmo com a existência de diversas possibilidades de configuração, como por exemplo, quando na existência de um disjuntor TIE, este deverá ser considerado aberto ou fechado para cada análise. O circuito apresentado na Figura 1 é um exemplo típico de uma barra para análise.	Simplificar a quantificação das perdas e orientar melhor os potenciais de investimento.
5	O trabalho foi desenvolvido para aplicação em regime permanente.	As análises financeiras são extrapoladas para períodos de anos, portanto, extremamente superiores aos transitórios elétricos.
6	Os modelos de cabos apresentados são para aplicação em linhas curtas ³ .	O objetivo dos estudos são aplicações internas às indústrias.
7	Não será considerada correção de temperatura para os valores das resistências.	A técnica utilizada neste trabalho para obtenção dos parâmetros das máquinas considera o motor em regime nominal, portanto, em temperatura de trabalho e não em temperatura dos ensaios de laboratório.

³ Conforme [IEE 97], Pág. 58, deve ser utilizado o modelo considerado neste deste trabalho para linhas curtas, menor que 50 mi (80,47 km).

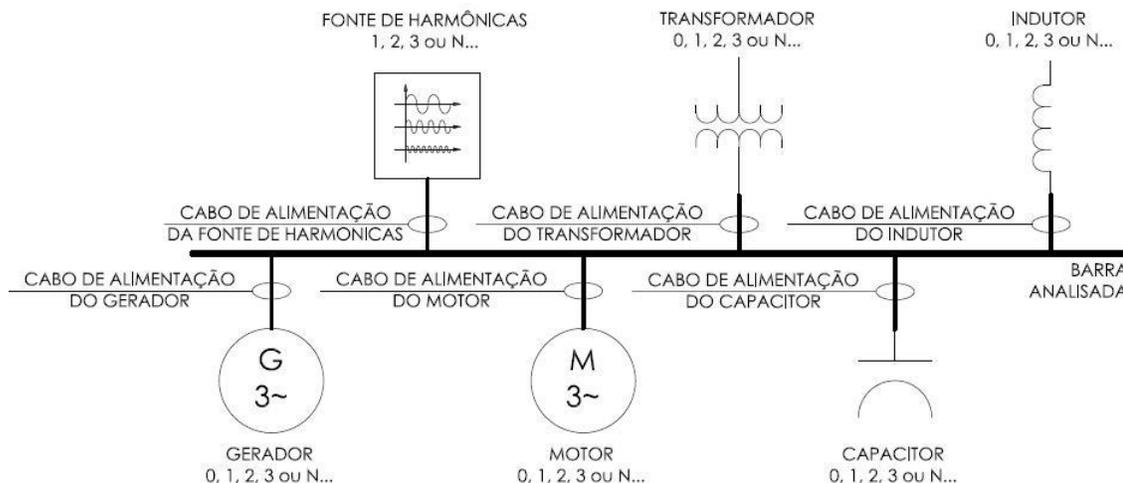


Figura 1 – Exemplo de circuito para análise de barra

3. DESENVOLVIMENTO

Para cumprimento dos seus objetivos, este trabalho foi desenvolvido considerando algumas etapas.

Através do item 4 (HARMÔNICAS E PERDAS RELACIONADAS) é apresentada uma introdução teoria resumida sobre o tema harmônicas e perdas relacionadas, proporcionando uma base de entendimento para os itens a jusante.

Sendo a principal base teórica e ferramental do trabalho, o item 5 (MODELOS PARA DEFINIÇÃO DAS PERDAS POR HARMÔNICAS) propõem um conjunto de modelos transferidos ou adaptados a partir de referencias tradicionais sobre o tema. Estes modelos proporcionam um ferramental adequado para a posterior quantificação das perdas provocadas por componentes harmônicas.

Iniciando o processo de validação dos modelos apresentados no item 5, o item 6 (ESTUDO DE CASO) apresenta uma aplicação prática dos modelos relacionados neste trabalho, proporcionando uma análise inicial dos valores apresentados pelos resultados, verificando de forma preliminar se realmente tem um apelo econômico interessante a proposta deste trabalho. Este estudo de caso não é profundo, porém possibilita verificar a viabilidade de avanço dos estudos para fases seguintes.

4. HARMÔNICAS E PERDAS RELACIONADAS

Conforme apresentado na Tabela 1, a existência de harmônicas nos circuitos elétricos provoca consequências não desejadas. Os seguintes subitens apresentam uma introdução básica sobre harmônicas e sua relação com as perdas.

4.1 Harmônicas

Conforme postulado por J.B.J. Fourier em seu trabalho “Theorie analytique de la chaleur (1822)” e citado em [ARR 03], Cap. 2, Pág. 18, uma função contínua e periódica para um intervalo “ T ” pode ser representada por uma soma composta por uma componente contínua, uma componente senoidal denominada fundamental, com sua frequência definida, e outras infinitas componentes senoidais com frequências múltiplas da frequência definida para componente senoidal fundamental, estas últimas, são denominadas as harmônicas. Desta forma, a harmônica é definida como uma componente de uma função, cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sistema.

Esta teoria é válida e aplicada para circuitos elétricos, porém, o estabelecimento destas componentes harmônicas apenas ocorrerá se uma fonte de tensão senoidal suprir cargas não lineares, conforme o processo de geração descrito mais a frente.

Cargas lineares são componentes elétricos não saturados que possuem uma relação linear entre a tensão senoidal submetida em seus terminais e a corrente que circula por ele devido a sua alimentação. São exemplos de cargas lineares resistores, indutores e capacitores, sendo válido apenas para indutores não saturados e para resistências quando desconsiderando seu efeito pelicular⁴.

Em oposição a esta definição, as cargas não lineares são componentes elétricos que não possuem uma relação linear entre a tensão senoidal submetida em

⁴ O efeito pelicular (*skin effect* em inglês) em um condutor ocorre devido à ação da corrente variante no tempo (alternada) circulante no sentido neste. Esta gera um campo magnético por sua vez induz campo elétrico nas áreas periféricas do condutor, concentrando nesta área a passagem dos elétrons da corrente. Com a concentração dos elétrons na periferia do cabo, a área efetiva de condução fica reduzida, provocando aumento da resistência aparente no condutor. Este efeito é proporcional à intensidade de corrente, frequência e as características magnéticas e de área do condutor, sendo mais atuante em condutores com maior seção.

seus terminais e a corrente que circula por ele devido a sua alimentação. Conforme [IEE 92], Cap. 3, Pág. 11, são cargas que entregam uma onda de corrente não senoidal quando submetidas a uma onda de tensão senoidal. São exemplos de cargas não lineares, fornos a arco, máquinas de solda, fontes eletrônicas, quaisquer cargas quando controladas por chaves eletrônicas, etc.

O processo de estabelecimento das componentes harmônicas em um sistema elétrico é através da resposta de uma ou mais cargas não lineares a um sinal inicialmente isento de componentes harmônicas. Desta forma, quando um sinal senoidal é aplicado a este tipo de carga, a resposta é uma corrente não senoidal, constituída pelas suas componentes construtivas, inclusive com presença de componentes harmônicas. Por sua vez, esta corrente não senoidal, provocará queda de tensão nas impedâncias envolvidas no sistema, inclusive nas impedâncias das fontes. Estas quedas de tensão provocadas pelas correntes não senoidais, também são não senoidais, portanto, possuem também componentes harmônicas.

Para exemplificar de forma intuitiva o processo de geração das componentes harmônicas, será utilizado o exemplo apresentado em [ARR 03], Cap. 1, Pág. 2. Considerando o gerador G da Figura 2 que fornece energia a uma carga puramente resistiva R_l através de uma linha com impedância $R_S + jX_S$ e um conversor estático. O gerador está fornecendo a energia P_{g1} para o Ponto de Acoplamento Comum (PCC) da carga com os outros consumidores. A Figura 2 (a) mostra que a energia P_{l1} é transferida para a carga, sendo esta a maior parte da energia P_{g1} , enquanto uma parte relativamente pequena, a energia P_{C1} , é convertida para diferentes frequências pelo conversor estático. Além disso, há certa perda adicional (P_{S1}) para a frequência fundamental existente na resistência de transmissão e de geração do sistema. A Figura 2 (b) ilustra o fluxo das componentes harmônicas. Como a tensão interna do gerador G é considerada perfeitamente senoidal, ele apenas fornece energia na frequência da componente fundamental, portanto, a força eletromotriz dele é curto-circuitado neste diagrama, ou seja, a linha e o gerador são apenas representados através das suas impedâncias harmônicas ($R_{sh} + jX_{sh}$) e ($R_{gh} + jX_{gh}$), respectivamente. Neste diagrama, o conversor estático aparece como uma fonte de correntes harmônicas. A parte relativamente pequena da energia fundamental, a energia P_{C1} , é transformada em energia harmônica, onde parte dela ($P_{sh} + P_{gh}$) é consumida nas resistências do sistema (R_{sh}) e do gerador (R_{gh}) e o resto (P_{ln}) na carga. Assim, a

perda total do sistema consiste na perda provocada pela componente fundamental (P_{S1}) e as perdas causadas pela presença do conversor estático ($P_{sh}+P_{gh}+P_{lh}$).

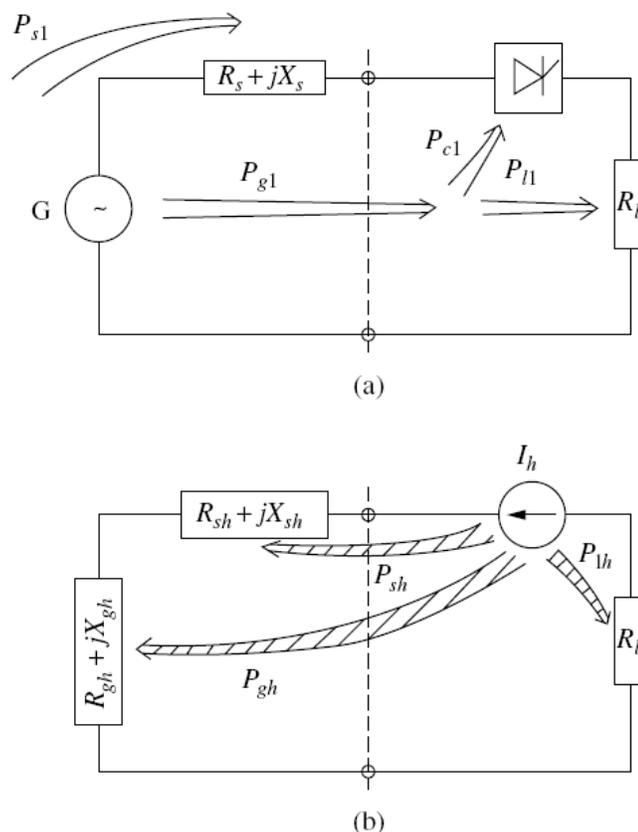


Figura 2 - (a) Fluxo de potência para componente fundamental (b) Fluxo de potência para componentes harmônicas
Fonte: [ARR 03], Cap. 1, Pág. 2.

Uma explanação mais completa sobre harmônicas pode ser obtida através da referência [ARR 03], Cap. 1, Pág. 1-15, Cap. 2, Pág. 17-59 e [IEE 93].

4.2 Perdas Devido às Harmônicas

A Tabela 1 apresenta os principais efeitos provocados pelas harmônicas, porém, este trabalho propõe a quantificação financeira apenas do impacto dos efeitos relacionados a perdas adicionais provocadas por estas componentes, explorando o efeito do item 1 desta tabela. Outros efeitos importantes provocados pelas harmônicas também estão descritos em [IEE 93], Cap. 6.

Conforme brevemente introduzido no item 4.1, a existência de componentes harmônicas em um sistema proporciona acréscimo de perdas, pois são inseridas novas correntes em outras frequências diferentes da fundamental que percorrendo

as impedâncias destes circuitos produzem perdas de energia ativa e magnética, aumentando as perdas se comparadas a condições sem estas componentes.

Nas máquinas rotativas as tensões e correntes harmônicas provocam novas perdas ativas no estator, rotor, núcleos magnéticos da máquina provocando aquecimentos não contemplados em um projeto comum, exigindo desta forma uma limitação da disponibilização de potência mecânica (*derating*) no eixo desta para proporcionar a preservação dos seus isolamentos. Basicamente, os efeitos que provocam estas perdas são o efeito pelicular, correntes de Foucault⁵, histerese⁶ e o aumento das reatâncias em função do aumento da frequência. Também são provocadas novas perdas magnéticas originas de um acréscimo na dispersão no enlace de fluxos. Estes efeitos serão melhor detalhados nas próximas secções.

As máquinas estáticas também sofrem aumento das perdas em função da presença das harmônicas. Transformadores e indutores também sofrem os efeitos citados para as máquinas rotativas, salvo indutores com núcleo de ar que não sofrem efeitos de perdas relacionados a este componente (perdas por correntes de Foucault e histerese). Outro detalhe é que o *derating* será aplicado limitando a potência transferida por estes equipamentos. Capacitores têm suas perdas nos dielétricos aumentadas, proporcionando *stress* térmico. Cabos possuem suas perdas intensificadas devido ao efeito pelicular relacionado às perdas por efeito joule. Novamente, estes efeitos serão mais bem detalhados nas próximas secções.

5. MODELOS PARA DEFINIÇÃO DAS PERDAS POR HARMÔNICAS

A definição dos modelos, aplicados neste trabalho, possui o objetivo de quantificar os efeitos de perdas citados no item 4.2.

Para obtermos uma quantificação mais precisa das perdas inseridas pelas fontes harmônicas, principalmente sobre transformadores e motores de indução, serão utilizados alguns modelos adaptados, baseados nos originais recomendados por [IEE 97] e [FIT 06].

⁵ Perda provocada pelo aquecimento ôhmico I^2R devido às correntes induzidas no material do núcleo [FIT 06], Cap. 1, Pág. 41.

⁶ Perda devido à energia envolvida na constante reversão molecular dos dipolos do material magnético e a histerese magnética envolvida deste processo, sendo proporcional a área do ciclo de histerese do material e quantidade de vezes que esta é realizada por segundo.

É importante destacar que os modelos apresentados são para análises monofásicas, porém, totalmente válidos quando utilizados separadamente para cada fase, sendo posteriormente equacionados para refletir o comportamento de um sistema trifásico. Outro detalhe da aplicação das análises aos modelos é que apenas uma componente harmônica será aplicada por vez, conforme premissa 1 da Tabela 2. Todas estas considerações são tecnicamente válidas, pois considerando que após a substituição das cargas não lineares por fontes de correntes (vide 5.1) é possível aplicar o conceito da superposição⁷.

Novamente destaca-se que o foco principal foi sobre o modelo para quantificação das perdas em motores de indução com rotor em gaiola, devido a sua grande importância no contexto industrial. Demais modelos foram transcritos de [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277-287.

5.1 Fontes

Conforme descrito no item 4.1, o processo de estabelecimento das componentes harmônicas em um sistema elétrico é através da resposta de uma ou mais cargas não lineares a um sinal inicialmente isento de componentes harmônicas. Esta resposta é base para o modelamento das fontes das componentes harmônicas.

A resposta de uma carga não linear a um sinal senoidal é uma corrente não senoidal composta por diversas componentes senoidais, desta forma, a carga não linear é substituída por respectivas fontes de corrente ideais e com suas características de amplitude (I_h), frequência ($h \times \omega$) e defasagem (Φ), conforme apresentado na Figura 3, sendo que para cada fonte de corrente o sistema elétrico responderá de forma distinta, com resultado final definido pelo conceito da superposição.

⁷ Um sistema linear obedece ao princípio de superposição, o qual afirma que, sempre que um sistema é excitado, ou alimentado, por mais de uma fonte independente de energia, a resposta total é a soma das respostas individuais [NIL 09].

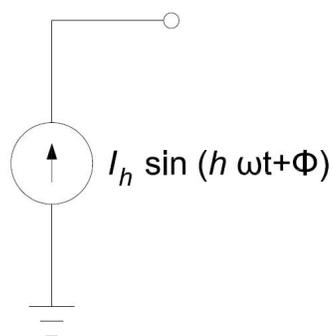


Figura 3 – Fonte de Corrente

Cada fonte de corrente provocará respectivas quedas de tensão nas impedâncias envolvidas no sistema. Estas quedas de tensão provocadas pelas correntes não senoidais, também não são senoidais, portanto, para cada fonte de corrente, existirá uma fonte de tensão equivalente que proverá alimentação às cargas existentes neste PCC, conforme apresentado na Figura 4. Estas também possuem suas respectivas características de amplitude (V_h), frequência e defasagem.

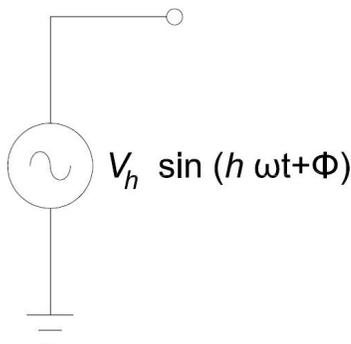


Figura 4 – Fonte de Tensão

Os valores de amplitude, frequência e defasagem são obtidos através de medições, cálculos ou valores típicos. [IEE 93] apresenta diversas recomendações para obtenção destes valores pelos três métodos. Este trabalho tem como objetivo a utilização de medições.

Para quantificar as perdas provocadas pelas componentes harmônicas é modelado um sistema equivalente para cada frequência. A fonte que será aplicada em cada sistema (de corrente ou tensão) deve ser escolhida em função da

arquitetura e equipamentos envolvidos, bem como as medições ou valores padrões disponíveis. No estudo de caso do item 6, esta escolha é exemplificada.

5.2 Motores de Indução

Geralmente, estudos sobre o comportamento de motores de indução em regime permanente utilizam o modelo apresentado na Figura 5.

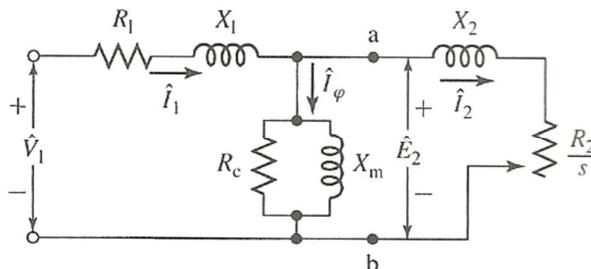


Figura 5 – Circuito Equivalente para Motor de Indução (Modelo)
Fonte: [FIT 06], Cap. 6, Pág. 305.

Os componentes do circuito do modelo da Figura 5 representam efeitos físicos da operação desta máquina. As resistências R_1 (resistência efetiva do estator) e R_c (resistência de perdas no núcleo) refletem a conversão da energia elétrica em térmica, respectivamente ocorrendo no enrolamento de cobre do estator e no aço silício do núcleo⁸. A resistência R_2 (resistência do rotor referido), conforme exposto à frente, reflete a conversão da energia elétrica em térmica ocorrente nas barras de alumínio rotor e a conversão da energia elétrica em mecânica, indicada pelo escorregamento S . Estas perdas na transferência da energia são denominadas respectivamente perdas por efeito joule no cobre do estator (P_{R1}), perdas por efeito joule no cobre do rotor e perdas no núcleo (P_N) por correntes de Foucault (P_F) e histerese (P_H). As reatâncias X_1 (reatância de dispersão do estator) e X_2 (reatância de dispersão do rotor referido) refletem a parcela de fluxo produzido nos enrolamentos de estator e de rotor que não concatenam respectivamente os circuitos fechados criados pelas barras da gaiola do rotor e enrolamentos do estator, enlaçando apenas os respectivos circuitos fechados de origem. Elas representam as dispersões de fluxo. A reatância X_m (reatância de magnetização), pelo contrário,

⁸ Estes materiais são os mais utilizados na fabricação destas partes do motor de indução, porém, conforme critérios dos fabricantes, eles podem ser substituídos para alcançar os objetivos do projeto das máquinas, como por exemplo, a utilização de cobre nas barras do rotor.

representa a parcela do fluxo produzido no enrolamento do estator que concatena os circuitos fechados criados pelas barras da gaiola do rotor, desta forma, proporcionando meio para transferência de potência do estator para o rotor. As correntes apresentadas no modelo são a \hat{I}_1 (corrente de estator), \hat{I}_2 (corrente de rotor) e \hat{I}_ϕ (corrente de magnetização). As tensões \hat{V}_1 e \hat{E}_2 são respectivamente a tensão de fase de terminal do estator e a FCEM (força contra-eletromotriz de fase) gerada pelo fluxo de entreferro resultante.

Para analisar as componentes do circuito do rotor é mais conveniente dividir a resistência R_2/s em dois componentes ($R_2 + R_2(1-s)/s$), conforme apresentado na forma alternativa do circuito equivalente de um motor de indução da Figura 6. A intenção é demonstrar que este modelo proporciona análise dos efeitos relacionados à transferência de potência elétrica para potência térmica e eletromecânica.

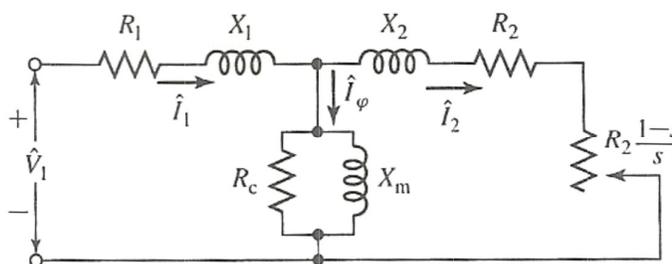


Figura 6 – Circuito Equivalente para Motor de Indução (Modelo Alternativo)
Fonte: [FIT 06], Cap. 6, Pág. 306.

Considerando a equação (1), verifica-se que a potência de entreferro P_E é a potência transferida através do entreferro desde o estator,

$$P_E = n_{fases} \times I_2^2 \times \frac{R_2}{s} \quad (1)$$

$$P_E = P_{mec} + P_{rotor} \quad (2)$$

A potência P_E é composta por duas parcelas (equação (2)), uma referente à perda térmica no condutor da gaiola do rotor (P_{rotor}) e outra referente à potência eletromecânica (P_{mec}) que é transferida para a carga mecânica acoplada ao eixo do motor, conforme respectivamente apresentado nas equações (3) e (4), as duas

resultantes respectivamente da ação das potências entregues à resistência R_2 e à resistência $R_2(1-s)/s$, entregues pela corrente de rotor \hat{I}_2 .

$$P_{rotor} = n_{fases} \times I_2^2 \times R_2 \quad (3)$$

$$P_{mec} = P_E - P_{rotor} = n_{fases} \times I_2^2 \times R_2 \times \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (4)$$

Considerando que este trabalho possui como objetivo estudar as perdas por harmônicas nos componentes, a análise descrita acima foi específica para este foco. Análises mais amplas sobre o comportamento da máquina e os efeitos representados pelo circuito da Figura 5 podem ser obtidas em diversa referência, como por exemplo, em [FIT 06], Cap. 6, Pág.295-342.

O modelo da Figura 5 representa as tensões e correntes envolvidas no funcionamento do motor de indução, bem como as perdas ativas e magnéticas que ocorrem durante seu funcionamento. Este modelo é válido também para análises de comportamento do motor de indução quando submetido a fontes com componentes harmônicas de tensão e corrente, porém, os valores dos seus componentes são adaptados para contemplar os efeitos proporcionados pela variação da frequência, ou seja, para um suprimento com componentes harmônicas.

Neste trabalho, além destas adaptações mais simples, foi revista a sua estrutura, sendo finalmente apresentado o modelo (Figura 10) para aplicação proposta neste trabalho. A adaptação deste modelo de análise harmônica em motores de indução foi estruturada a partir do modelo da Figura 5, utilizando adequações em suas reatâncias e resistências para contemplarem a variação dos seus valores em função da frequência. Estas adequações, baseadas nos modelos apresentados por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278 e [LIP 96], Cap. 5, Pág. 244-252. A explanação sobre a estruturação deste modelo será dividida nos circuitos do estator e de magnetização, e no circuito do rotor.

5.2.1 Adequação na Estrutura do Circuito do Estator e de Magnetização

O modelo de análise harmônica em motores de indução deste trabalho considera as perdas harmônicas nos circuitos do estator e de magnetização⁹, pois existe aqui o interesse em quantificar as perdas dependentes da frequência, considerando importante a análise das parcelas geradas por estes ramos. Originalmente, o circuito de estator do motor de indução é composto pela resistência efetiva do estator R_1 e pela reatância de dispersão do estator X_1 . Toda reatância indutiva, como é o caso de X_1 , aumenta seu valor proporcionalmente com a frequência, assim, mitigando a tensão nos circuitos a jusante, que no motor de indução são os ramos de magnetização e do rotor. Devido parcialmente a este efeito, o motor de indução funciona como um filtro passa baixas, atenuando os efeitos de alta frequência nos circuitos de magnetização e do rotor. Estes mesmos efeitos, também são responsáveis por importantes perdas devido às componentes harmônicas. A resistência efetiva do estator R_1 sofre aumento do seu valor com o aumento da frequência, porém agora, devido ao efeito pelicular. No ramo de magnetização existe a resistência R_C , que representa as perdas no núcleo, e a reatância de magnetização X_m , inserida em paralelo, que por sua vez não representa perdas, mas sim o acoplamento magnético entre o circuito do estator e rotor da máquina. Para construção do modelo que será utilizado neste trabalho, a posição da resistência R_C será alterada para antes da reatância de dispersão do estator X_1 (vide Figura 7). Esta alteração tem como base os critérios de determinação do parâmetro R_C no ensaio a vazio, conforme exposto a seguir. As perdas que R_C reflete quando submetida a uma corrente (perdas no núcleo, P_N) são obtidas a partir do ensaio a vazio¹⁰, partindo da medição da potência de entrada do motor quando a vazio (P_{VZ}), subtraindo desta a potência que representa as perdas rotacionais (P_{ROT}) e a potência que representa as perdas no cobre do estator (P_{R1}). A equação (5) mostra esta composição. Após a determinação da potência P_N , R_C é obtido através da

⁹ Algumas referências, por exemplo [IEE 97], consideram que para análise de harmônicas os ramos de estator e de magnetização são menos dependentes da frequência, portanto, não apresentariam acréscimo de perdas quando submetidos a um suprimento originado de uma fonte com componentes harmônicas, ficando apenas o ramo do rotor dependente do escorregamento e conseqüentemente da frequência.

¹⁰ Este ensaio é detalhado em algumas referências como, por exemplo, [IEE 04], Cap. 5, Pág. 12-13 e [FIT], Cap. 6, Pág. 318-320.

equação (7), que demonstra a íntima relação deste parâmetro com a tensão \hat{V}_1 e não com uma tensão relacionada à reatância de magnetização X_m ou a tensão aplicada no rotor (\hat{E}_2), conforme inicialmente proposto pelo modelo da Figura 5, sugerindo, portanto, a correção aqui aplicada. Porém, para obtenção equação (7), é considerada a premissa que a queda de tensão na resistência do estator R_1 é desprezível quando o motor está a vazio. Considerando que a aplicação deste trabalho é para o motor em regime de carga, e nesta condição a influência desta é significativa, será mantida a resistência R_1 antes da derivação para o novo ramal de perdas no núcleo, atendendo a algumas importantes características: a relação com \hat{V}_1 , o fato de ser uma perda distinta da ocorrente no cobre do estator e o desvinculo com a tensão relacionada à reatância de magnetização X_m (\hat{E}_2) e a tensão aplicada no rotor (\hat{E}_2).

$$P_N = P_{VZ} - P_{ROT} - P_{R1} \quad (5)$$

$$P_{R1} = n_{fases} \times I_{1VZ}^2 \times R_1 \quad (6)$$

$$R_C = \frac{n_{fases} \times V_{1VZ}^2}{P_N} \quad (7)$$

A Figura 7 apresenta a estrutura final do circuito do estator e de magnetização.

Conforme as considerações apresentadas, o modelo da Figura 7 será utilizado neste trabalho para representação dos circuitos do estator e de magnetização, com as componentes R_1 , X_1 e X_m acompanhadas de um índice (h) para representar a componente harmônica correspondente. A componente R_C sofrerá correção por consequência das perdas no núcleo corrigidas, conforme exposto no item 5.2.2.

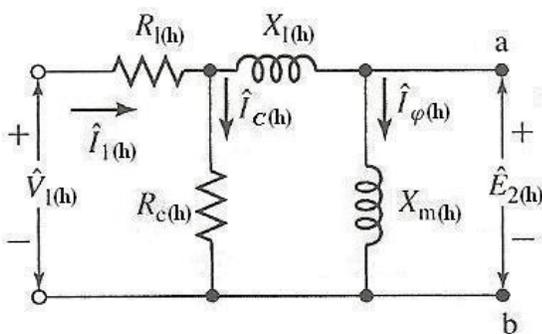


Figura 7 – Modelo do Circuito do Estator e de Magnetização de um Motor de Indução Adaptado para Aplicação em Estudos de Harmônicas deste Trabalho

Fonte: Adaptação do modelo [FIT 06], Cap. 6, Pág. 305

A Tabela 3 apresenta uma descrição dos componentes individuais do modelo apresentado na Figura 7. A Tabela 4 descreve os componentes das equações relacionadas de (8) a (10).

Tabela 3 – Descrição dos Componentes do Modelo do Circuito do Estator e de Magnetização

Sigla	Unidade	Equação	Descrição
$R_1(h)$	Ω	(8)	Resistência efetiva de estator com valor corrigido para componente harmônica h
$X_1(h)$	Ω	(9)	Reatância de dispersão do estator com valor corrigido para componente harmônica h
$R_c(h)$	Ω	-	Resistência equivalente de perdas no núcleo
$X_m(h)$	Ω	(10)	Reatância de magnetização com valor corrigido para componente harmônica h

$$R_1(h) = R_{dcest} \times (1 + Ah^B) \quad (8)$$

$$X_1(h) = h \times X_1 \quad (9)$$

$$X_m(h) = h \times X_m \quad (10)$$

Tabela 4 – Descrição dos Componentes das Equações de (8) a (10)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
R_{dcest}	Ω	(8)	Valor obtido através do ensaio a vazio, sendo citado nestes testes como R_f . Este valor também é informado pelos fabricantes.	Resistência efetiva de estator com valor para corrente contínua.
A	-	(8)	$\approx 0,1$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.	Coeficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.
B	-	(8)	$\approx 1,5$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.	Coeficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.
h	-	(8), (9) e (10)	Numero da componente harmônica que está sendo analisada.	Componente harmônica analisada.
X_r	Ω	(9)	Valor obtido através dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado. Este valor também é informado pelos fabricantes.	Reatância de dispersão do estator
X_m	Ω	(10)	Valor obtido através dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado. Este valor também é informado pelos fabricantes.	Reatância de magnetização

5.2.2 Correção das Perdas por Histerese e Correntes de Foucault

Diferentemente das outras resistências do circuito equivalente proposto, o valor da resistência de perdas no núcleo R_C será corrigido por consequência das perdas no núcleo corrigidas. As perdas no núcleo por histerese e correntes de Foucault, que sofrem alteração bastante significativa dos seus valores em função da frequência (vide equações (14), (15) e (17)). Desta forma, o modelo para aplicação neste trabalho tem o valor da resistência de perdas no núcleo R_C dependente da frequência, utilizado uma técnica¹¹ para determinação das perdas corrigidas,

¹¹ Infelizmente, o cálculo das perdas no ferro com a ajuda das equações (14), (15) e (17) proporcionam bons valores apenas para transformadores, não sendo muito adequadas para motores elétricos. A razão deste problema é que harmônicas em motores elétricos produzem densidades de fluxo com taxa de variação, dB/dt , muito maior que formas de onda senoidais com a mesma densidade de fluxo. Por esta causa as perdas por corrente de Foucault aumentam mais rápido que simplesmente uma relação quadrada. Isso faz com que as perdas por correntes parasitas cresçam muito mais rápido do que simplesmente o quadrado da componente fundamental da densidade de

conforme apresentado nos itens 5.2.3, 5.2.4 e 5.2.5, possibilitando considerar os efeitos da frequência sobre as perdas ativas provocadas por efeitos magnéticos sobre o núcleo, ou seja, as perdas por histerese e correntes de Foucault.

5.2.3 Determinação e Proporção das Perdas por Histerese e Correntes de Foucault

Primeiramente é necessário determinar as perdas por histerese e correntes de Foucault para a componente fundamental, consequente do efeito da corrente de perdas no núcleo \hat{I}_C sobre a respectiva resistência R_C , sendo estas definidas como perdas no núcleo P_N , através da equação (11).

$$P_N = R_C \times I_C^2 \quad (11)$$

Conforme descrito, as perdas no núcleo P_N são compostas por duas parcelas, sendo elas a perda por histerese e a devido às correntes de Foucault. Núcleos de máquinas elétricas são fabricados com aços especiais e estes dispostos em chapas laminadas para mitigar os efeitos das correntes de Foucault. Para cada material e espessura de chapa laminada, existe uma curva característica da quantidade de perda no núcleo em função da densidade de fluxo magnético. A Figura 8 apresenta uma curva característica para aço com baixo teor de carbono e espessura de 0,025” (0,6350mm). Estão apresentados no ANEXO A os valores utilizados para construção do gráfico da Figura 8. Com base nos dados de construção desta curva nesta curva é determinada uma proporção média entre os dois tipos de perdas, neste caso, 45,14% de P_H e 54,86% de P_F , transformados em fatores de proporção de perdas por histerese e correntes de Foucault, denominados respectivamente P_{PH} e P_{PF} , sendo seus valores inseridos nas equações em formato decimal (p. ex. 0,4514 e

fluxo. O expoente real em porções saturadas das máquinas podem ser de 6 ou mais, ao invés de 2 (trecho extraído de [LIP 96], Cap. 5, Pág. 247). Porém, a adoção desta técnica proporciona uma quantificação conservadora do aumento das perdas pelos efeitos da variação da frequência. Esta quantificação conservadora é considerada melhor que desprezar as novas perdas inseridas pelas componentes harmônicas.

0,5486). Assim, os valores de perdas por histerese e correntes de Foucault podem ser expressos conforme equações (12) e (13).

$$P_H = P_N \times P_{PH} \quad (12)$$

$$P_F = P_N \times P_{PF} \quad (13)$$

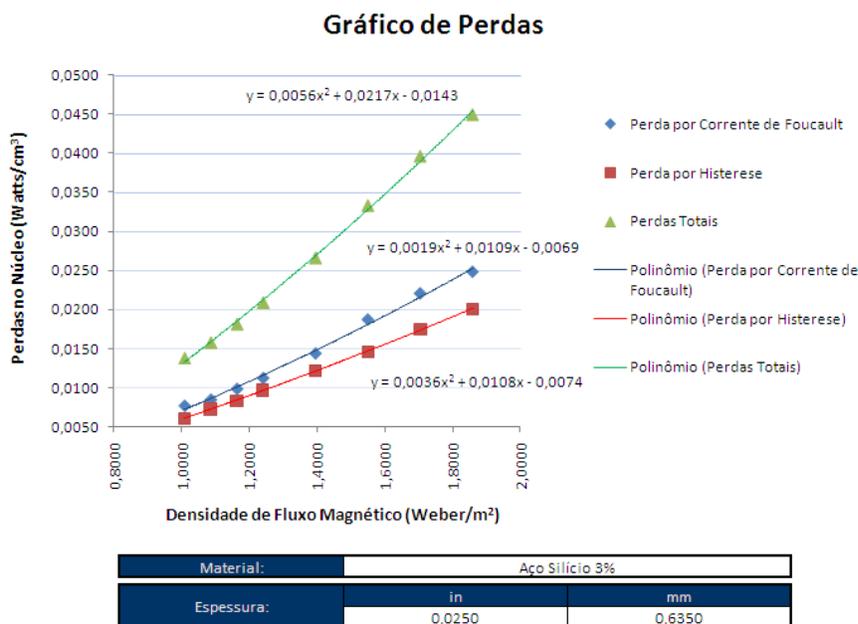


Figura 8 – Gráfico de perdas no núcleo em função da densidade de fluxo magnético
Fonte: [LIP 96], Cap. 5, Pág.252

5.2.4 Determinação do Fator de Correção das Perdas por Histerese e Correntes de Foucault

Outra forma para determinação das perdas no núcleo é através das equações relacionadas ao projeto das máquinas, ou seja, relacionadas às características construtivas e os materiais empregados. As equações (14), (15) e (17) possibilitam este cálculo.

$$P_N = P_F + P_H \quad (14)$$

$$P_F = K_F \times f e^2 \times B_m^2 \quad (15)$$

$$K_F = \frac{\pi^2 \times t^2}{6 \times \rho_{iron}} \quad (16)$$

$$P_H = K_H \times f e \times B_m^{K_H} \quad (17)$$

$$K_H = 1,6 \sim 2,0 \quad (18)$$

Apoiado nestas equações, este item descreve as correções necessárias para contemplar a variação das perdas no núcleo em função da variação da frequência e da amplitude máxima da tensão de fase de terminal do estator \hat{V}_1 .

Nas equações observamos que existem dois fatores (K_F e K_H) que são constantes para uma determinada máquina, conforme descrito na Tabela 4. K_F depende das características construtivas e K_H , chamado de coeficiente de *Steinmetz*, depende das características magnéticas do material empregado no núcleo, sendo adotado o valor 2 para os materiais mais modernos. Desta forma é possível determinar uma relação para projetar o crescimento das perdas em função da variação da frequência, conforme proposto pelas equações (19) e (20). Observe que a frequência foi alterada para o índice (h) que representa a variação da frequência da componente harmônica em relação à fundamental.

$$P_F \propto f e^2 \times B_m^2 \rightarrow P_F \propto h^2 \times B_m^2 \quad (19)$$

$$P_H \propto f e \times B_m^2 \rightarrow P_H \propto h \times B_m^2 \quad (20)$$

Porém, as equações (19) e (20) apenas apresentam correção em função da variação da frequência e da densidade de fluxo magnético de pico B_m . Para obtenção de uma correção satisfatória, é necessário corrigir a contribuição da

densidade de fluxo magnético de pico B_m em função da grandeza que proporciona a sua origem, a tensão de fase de terminal do estator \hat{V}_1 .

Conforme descrito em [SLE 92], Cap. 1, Pág.31-34, usualmente, a tensão de fase aplicada no terminal do estator é uma tensão senoidal que pode ser expressa pela equação (21).

$$v = \hat{V} \times \cos(\omega t) \quad (21)$$

Considerando as equações básicas (22) e (23) é possível correlacionar, através da equação (24) a tensão aplicada em uma bobina com o fluxo que a enlaça.

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \quad (22)$$

$$v = R \times i + e \quad (23)$$

$$v = R \times i + \frac{d\lambda}{dt} \quad (24)$$

Com base na equação (24), é obtida a equação (25). Nesta passagem existe a supressão da parcela da equação (24) responsável pela queda de tensão na resistência do condutor da bobina ($R \times i$), pois em diversas situações envolvendo materiais eficientes e de alta qualidade esta queda de tensão pode ser negligenciada em relação à variação do fluxo enlaçado, forçando desta forma uma dependência senoidal para o fluxo enlaçado pela bobina.

$$\lambda \approx \frac{\hat{V}}{\omega} \times \sin(\omega t) \quad (25)$$

A equação (26) apresenta a relação entre a densidade de fluxo magnético B_m com o fluxo enlaçado λ e as constantes construtivas N (numero de espiras da bobina) e Ar (área efetiva que é atravessada pelo fluxo enlaçado),

$$\lambda = N \times Ar \times B \rightarrow B = \frac{\lambda}{N \times Ar} \quad (26)$$

A partir das equações (25) e (26) é possível obter a relação entre B_m e \hat{V}_1 , apresentada na equação (27). Para obtenção desta relação foi considerando N e A constantes e houve a alteração da frequência angular ω para o índice (h) que representa a variação da frequência da componente harmônica em relação à fundamental.

$$B \propto \frac{\hat{V}}{h} \quad (27)$$

Com o estabelecimento da relação da equação (27) é possível adequar as equações (19) e (20), sendo apresentadas as equações (28) e (29).

$$P_F \propto h^2 \times \left(\frac{\hat{V}}{h} \right)^2 \quad (28)$$

$$P_H \propto h \times \left(\frac{\hat{V}}{h} \right)^2 \quad (29)$$

5.2.5 Aplicação do Fator de Correção das Perdas por Histerese e Correntes de Foucault

A aplicação do fator de correção consiste na compilação das três primeiras através das equações (31), (32) e (33), finalmente definindo uma relação de proporcionalidade para projetar o acréscimo de perdas no núcleo consequentes do surgimento das componentes harmônicas. Um detalhe que precisa ser considerado é que existe também uma relação proporcionalidade entre a tensão da componente harmônica e a fundamental, conforme indicado da equação (30), sendo expresso através do valor de $V_{rel}(h)$.

$$V_{rel}(h) = \frac{V_{1(h)}}{\hat{V}_1} \quad (30)$$

$$P_H(h) = P_{PH} \times P_N \times h^2 \times \left(\frac{V_{rel}(h)}{h} \right)^2 \quad (31)$$

$$P_F(h) = P_{PF} \times P_N \times h \times \left(\frac{V_{rel}(h)}{h} \right)^2 \quad (32)$$

$$P_N(h) = P_H(h) + P_F(h) \quad (33)$$

A Tabela 5 descreve os componentes das equações relacionadas de (11) a (33).

Tabela 5 – Descrição dos Componentes das Equações de (11) a (33)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
P_N	W	(11), (12), (13), (14), (31) e (32)	Valor obtido através da equação (11)	Perdas no núcleo
R_C	Ω	(11)	Valor obtido através do ensaio a vazio. Este valor também é informado pelos fabricantes.	Resistência de perdas no núcleo.

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
I_C	A	(11)	Valor obtido através de simulação do circuito equivalente ligado a fonte de tensão.	Corrente sobre R_C (Componente de perdas no núcleo)
P_H	W	(12), (14), (17) e (20)	Valor obtido através da equação (12)	Perda por histerese
P_{PH}	-	(12) e (31)	Valor obtido através da média dos valores percentuais que as perdas por histerese representam em relação às perdas totais do núcleo (p. ex. valor obtido na tabela de dados do ANEXO A).	Fator de proporção de perda por histerese
P_F	W	(13), (14), (15) e (19)	Valor obtido através da equação (13)	Perda por correntes de Foucault
P_{PF}	-	(13) e (32)	Valor obtido através da média dos valores percentuais que as perdas por histerese representam em relação às perdas totais do núcleo (p. ex. valor obtido na tabela de dados do ANEXO A).	Fator de proporção de perda por correntes de Foucault
K_F	-	(15) e (16)	Valor obtido através da equação (16)	Constante da equação de perdas por correntes de Foucault
t	-	(16)	Obtido nas especificações das chapas laminadas utilizadas na construção do núcleo	Espessura das chapas laminadas do núcleo
ρ	-	(16)	Obtido nas especificações das chapas laminadas utilizadas na construção do núcleo	Resistividade do material utilizado na fabricação das chapas laminadas do núcleo
f_e	rad/s	(15)	Frequência da fonte do fluxo magnético	Frequência do fluxo magnético
B_M	Weber/m ²	(15)	Obtido através do produto da permeabilidade com a intensidade de campo magnético	Pico da densidade de fluxo magnético
K_H	-	(17) e (18)	Valor entre 1,6 e 2,0. Para os materiais mais modernos utiliza-se no coeficiente 2.	Coeficiente de <i>Steinmetz</i>

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
h	-	(19), (20), (31), (32) e (33)	Numero da componente harmônica que está sendo analisada.	Componente harmônica analisada.
λ	Wb	(22), (24), (25) e (26)	Valor obtido através da equação (26)	Fluxo enlaçado por uma bobina
\hat{V}_1	V	(21), (25), (27), (28), (29), (30), (31) e (32)	Tensão aplicada entre os terminais da bobina do estator para frequência fundamental	Tensão de fase de terminal do estator
$V_1(h)$	V	(30), (31) e (32)	Tensão aplicada entre os terminais da bobina do estator para frequência da componente harmônica	Tensão de fase de terminal do estator
$V_{rel}(h)$	-	(30), (31) e (32)	Valor obtido através da equação (30)	Proporcionalidade entre a tensão da componente harmônica e a fundamental
ω	rad/s	(25)	Calculado de forma similar ao apresentado na equação (41), porém a frequência é da tensão \hat{V}_1 .	Frequência angular do fluxo enlaçado
N	-	(26)	Numero de espiras da bobina	Numero de espiras da bobina
Ar	m ²	(26)	Área efetiva que é atravessada pelo fluxo enlaçado	Área efetiva que é atravessada pelo fluxo enlaçado

5.2.6 Obtenção da Nova Resistência de Perdas no Núcleo

Após a determinação das perdas no núcleo corrigidas para uma determinada componente harmônica é possível obter a resistência de perdas no núcleo corrigida para a respectiva $R_C(h)$, sendo esta utilizada para obtenção das novas perdas quando o circuito está submetido a novas fontes provenientes das harmônicas.

Para obtenção da nova a resistência de perdas no núcleo, será utilizada a equação (34). Esta utilização apenas é possível considerando que é desprezada a queda de tensão na resistência do estator R_1 , conseqüentemente, que a tensão que está aplicada sobre ela é tensão de fase de terminal do estator da componente harmônica $V_1(h)$.

$$R_c(h) = \frac{V_{1(h)}^2}{P_N(h)} \quad (34)$$

Diferentemente das outras resistências dos modelos apresentados, não há um equacionamento específico e direto que proporcione a correção desta em função da variação da frequência, portanto foram adotados estes critérios para obtenção de um valor minimamente corrigido em função da variação da frequência.

5.2.7 Modelo do Circuito do Rotor

O modelo apresentado na Figura 7 é referente aos ramos do estator e de magnetização. Conforme enunciado anteriormente e apresentado na Figura 9, está exposto a seguir, a descrição sobre o modelo considerado para o circuito do rotor em estudos de harmônicas. Este modelo é originado de [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278, sendo apenas adaptadas algumas siglas para facilitar a padronização dos termos neste trabalho.

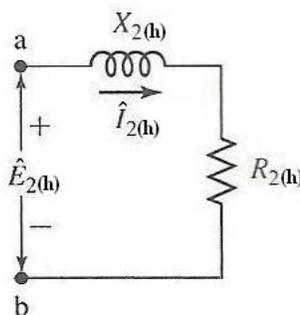


Figura 9 – Modelo do Circuito do Rotor de um Motor de Indução para Aplicação em Estudos de Harmônicas incluindo o efeito pelicular

Fonte: Adaptação do modelo de [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278.

Este modelo considera os mesmos efeitos descritos anteriormente para os componentes do estator e do ramo de excitação, porém, acrescenta mais alguns importantes efeitos sobre a correção dos valores da resistência e reatância do rotor (R_2 e X_2), em virtude da ação de proporcionalidade do escorregamento sobre a indutância e a resistência, refletidos nos fatores CR e CX , explicitados mais a frente, bem como a contribuição sobre o efeito pelicular produzido pela frequência

das correntes do rotor induzidas pelos fluxos magneto motrizes produzidos pelas componentes harmônicas, ora com valores de escorregamento harmônica menores que 1 (para harmônicas de sequência positiva), ora com valores maiores que 1 (para harmônicas de sequência negativa) e ora com valores igual a 1 (para harmônicas de sequência zero), sendo que este último valor é a tendência dos outros dois para harmônicas de ordens maiores.

A Tabela 6 apresenta uma descrição dos componentes individuais deste modelo e a Tabela 7 uma descrição dos componentes das equações (35) a (44). Vale salientar que as equações de (39) a (43) foram citadas para favorecer um completo entendimento da dedução apresentada na equação (38), não sendo necessário encontrar seus valores em um caso prático, conforme poderá ser observados no estudo de caso apresentado nos item 6.

Tabela 6 – Descrição dos Componentes do Modelo de Motor de Indução para Aplicação em Estudos de Harmônicas

Sigla	Unidade	Equação	Descrição
$R_2(h)$	Ω	(35)	Resistência do rotor referida ao estator com valor corrigido para componente harmônica h
$X_2(h)$	Ω	(36)	Reatância do rotor referida ao estator com valor corrigido para componente harmônica h

$$R_2(h) = \frac{R_20}{Sh} \times (1 + CR \times Sh) \quad (35)$$

$$X_2(h) = 2 \times \pi \times f \times h \times L_2(h) \quad (36)$$

$$L_2(h) = L_20 \times (1 + CX \times Sh) \quad (37)$$

$$Sh = \frac{\omega h - \omega r}{\omega h} = \frac{h \times \omega 0 - (1 - S) \times \omega 0}{h \times \omega 0} = \frac{h + S - 1}{h} \cong \frac{h - 1}{h} \quad (38)$$

$$S = \frac{RPMs - RPMr}{RPMs} = \frac{\omega 0 - \omega r}{\omega 0} \quad (39)$$

$$RPM_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (40)$$

$$\omega_0 = 2 \times \pi \times f \quad (41)$$

$$\omega_r = RPM_r \times \frac{2 \times \pi}{60} \quad (42)$$

$$\omega_h = 2 \times \pi \times f \times h \quad (43)$$

$$Sh \cong \frac{h \pm 1}{h} \quad (44)$$

Tabela 7 – Descrição dos Componentes das Equações de (35) a (44)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
R_20	Ω	(35)	Valor obtido através dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado ¹² , sendo citado nestes testes como R_2 . Este valor também é informado pelos fabricantes.	Resistência do rotor referida ao estator com valor para corrente contínua.
CR	-	(35)	≈ 2 , valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 280.	Fator de gaiola para resistência. Coeficiente de proporcionalidade que vincula o escorregamento ao valor da resistência, proporcionando uma análise linear do comportamento da resistência.
f	Hz	(36), (40), (41) e (43)	Valor da frequência da componente fundamental da componente harmônica analisada	Frequência da componente fundamental.
$L_2(h)$	H	(36) e (37)	Calculado através da equação (37)	Indutância do rotor referida ao estator com valor corrigido para componente harmônica h

¹² Descrição sobre o procedimento destes testes pode ser obtido em [FIT 06], Cap. 6, Pág.318-322 ou em uma forma bastante abrangente em [IEE 84].

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
L_20	H	(37)	Valor obtido através dos ensaios a vazio e de rotor bloqueado, sendo refletido nestes testes através da reatância X_2 . Este valor também é informado pelos fabricantes.	Indutância do rotor referida ao estator com valor para corrente contínua.
CX	-	(37)	$\approx -0,01$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 280.	Fator de gaiola para indutância. Coeficiente de proporcionalidade que vincula o escorregamento ao valor da indutância, proporcionando uma análise linear do comportamento da indutância.
S	-	(38) e (39)	Calculado através da equação (39)	Escorregamento para frequência fundamental
$RPMs$	RPM	(39) e (40)	Calculado através da equação (40)	Velocidade síncrona do campo girante do motor
$RPMr$	RPM	(39) e (42)	Valor medido no motor através da verificação da velocidade do rotor	Velocidade do rotor do motor
P	-	(40)	Dado construtivo do motor	Numero de polos do motor
ω_0	rad/s	(38), (39) e (41)	Calculado através da equação (41)	Velocidade angular síncrona
ω_r	rad/s	(38), (39) e (42)	Valor medido no motor através da verificação da velocidade do rotor. Vide equação (42).	Velocidade angular do rotor
ω_h	rad/s	(38) e (43)	Calculado através da equação (43)	Velocidade angular da componente harmônica
Sh	-	(35), (37), (38) e (44)	Calculado através da equação (44) ¹³ .	Escorregamento para frequência harmônica.
h	-	(36), (38), (43) e (44)	Numero da componente harmônica que está sendo analisada.	Componente harmônica analisada.

¹³ A definição do sinal que deverá ser adotado nesta equação é em virtude da característica da sequência da ordem harmônica que o escorregamento está sendo calculado, isso é considerado para refletir o efeito do fluxo criado pela componente harmônica em oposição à rotação do rotor, quando esta é sequência negativa. Para componentes harmônicas de sequência zero, $Sh = 1$. A

Tabela 8 define estes sinais para as primeiras 51 componentes harmônicas.

Tabela 8 – Definição do Sinal para Aplicação na Equação (44)

Sinal	Aplicação	Componentes Harmônicas
“-”	Componentes harmônicas de sequência positiva	1°, 4°, 7°, 10°, 13°, 16°, 19°, 22°, 25°, 28°, 31°, 34°, 37°, 40°, 43°, 46°, 49°
“+”	Componentes harmônicas de sequência negativa	2°, 5°, 8°, 11°, 14°, 17°, 20°, 23°, 26°, 29°, 32°, 35°, 38°, 41°, 44°, 47°, 50°
$Sh = 1$	Componentes harmônicas de sequência zero	3°, 6°, 9°, 12°, 15°, 18°, 21°, 24°, 27°, 30°, 33°, 36°, 39°, 42°, 45°, 48°, 51°

Para obtenção dos parâmetros do modelo da Figura 9, as equações (35) e (37) são consideradas mais precisas pela referência [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278, quando comparadas a um equacionamento mais simples apresentado nesta mesma referência. Este equacionamento mais preciso, demonstra ainda mais importante quando aplicado à motores com rotor construído com barras profundas ou com dupla gaiola de esquilo, onde o efeito pelicular torna-se mais influente. O equacionamento mais simples foi aqui preterido, pois é o foco principal deste trabalho justamente a quantificação de perdas por harmônicas. O equacionamento mais simples é bastante útil quando utilizado para cálculos mais rápidos e com menor precisão.

5.2.8 Modelo do Motor de Indução

Finalmente, após a descrição do significado físico e da forma de obtenção de cada um dos seus parâmetros, é apresentado na Figura 10 o modelo do circuito do motor de Indução adaptado para aplicação dos estudos de harmônicas deste trabalho.

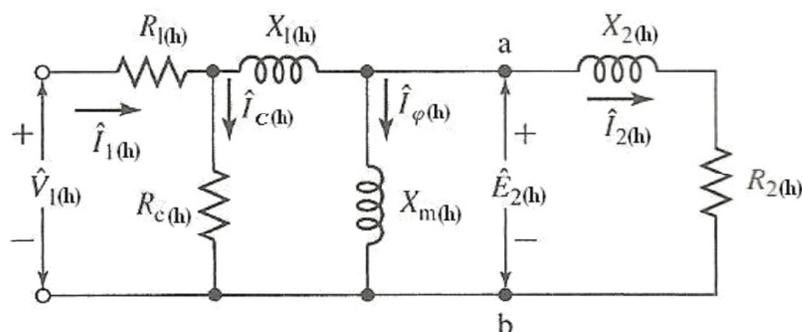


Figura 10 – Modelo do Circuito do Motor de Indução Adaptado para Aplicação nos Estudos de Harmônicas deste Trabalho

Fonte: Adaptação dos modelos de [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278 e [FIT 06], Cap. 6, Pág. 305

5.3 Transformadores

A Figura 11 apresenta o modelo para transformador conforme [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278-279. Este é modelado como um transformador ideal em série com a impedância de dispersão X_T . A reatância de dispersão varia linearmente com a frequência. A resistência do enrolamento R_T considera o efeito pelicular conforme equação (45), sendo o seu valor corrigido pelos mesmos coeficientes considerados na correção da resistência efetiva do estator R_1 no motor de indução (equação (8)).

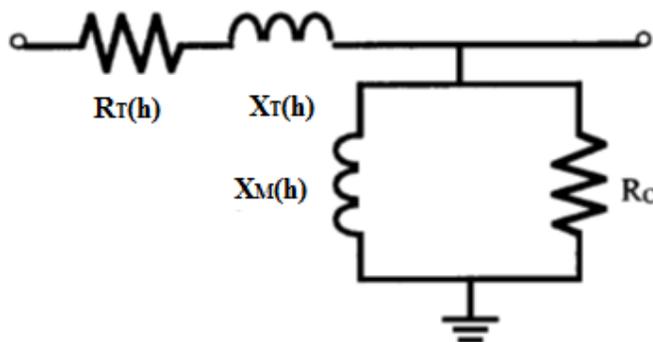


Figura 11 – Modelo do Transformador

Fonte: [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278

A Tabela 9 apresenta uma descrição dos componentes individuais do modelo apresentado Figura 11. A Tabela 10 descreve os componentes das equações relacionadas de (45) a (47).

Tabela 9 – Descrição dos Componentes do Modelo do Transformador

Sigla	Unidade	Equação	Descrição
$R_T(h)$	Ω	(45)	Resistência do primário com valor corrigido para componente harmônica h
$X_T(h)$	Ω	(46)	Reatância de dispersão de primário com valor corrigido para componente harmônica h
R_C	Ω	-	Resistência de perdas no núcleo
$X_M(h)$	Ω	(47)	Reatância de magnetização com valor corrigido para componente harmônica h

$$R_T(h) = R_{dcprim} \times (1 + Ah^B) \quad (45)$$

$$X_T(h) = h \times X_T \quad (46)$$

$$X_M(h) = h \times X_M \quad (47)$$

Tabela 10 – Descrição dos Componentes das Equações de (45) a (47)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
R_{dcprim}	Ω	(45)	Valor obtido através de medição direta ou ensaio de curto-circuito, sendo citado neste teste como R_T . Este valor também é informado pelos fabricantes.	Resistência do primário com valor para corrente contínua.
A	-	(45)	$\approx 0,1$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.	Coeficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.
B	-	(45)	$\approx 1,5$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.	Coeficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.
h	-	(45), (46)e (47)	Numero da componente harmônica que está sendo analisada.	Componente harmônica analisada.
X_T	Ω	(46)	Valor obtido através do ensaio de curto-circuito. Este valor também é informado pelos fabricantes.	Reatância de dispersão do primário

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
X_M	Ω	(47)	Valor obtido através do ensaio de circuito aberto. Este valor também é informado pelos fabricantes.	Reatância de magnetização

Existem diversas variações para impedância de dispersão de transformadores conforme recomendado pelo CIGRE [CIG 81]. Também são considerados modelos mais complexos contemplando reatâncias de magnetização, perdas no ferro, e capacitâncias entre espiras e enrolamentos. Para casos onde as fontes harmônicas não são significativas, o ramo de magnetização é negligenciado.

5.4 Cabos

Diferente dos modelos propostos para motores de indução e transformadores, será utilizado neste trabalho exatamente o mesmo modelo proposto por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 279 e 280 para determinação das perdas por ação das componentes harmônicas sobre os cabos, considerando abrangência apenas para linhas curtas, conforme citado na Tabela 2.

Em linhas curtas, a ação das componentes harmônicas sobre os cabos proporciona o aumento das perdas devido a basicamente dois efeitos: efeito pelicular, responsável pelo aumento da perda ativa e da variação da reatância indutiva em função da frequência, aumento da perda magnética. O modelo apresentado na Figura 12 considera os dois efeitos.

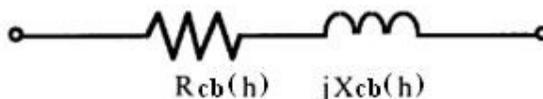


Figura 12 – Modelo do Cabo

Fonte: [IEE 97], Cap. 10, Pág. 279

A Tabela 11 apresenta uma descrição dos componentes individuais do modelo apresentado na Figura 12. A Tabela 12 descreve os componentes das equações relacionadas de (48) a (52).

Tabela 11 – Descrição dos Componentes do Modelo de Cabos

Sigla	Unidade	Equação	Descrição
$R_{cb}(h)$	Ω/m	(48) e (49)	Resistência do cabo com valor corrigido para componente harmônica h
$X_{cb}(h)$	Ω/m	(51)	Reatância do cabo com valor corrigido para componente harmônica h

$$R_{cb}(h) = R_{dccabo} \times (0,035 \times M^2 + 0,938); M < 2,4 \quad (48)$$

$$R_{cb}(h) = R_{dccabo} \times (0,35 \times M^2 + 0,3); M \geq 2,4 \quad (49)$$

$$M = 0,001585 \times \sqrt{\frac{h \times f}{R_{dccabo}}} \quad (50)$$

$$X_{cb}(h) = h \times X_{cb} \quad (51)$$

$$X_{cb} = 2 \times \pi \times f \times L_{cb} \quad (52)$$

Tabela 12 – Descrição dos Componentes das Equações de (48) a (52)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
R_{dccabo}	Ω/m	(48) e (49)	Valor obtido através de medição direta. Este valor também é informado pelos fabricantes.	Resistência do cabo para corrente contínua.
M	-	(48), (49) e (50)	Obtido através da equação (50).	Coefficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 279.
f	Hz	(50)	Valor da frequência da componente fundamental da componente harmônica analisada	Frequência da componente fundamental.
h	-	(50)	Numero da componente harmônica que está sendo analisada.	Componente harmônica analisada.
X_{cb}	Ω	(51) e (52)	Obtido através da equação (52).	Reatância do cabo para frequência da fundamental.

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
L_{cb}	H/m	(52)	Valor obtido através de teste de fábrica em cabos. Este valor também é informado pelos fabricantes.	Indutância do cabo

5.5 Capacitores

Para determinação das perdas por ação das componentes harmônicas sobre os capacitores será utilizado o modelo apresentado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 279, sem adaptações, conforme Figura 13. Neste modelo é desconsiderada a correção dos valores das resistências em função do efeito pelicular. Na resistência que representa a perda dielétrica esta desconsideração é em virtude deste modelo representar um elemento não condutor (dielétricos), portanto, com variações em função da frequência não definidas pelos modelos apresentados nesta referência. Para resistência de descarga, a desconsideração é em virtude da pouca influência do seu valor para regime contínuo, pois seu alto valor em paralelo com a baixa reatância do capacitor reduz bastante o módulo da corrente que flui pelo seu interior, principalmente para as componentes harmônicas.

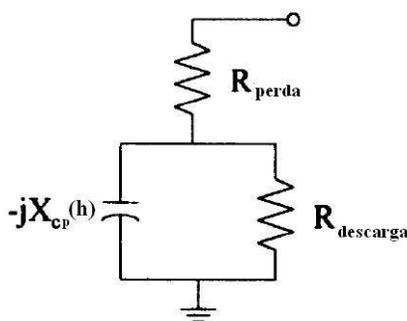


Figura 13 – Modelo de Capacitor

Fonte: [IEE 97], Cap. 10, Pág. 279

A Tabela 13 apresenta uma descrição dos componentes individuais do modelo apresentado na Figura 13. A Tabela 14 descreve os componentes das equações (53) e (54).

Tabela 13 – Descrição dos Componentes do Modelo de Capacitor

Sigla	Unidade	Equação	Descrição
R_{perda}	Ω	-	Resistência que representa a perda dielétrica no capacitor
$R_{descarga}$	Ω	-	Resistência de descarga do capacitor
$X_{cp}(h)$	Ω	(53)	Reatância do capacitor com valor corrigido para componente harmônica h

$$X_{cp}(h) = \frac{X_{cp}}{h} \quad (53)$$

$$X_{cp} = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C} \quad (54)$$

Tabela 14 – Descrição dos Componentes das Equações de (53) e (54)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
X_{cb}	Ω	(53) e (54)	Obtido através da equação (54).	Reatância do capacitor para frequência da fundamental.
f	Hz	(54)	Valor da frequência da componente fundamental da componente harmônica analisada	Frequência da componente fundamental.
h	-	(53)	Numero da componente harmônica que está sendo analisada.	Componente harmônica analisada.
C	F	(54)	Valor da capacitância do capacitor	Capacitância

5.6 Indutores

O modelo para representação de indutores sob efeito de componentes harmônicas que será utilizado neste trabalho é apresentado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278 como o modelo para máquinas de indução. Este modelo é considerado válido para utilização nas aplicações proposta neste trabalho, pois um indutor

também sofre aumento das suas perdas obedecendo ao mesmo comportamento traduzido pelo modelo para as máquinas de indução, sendo eles o efeito pelicular e da variação da reatância indutiva em função da frequência. Este modelo está apresentado na Figura 12.

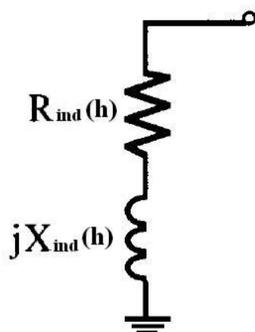


Figura 14 – Modelo de Indutor

Fonte: [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278

A Tabela 15 apresenta uma descrição dos componentes individuais do modelo apresentado na Figura 14. A Tabela 16 descreve os componentes das equações (55) a (57).

Tabela 15 – Descrição dos Componentes do Modelo de Indutor

Sigla	Unidade	Equação	Descrição
$R_{ind}(h)$	Ω	(55)	Resistência do indutor com valor corrigido para componente harmônica h
$X_{ind}(h)$	Ω	(56)	Reatância do indutor com valor corrigido para componente harmônica h

$$R_{ind}(h) = R_{acind} \times (1 + Ah^B) \quad (55)$$

$$X_{ind}(h) = h \times X_{ind} \quad (56)$$

$$X_{ind} = 2 \times \pi \times f \times L \quad (57)$$

Tabela 16 – Descrição dos Componentes das Equações de (55) a (57)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
R_{dcind}	Ω	(55)	Valor obtido através de medição direta. Este valor também é informado pelos fabricantes.	Resistência do indutor para corrente contínua.
A	-	(55)	$\approx 0,1$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.	Coeficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.
B	-	(55)	$\approx 1,5$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.	Coeficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.
h	-	(55) e (56)	Numero da componente harmônica que está sendo analisada.	Componente harmônica analisada.
X_{ind}	Ω	(56) e (57)	Obtido através da equação (57).	Reatância do indutor para frequência da fundamental.
f	Hz	(57)	Valor da frequência da componente fundamental da componente harmônica analisada	Frequência da componente fundamental.
L	H	(57)	Valor da indutância do indutor	Indutância

5.7 Geradores

Apenas será considerado o modelo de gerador sendo uma máquina síncrona trabalhando nesta função, conforme premissa 7 da Tabela 2. Outros tipos de geradores não serão contemplados neste trabalho.

O circuito equivalente apresentado na Figura 15 é o que representa uma máquina síncrona de polos lisos trabalhando como gerador e que comumente é utilizado em estudos para esta máquina.

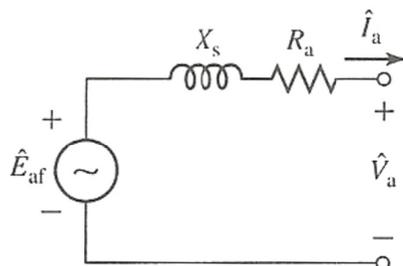


Figura 15 – Circuito Equivalente para Máquina Síncrona de Polos Lisos Trabalhando como Gerador
Fonte: [FIT 06], Cap. 5, Pág. 247.

No circuito da Figura 15 podem ser identificados os componentes \hat{E}_{af} (tensão gerada), X_s (reatância síncrona), R_a (resistência de armadura), \hat{V}_a (tensão terminal) e \hat{I}_a (corrente de armadura). Para identificar os componentes responsáveis pelas principais perdas elétricas em uma máquina síncrona, será utilizado o circuito equivalente da Figura 16.

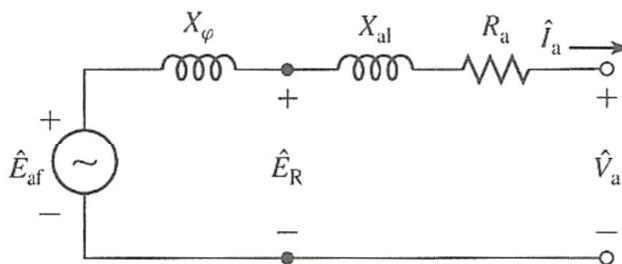


Figura 16 – Circuito Equivalente para Máquina Síncrona de Polos Lisos Trabalhando como Gerador, com as duas componentes da reatância síncrona
Fonte: [FIT 06], Cap. 5, Pág. 247.

Neste modelo, também são identificadas as componentes X_ϕ (reatância de magnetização), X_{al} (reatância de dispersão de armadura) e \hat{E}_R (força eletromotriz). As principais perdas elétricas são representadas pela reatância X_{al} e pela resistência R_a , sendo denominadas, respectivamente, perdas locais no núcleo e perdas ôhmicas no enrolamento de armadura.

Até este ponto, a análise apresentada é para uma máquina síncrona de polos lisos trabalhando como gerador. Quando são analisadas máquinas síncronas de polos saliente, cada uma das componentes X_ϕ e X_{al} são divididas em duas, resultando em $X_{\phi d}$ (reatância de magnetização de eixo direto), $X_{\phi q}$ (reatância de magnetização de eixo de quadratura), X_{ald} (reatância de dispersão de armadura de eixo direto) e X_{alq} (reatância de dispersão de armadura de quadratura). Estas novas componentes são originadas da ação de um fluxo oscilante, provocado pela

construção não uniforme do rotor com seus polos salientes. Desta forma são analisadas novas perdas magnéticas relacionadas às reatâncias X_{ald} e X_{al} .

Uma análise mais específica sobre determinação de todas as perdas em uma máquina síncrona poderá ser obtida em [FIT 06], Cap. 5, Pág.249-258 para polos lisos e em [FIT 06], Cap. 5, Pág.272-283 para polos salientes. Porém, para um entendimento mais profundo do comportamento das máquinas síncronas em regime contínuo e transitório é necessário um modelamento mais específico, como o existente em [SLE 92], Cap. 11, Pág.463-537.

Em estudos de análises de harmônicas sobre geradores, o modelo da Figura 17 é sugerido, conforme citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.

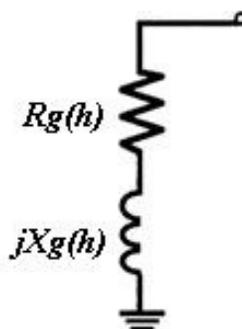


Figura 17 – Modelo de Máquina Síncrona Trabalhando como Gerador para Aplicação em Estudos de Harmônicas

Fonte: [IEE 97], Cap. 10, Pág. 278.

Explicitando a Figura 17 a Tabela 17 apresenta uma descrição dos componentes individuais deste modelo e a Tabela 18 uma descrição dos componentes das equações (58) a (60).

Tabela 17 – Descrição dos Componentes do Modelo de Máquina Síncrona Trabalhando como Gerador para Aplicação em Estudos de Harmônicas

Sigla	Unidade	Equação	Descrição
$R_g(h)$	Ω	(58)	Resistência de armadura com valor corrigido para componente harmônica h
$X_g(h)$	Ω	(59) a (60)	Reatância subtransitória com valor corrigido para componente harmônica h

$$R_g(h) = R_{dcarm} \times (1 + Ah^B) \quad (58)$$

$$X_g(h) = h \times X'' \quad (59)$$

$$X_g(h) = h \times \frac{X''_d + X''_q}{2} \quad (60)$$

Tabela 18 – Descrição dos Componentes das Equações de (58) a (60)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
R_{dcarm}	Ω	(58)	Valor obtido através do levantamento de características de curto-circuito, sendo citado nestes testes como R_a . Este valor também é informado pelos fabricantes.	Resistência de armadura com valor para corrente contínua.
A	-	(58)	$\approx 0,1$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.	Coefficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.
B	-	(58)	$\approx 1,5$, valor típico indicado por [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.	Coefficiente citado em [IEE 97], Cap. 10, Pág. 277.
h	-	(58)	Numero da componente harmônica que está sendo analisada.	Componente harmônica analisada.
X''	-	(59)	Obtido através de ensaios de tipo em fábrica.	Reatância subtransitória
X''_d	-	(60)	Obtido através de ensaios de tipo em fábrica.	Reatância subtransitória de eixo direto
X''_q	-	(60)	Obtido através de ensaios de tipo em fábrica.	Reatância subtransitória eixo de quadratura

Pode ser observado que tanto a equação (59) quanto à (60) são para obtenção do componente $X_g(h)$. Porém, a escolha de qual equação será utilizada é em virtude do tipo construtivo do rotor do gerador síncrono, sendo a equação (59) utilizada para máquinas síncronas de polos lisos e a equação (60) para máquinas síncronas de polos salientes.

6. ESTUDO DE CASO

Para possibilitar uma validação inicial da aplicabilidade dos modelos e equações propostos neste trabalho, foi elaborado um estudo de caso baseado em medições de campo e aplicação de valores típicos. As medições foram realizadas em uma indústria localizada na região da grande Belo Horizonte – Minas Gerais - Brasil, amostradas por um analisador de qualidade de energia trifásico 8335 do fabricante AEMC Instruments, no dia 31/03/2011 entre 16h16min e 17h38min. A Figura 1 apresenta o aparelho no momento de coleta de uma das medições realizadas.



Figura 18 – Instrumento Coletando Medidas

6.1 Descrição do Caso

Considerando o objetivo do trabalho de obtenção da quantificação das perdas por harmônicas a partir de medições e cálculos, as medições foram coletas para determinação das condições de suprimento de energia que os componentes elétricos do sistema estão submetidos, sob o ponto de vista das fontes de tensão e corrente. A partir das características das fontes, são analisados os componentes existentes verificando as tensões e correntes a qual estão submetidos, possibilitando quantificação das perdas.

O sistema analisado é composto pelas cargas descritas na Tabela 19 instaladas em um centro de controle de motores de baixa tensão (460V-3Ø-60Hz).

Tabela 19 – Cargas do Sistema

Item	Descrição	Potência (kW)	Potência (CV)	Potência (kVA)	Potência (kVar)
1	Rotor de Cimento	3	4,08	-	-
2	Rotor de Escória	3	4,08	-	-
3	Balanças Dosadoras	-	-	1,4	-
4	Balanças Dosadoras	-	-	9	-
5	Transportador de correia	7,5	10,19	-	-
6	Bomba óleo mancal	3	4,08	-	-
7	Bomba óleo mancal	3	4,08	-	-
8	Bomba alta pressão	1,1	1,49	-	-
9	Bomba alta pressão	1,1	1,49	-	-
10	Bomba óleo redutor	3,75	5,10	-	-
11	Bomba óleo redutor	3,75	5,10	-	-
12	Levanta freio	0,5	0,68	-	-
13	Bomba óleo	0,37	0,50	-	-
14	Arrancador	7,5	10,19	-	-
15	Acionamento auxiliar	55	74,73	-	-
16	Ventilador p/ fluidor	5,5	7,47	-	-
17	Elevador de caçambas	75	101,90	-	-
18	Reserva	5,5	7,47	-	-
19	Ventilador p/ fluidor	11	14,95	-	-
20	Bomba óleo redutor	0,5	0,68	-	-
21	Sistema centrífugo	200	271,74	-	-
22	Reserva	1	1,36	-	-
23	Reserva	2,2	2,99	-	-
24	Regulador radial	0,25	0,34	-	-
25	Ventilador ar exaustor	220	298,91	-	-

Item	Descrição	Potência (kW)	Potência (CV)	Potência (kVA)	Potência (kVar)
26	Aquecimento de parada	0,5	0,68	-	-
27	Arrancador	0,5	0,68	-	-
28	Ventilador p/ fluidor	3	4,08	-	-
29	Separador	1,1	1,49	-	-
30	Bomba de cimento	165	224,18	-	-
31	Reserva	10	13,59	-	-
32	Reserva	20	27,17	-	-
33	Aquecimento de parada	1,8	2,45	-	-
34	Banco de capacitores	-	-	-	250

Devido às dificuldades para medir todos os demarradores, a pequena potência de alguns e a condição da validação ser inicial, a análise do estudo de caso será elaborado para as cargas mais relevantes, apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Cargas do Sistema Analisadas no Estudo de Caso

Item	Descrição	Potência (kW)	Potência (CV)	Potência (kVA)	Potência (kVar)
17	Elevador de caçambas	75	101,90	-	-
25	Ventilador ar exaustor	220	298,91	-	-

A Figura 19 e Figura 20 apresentam registros monofásicos das formas de onda de tensão e corrente para as cargas da Tabela 20. São percebidas distorções das formas de onda, tanto de tensão quanto de corrente.

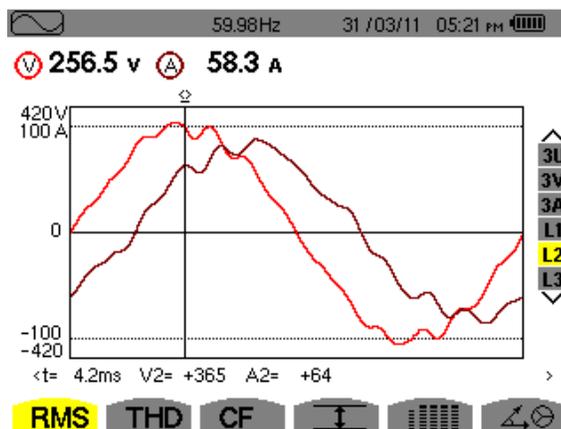


Figura 19 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Elevador de Caçambas
 Fonte: Medição Aparelho 8335 – 31/03/11 – 17h21mim23s

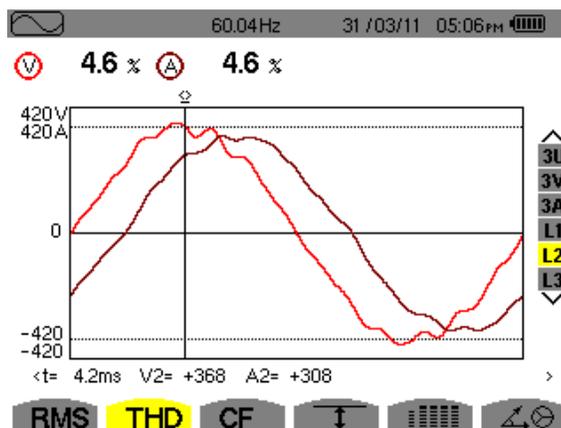


Figura 20 – Forma de Onda de Tensão e Corrente – Ventilador ar Exaustor
 Fonte: Medição Aparelho 8335 – 31/03/11 – 17h06mim43s

A Tabela 21 apresenta as cargas que contribuem no processo de distorção da forma de onda da tensão de suprimento do sistema, ou seja, as cargas não lineares fontes de harmônicas. Estas cargas não serão tratadas individualmente, pois conforme a proposta do trabalho, as contribuições individuais serão refletidas na tensão de suprimento que foi medida pelo aparelho, portanto, a fonte de tensão que será considerada nos cálculos é um resultado todas as fontes de harmônicas que atuam neste PCC. A Figura 21, Figura 22 e Figura 23 apresentam registros monofásicos das formas de onda de tensão e corrente para estas cargas. São percebidas claramente as distorções das formas de onda, principalmente as de correntes.

Tabela 21 – Cargas não Lineares do Sistema Analisadas no Estudo de Caso

Item	Descrição	Potência (kW)	Potência (CV)	Potência (kVA)	Potência (kVar)
1	Rotor de Cimento Inversor de Frequência – 6P	3	4,08	-	-
2	Rotor de Escória Inversor de Frequência – 6P	3	4,08	-	-
21	Sistema centrífugo Acionamento CA/CC – 6P	200	271,74	-	-

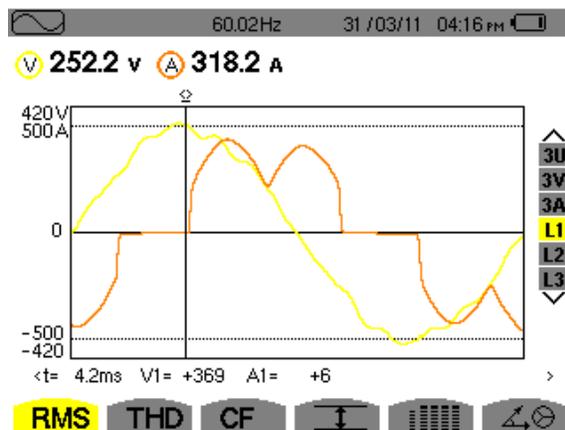


Figura 21 – Forma de Onda de Tensão e Corrente - Sistema Centrífugo
 Fonte: Medição Aparelho 8335 – 31/03/11 – 16h16mim33s

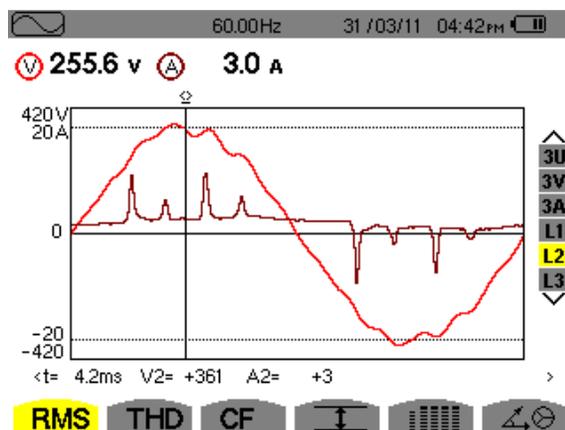


Figura 22 – Forma de Onda de Tensão e Corrente - Rotor de Cimento
 Fonte: Medição Aparelho 8335 – 31/03/11 – 16h42mim13s

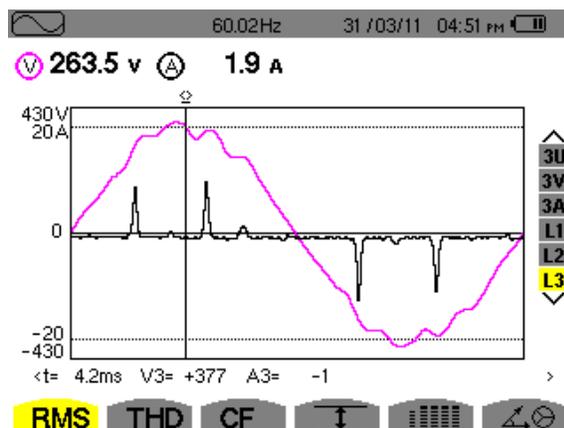


Figura 23 – Forma de Onda de Tensão e Corrente - Rotor de Escória
 Fonte: Medição Aparelho 8335 – 31/03/11 – 16h51mim59s

Considerando os modelos apresentados no item 5, o circuito da Figura 24 representa o circuito monofásico para o estudo de caso.

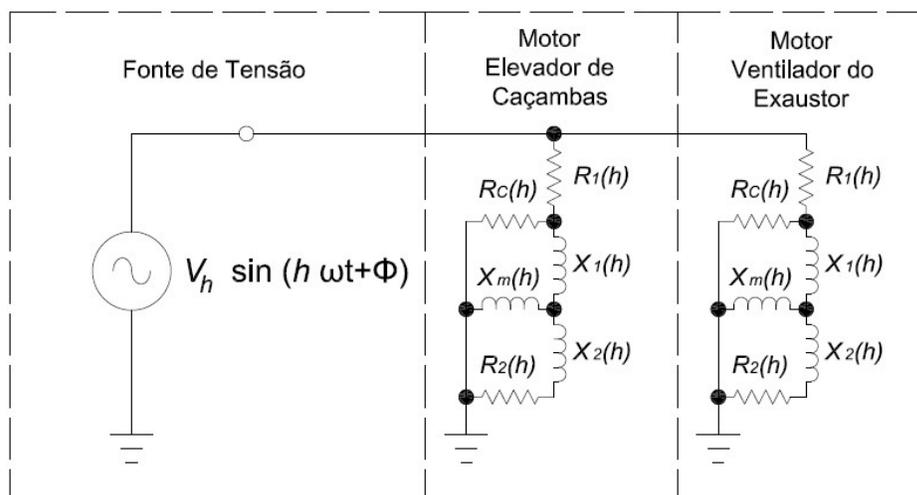


Figura 24 – Circuito Monofásico do Estudo de Caso

Os valores de cada componente dos modelos apresentados na Figura 24 foram obtidos através da metodologia apresentada no item 6.2. A Tabela 27 apresenta os valores de cada componente.

6.2 Técnica Utilizada para Obtenção dos Parâmetros dos Motores

Para obtenção dos parâmetros dos motores foi utilizada uma técnica que considera como base as curvas característica do motor de indução (potência, corrente de estator, conjugado, rendimento, fator de potência, todas em função do escorregamento), modeladas a partir dos seus parâmetros de catálogo.

Para obtenção da curva característica do motor são inferidos valores iniciais característico, sendo alterados sucessivamente até obter as curvas com valores muito próximos aos apresentados no catálogo do fabricante.

Para facilitar a obtenção das novas curvas após alteração dos valores dos parâmetros foi utilizado um código desenvolvido no programa MATLAB do fabricante MathWorks, baseados no equacionamento de motores de indução, porém em pu (por unidade), apresentado nesse trabalho. O código está apresentado no Anexo C.

Para exemplificar esta técnica, será apresentada a obtenção dos parâmetros do motor Elevador de Caçambas (75kW / 101,90 CV).

Inicialmente são obtidos os valores de catálogos do motor. Para este caso, os valores obtidos estão apresentados na Tabela 22. O catálogo utilizado neste trabalho é a referência [WEG 06].

Tabela 22 – Dados de Catálogo do Motor do Elevador de Caçambas

Característica	Valor
Máquina:	Elevador de Caçambas
TAG:	-
Fabricante:	WEG
Modelo:	Motor trifásico IP55
Potência (CV):	101,90
Potência (kW):	75,00
Número de fases:	3
Tensão nominal (V):	440
Corrente nominal (A):	127,50
Frequência nominal (Hz):	60

Característica	Valor
Numero de Polos:	6
Velocidade nominal (RPM):	1185
Velocidade síncrona (RPM):	1200
Escorregamento nominal:	0,0125
FP nominal:	0,83
Rendimento nominal:	93,00
Fator de serviço (FS):	1,00
Categoria (CAT):	N
Classe de isolamento (ISOL. CL.):	B
Letra-código (COD):	-
Regime (REG):	S1
Grau de proteção:	IP55
Ip/In	6,50
C _{nom} (kgfm):	60,40
C _p / C _n :	2,40
C _{max} / C _n :	2,50

Apesar de não estar exemplificada a obtenção dos parâmetros do motor Ventilador ar exaustor (220kW / 298,91 CV), a Tabela 23 apresenta os seus dados de catálogo.

Tabela 23 – Dados de Catálogo do Motor do Ventilador Ar Exaustor

Característica	Valor
Máquina:	Ventilador ar Exaustor
TAG:	-
Fabricante:	WEG
Modelo:	Motor trifásico IP55
Potência (CV):	298,91

Característica	Valor
Potência (kW):	220,00
Número de fases:	3
Tensão nominal (V):	440
Corrente nominal (A):	384,00
Frequência nominal (Hz):	60
Numero de Polos:	8
Velocidade nominal (RPM):	890
Velocidade síncrona (RPM):	900
Escorregamento nominal:	0,0111
FP nominal:	0,80
Rendimento nominal:	94,00
Fator de serviço (FS):	1,00
Categoria (CAT):	N
Classe de isolamento (ISOL. CL.):	B
Letra-código (COD):	-
Regime (REG):	S1
Grau de proteção:	IP55
I_p/I_n	7,00
C_{nom} (kgfm):	241,00
C_p / C_n :	1,50
C_{max} / C_n :	2,10

De posse dos dados de catálogo do motor, são obtidos os valores pu das grandezas necessárias para os ajustes, através das equações (61) a (69). Com estes valores é possível ajustar as curvas até a obtenção de uma condição aproximada.

$$P_b = P_{mec} \quad (61)$$

$$V_b = V_{nom} FN/\emptyset \quad (62)$$

$$I_b = \frac{P_b}{3 \times V_b} \quad (63)$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} \quad (64)$$

$$\omega_b = \omega_{e\ nom} = \frac{4 \times \pi \times f_{nom}}{P} \quad (65)$$

$$\omega_{b\ mec} = \omega_b \quad (66)$$

$$T_{b\ mec} = \frac{P_b}{\omega_{b\ mec}} \quad (67)$$

$$I_{nom\ (pu)} = \frac{I_{nom}}{I_b} \quad (68)$$

$$T_{nom\ (pu)} = \frac{T_{nom}}{T_b} \quad (69)$$

Para iniciar os ajustes é importante ter uma estimativa dos valores típicos das grandezas dos motores de indução. As equações (70) a (75) apresentam valores e métodos para uma obtenção inicial destes valores, para posteriormente ser executado um ajuste.

$$R_2(pu) \cong S(pu) \quad (70)$$

$$R_1(pu) \cong R_2(pu) \quad (R_2 > R_1) \quad (71)$$

$$R_c(pu) \approx 20 \text{ a } 40 (pu) \quad (72)$$

$$X_1(pu) + X_2(pu) = \frac{V_b(pu)}{I_p(pu)} \quad (73)$$

$$X_1(pu) \cong X_2(pu) \quad (X_2 > X_1) \quad (74)$$

$$X_m(pu) \cong \frac{V_b(pu)}{I_{nom}(pu) \times \sin(\cos^{-1}(FP))} \quad (75)$$

A Tabela 24 apresenta uma descrição dos componentes das equações (61) a (69).

Tabela 24 – Descrição dos Componentes das Equações de (61) a (69)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
P_b	W	(61)	Dado de catálogo de fornecedor	Potência Base.
P_{mec}	W	(61)	Dado de catálogo de fornecedor	Potência Mecânica.
V_b	V	(62)	Tensão fase-neutro, dado de catálogo de fornecedor	Tensão Fase Neutro Base
I_b	A	(63)	Obtido através da equação (63)	Corrente Base
Z_b	Ω	(64)	Obtido através da equação (64)	Impedância Base
$\omega_{e\ nom}$	rad/s	(65)	Obtido através da equação (65)	Velocidade Angular Nominal
ω_b	rad/s	(65)	Obtido através da equação (65)	Velocidade Base
$\omega_{b\ mec}$	rad/s	(66)	Obtido através da equação (66)	Velocidade Mecânica Base
P	-	(66)	Característica construtiva, dado de catálogo de fornecedor	Numero de polos do motor
$T_{b\ mec}$	N	(67)	Obtido através da equação (67)	Torque Base
$I_{nom}(pu)$	-	(68)	Obtido através da equação (68)	Corrente nominal em pu
$T_{nom}(pu)$	-	(69)	Obtido através da equação (69)	Torque nominal em pu
FP	-	(75)	Dado de catálogo de fornecedor	Fator de potência nominal do motor

Em [NOV 82] é apresentada a tabela A-3 que indica os valores típicos dos parâmetros de motores de indução. Esta está transcrita na Tabela 25.

Tabela 25 – Parâmetros Típicos de Motor de Indução (Valores em pu)

Parâmetro	R_1	R_2	X_1	X_2	X_m	R_c
Máquinas Pequenas [10-50HP]	0,02	0,02	0,1	0,1	1,5	20
Máquinas Grandes [1000-5000HP]	0,005	0,005	0,1	0,1	4	40
Máquina de Alto Escorregamento	0,02	0,02	0,1	0,1	3	30

Fonte: Referência [NOV 82]

Considerando as equações (61) a (75) foram obtidos os parâmetros necessários que possibilitam iniciar os ajustes das curvas para o motor do Elevador de Caçambas, conforme apresentado na Tabela 26. Para execução dos ajustes das curvas é essencial o entendimento do comportamento das grandezas em função da alteração dos parâmetros do motor de indução. O modelo que orienta essa variação é o apresentado na Figura 5.

Tabela 26 – Parâmetros Necessários para Iniciar Efetuar os Ajustes das Curvas

Característica	Valor
Resistência de Estator - R_1 (pu):	0,0125
Resistência de Rotor Referido - R_2 (pu):	0,0125
Resistência de Perdas no Núcleo - R_c (pu):	30
Reatância de Disperção de Estator - X_1 (pu):	0,0593
Reatância de Disperção de Rotor Referido - X_2 (pu):	0,0593
Reatância de Magnetização - X_m (pu):	1,38

Da Figura 25 até Figura 29 são apresentados os gráficos obtidos após o ajuste dos valores apresentados na Tabela 27 a partir dos valores iniciais sugeridos na Tabela 26.

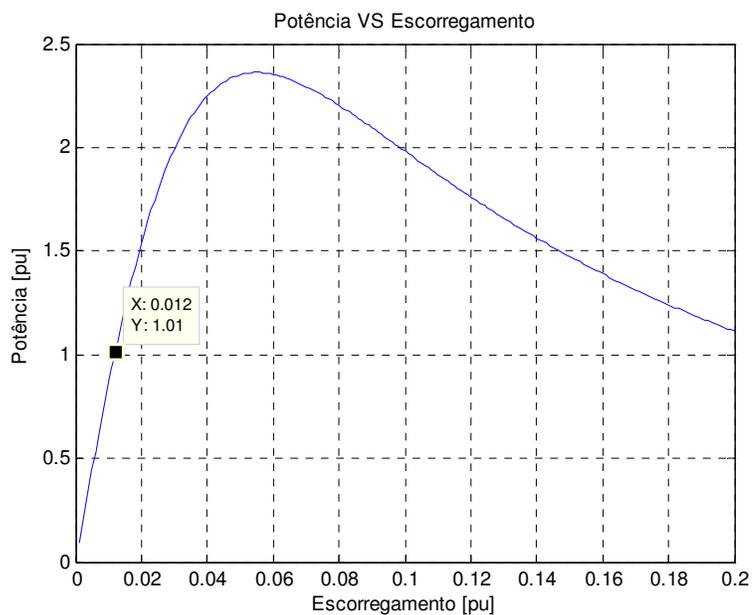


Figura 25 – Curva Potência VS Escorregamento
Fonte: Resultado do Código Matlab

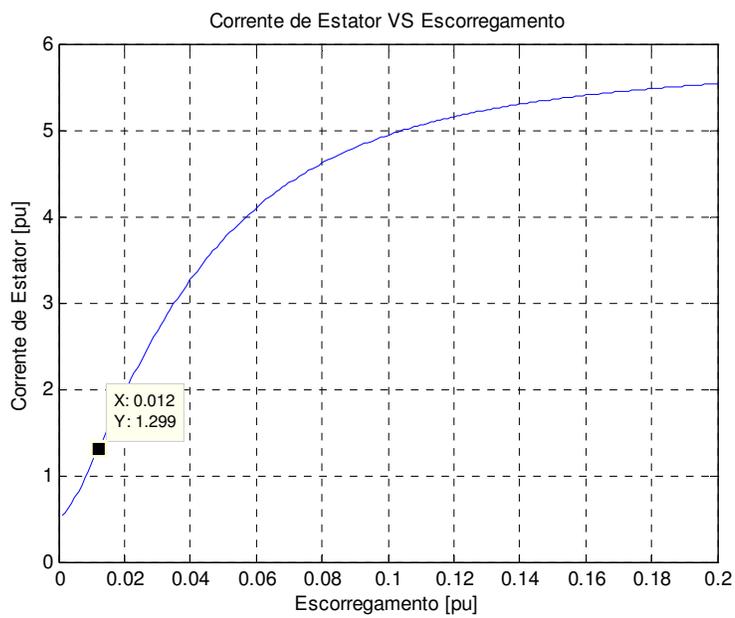


Figura 26 – Corrente de Estator VS Escorregamento
Fonte: Resultado do Código Matlab

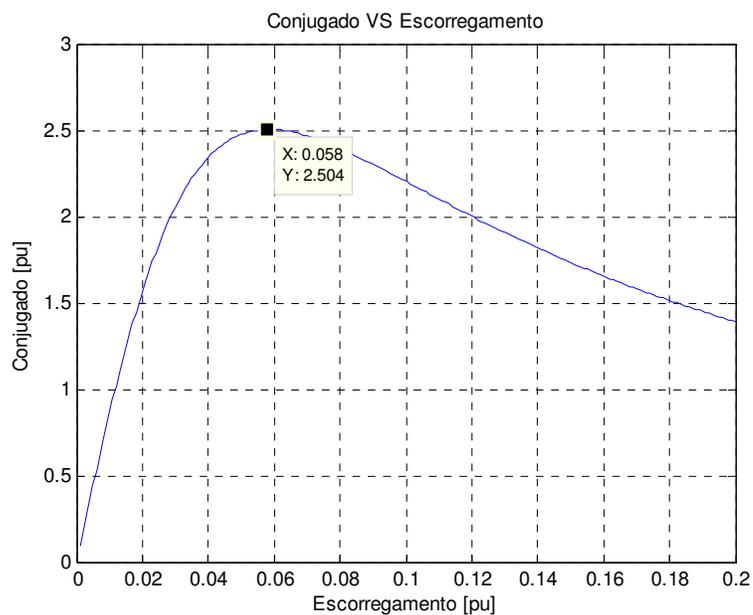


Figura 27 – Conjugado VS Escorregamento
Fonte: Resultado do Código Matlab

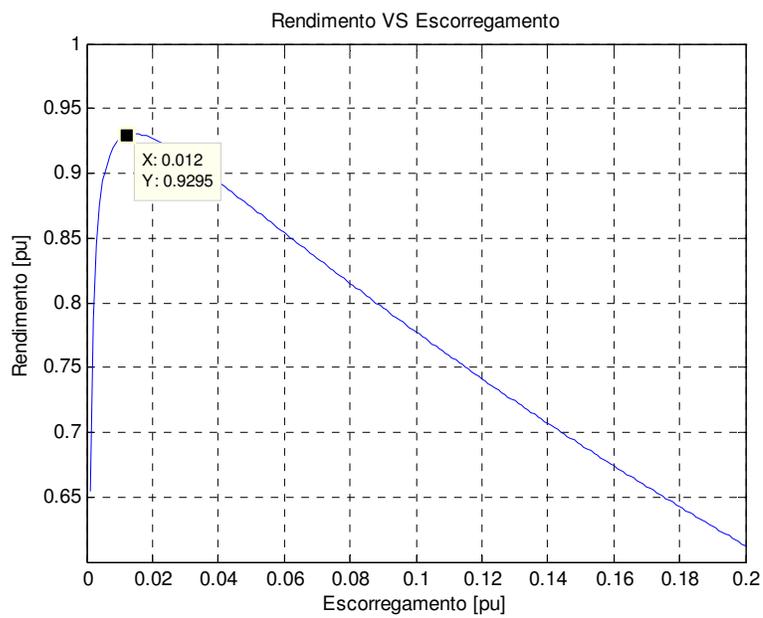


Figura 28 – Rendimento VS Escorregamento
Fonte: Resultado do Código Matlab

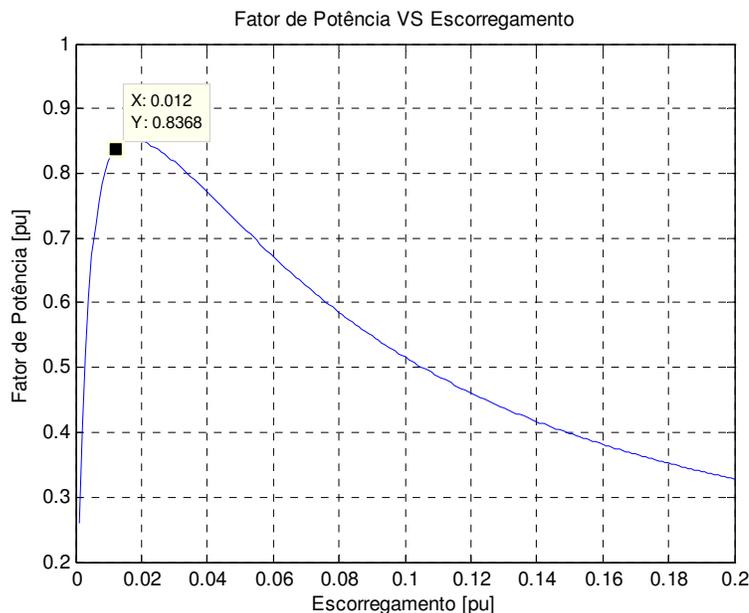


Figura 29 – Fator de Potência VS Escorregamento
Fonte: Resultado do Código Matlab

Após a realização dos procedimentos descritos neste item, os valores dos parâmetros obtidos para os motores analisados estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Valores dos Componentes da Figura 24 (Motor do Elevador de Caçambas)

Característica	Valor
Resistência de Estator - R_1 (Ω):	0,0323
Resistência de Rotor Referido - R_2 (Ω):	0,0258
Resistência de Perdas no Núcleo - R_C (Ω):	58
Reatância de Disperção de Estator - X_1 (Ω):	0,2246
Reatância de Disperção de Rotor Referido - X_2 (Ω):	0,2246
Reatância de Magnetização - X_m (Ω):	4,78

O exemplo apresentado foi para o motor do Elevador de Caçambas. Através da realização dos procedimentos demonstrados neste item, foram obtidos os dados do Motor do Ventilador Ar Exaustor, conforme apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 – Valores dos Componentes da Figura 24 (Motor do Ventilador Ar Exaustor)

Característica	Valor
Resistência de Estator - R_1 (Ω):	0,0098
Resistência de Rotor Referido - R_2 (Ω):	0,0077
Resistência de Perdas no Núcleo - R_C (Ω):	28
Reatância de Disperção de Estator - X_1 (Ω):	0,0915
Reatância de Disperção de Rotor Referido - X_2 (Ω):	0,0915
Reatância de Magnetização - X_m (Ω):	1,63

O procedimento proposto proporciona resultados satisfatórios para ajustes de curvas e respectivos valores na faixa de operação próxima ao escorregamento nominal, condição adequada para este estudo.

6.3 Valores Calculados

No circuito da Figura 24 estão indicadas as tensões, correntes e perdas previstas nesta análise, sendo seus valores apresentados no Anexo C. Os cálculos que possibilitaram a obtenção destes valores foram realizados através de uma planilha eletrônica desenvolvida pelo autor no programa EXCEL do fabricante Microsoft, baseados no equacionamento proposto neste trabalho.

A Tabela 29 apresenta as perdas calculadas nas cargas analisadas no estudo de caso. Para seu cálculo, foram consideradas condições de regime nominal, não sendo refletidas variações de carga ou regimes transitório, conforme previsto nas premissas (item 2) deste trabalho.

Tabela 29 – Perdas nas Cargas Analisadas

Motor do Elevador de Caçambas								
Totais	Perdas - Fundamental	(W)	554,02	326,90	480,97	584,47	1065,44	1946,37
	Perdas - Harmônicas	(W)	1,78	1,33	0,18	1,85	2,03	5,14
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,32%	0,41%	0,04%	0,32%	0,19%	0,26%
FASE R			$P_{R1} (R)$	$P_{ROTOR} (R)$	$P_H (R)$	$P_F (R)$	$P_N (R)$	$P_T (R)$
Totais	Perdas - Fundamental	(W)	568,61	335,51	493,64	599,86	1093,50	1997,62
	Perdas - Harmônicas	(W)	1,35	0,98	0,14	1,50	1,63	3,97
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,24%	0,29%	0,03%	0,25%	0,15%	0,20%
FASE S			$P_{R1} (S)$	$P_{ROTOR} (S)$	$P_H (S)$	$P_F (S)$	$P_N (S)$	$P_T (S)$
Totais	Perdas - Fundamental	(W)	597,44	352,52	518,67	630,28	1148,94	2098,91
	Perdas - Harmônicas	(W)	1,89	1,54	0,19	1,85	2,04	5,48
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,32%	0,43%	0,04%	0,29%	0,18%	0,26%
FASE T			$P_{R1} (T)$	$P_{ROTOR} (T)$	$P_H (T)$	$P_F (T)$	$P_N (T)$	$P_T (T)$
Totais	Perdas - Fundamental	(W)	1720,08	1014,93	1493,27	1814,61	3307,88	6042,89
	Perdas - Harmônicas	(W)	5,03	3,85	0,52	5,19	5,71	14,59
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,29%	0,38%	0,03%	0,29%	0,17%	0,24%
TRIFÁSICO			P_{R1}	P_{ROTOR}	P_H	P_F	P_N	P_T

Motor do Ventilador Ar Exaustor								
Totais	Perdas - Fundamental	(W)	1448,17	844,30	1077,21	844,30	2212,91	4505,37
	Perdas - Harmônicas	(W)	2,67	2,09	0,31	2,87	3,18	7,94
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,18%	0,25%	0,03%	0,34%	0,14%	0,18%
FASE R			$P_{R1} (R)$	$P_{ROTOR} (R)$	$P_H (R)$	$P_F (R)$	$P_N (R)$	$P_T (R)$
Totais	Perdas - Fundamental	(W)	1486,24	866,49	1105,52	866,49	2271,08	4623,81
	Perdas - Harmônicas	(W)	2,00	1,53	0,23	2,28	2,51	6,04
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,13%	0,18%	0,02%	0,26%	0,11%	0,13%
FASE S			$P_{R1} (S)$	$P_{ROTOR} (S)$	$P_H (S)$	$P_F (S)$	$P_N (S)$	$P_T (S)$
Totais	Perdas - Fundamental	(W)	1562,67	911,05	1077,95	1309,92	2387,87	4861,60
	Perdas - Harmônicas	(W)	3,36	2,50	0,39	3,93	4,31	10,17
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,21%	0,27%	0,04%	0,30%	0,18%	0,21%
FASE T			$P_{R1} (T)$	$P_{ROTOR} (T)$	$P_H (T)$	$P_F (T)$	$P_N (T)$	$P_T (T)$

Totais	Perdas - Fundamental	(W)	4497,09	2621,84	3260,68	3020,71	6871,86	13990,8
	Perdas - Harmônicas	(W)	8,03	6,11	0,93	9,08	10,00	24,15
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,18%	0,23%	0,03%	0,30%	0,15%	0,17%
TRIFÁSICO			P_{R1}	P_{ROTOR}	P_H	P_F	P_N	P_T

6.4 Valores Medidos

Os valores medidos no estudo de caso estão apresentados no Anexo D. Na tabela do Anexo E, foram transcritos os valores de corrente de estator calculados no item 6.3 (Anexo C) e os valores do estudo de caso medido em campo (Anexo D), possibilitando uma comparação entre os valores medidos e os valores calculados através dos modelos.

As diferenças encontradas foram grandes, tanto para os módulos quanto para os ângulos. Diversos fatores podem justificar estes desvios, entre eles destaca-se o ponto de funcionamento dos motores, pois eles podem estar trabalhando abaixo do seu melhor ponto de carregamento, sendo que os cálculos consideram o motor trabalhando em seu escorregamento nominal, ou seja, a melhor condição de carregamento. Outra possibilidade é a eventual imprecisão dos modelos apresentados neste trabalho, que poderiam não representar corretamente o funcionamento destas máquinas.

6.5 Análise Financeira

Para possibilitar uma avaliação inicial do potencial econômico da aplicação deste trabalho, a seguir é apresentada uma análise financeira simples dos custos relacionados às perdas calculadas no item 6.2.

Os dados de entrada da análise são apresentados na Tabela 30 e o equacionamento que possibilita a quantificação está representado através das equações (76) e (77).

$$G_A = P_T \times h_A \times R\$/kWh \quad (76)$$

$$h_A = h_{TA} - h_{PA} \quad (77)$$

Tabela 30 – Descrição dos Componentes das Equações de (76) e (77)

Sigla	Unidade	Equação	Valor	Descrição
G_A	R\$	(76)	Obtido através da equação (76)	Ganho anual da ação
$R\$/kWh$	R\$	(76)	Valor cobrado pela concessionária para remunerar o consumo de energia da indústria analisada	Valor do kWh
P_T	kW	(76)	Valor obtido através dos cálculos propostos neste trabalho (p. ex. item 6.3)	Perdas Totais Consequentes das Harmônicas
h_A	h	(77)	Obtido através da equação (77)	Horas úteis para a análise
h_{TA}	h	(77)	Horas disponíveis para trabalho por ano	Horas Disponíveis para Trabalho por Ano
h_{PA}	h	(77)	Valor obtido nas equipes de produção ou manutenção da indústria analisada	Horas paradas anualmente

Na Tabela 31 são apresentados os valores utilizados nos cálculos e a premissas utilizadas para sua obtenção.

Tabela 31 – Valores Utilizados nos Cálculos de Ganhos e suas Premissas

Sigla	Descrição	Valor	Premissa
$R\$/kWh$	Valor do kWh	R\$ 0,10	Valor próximo do cobrado pela concessionária para remunerar o consumo de energia da indústria analisada
h_{TA}	Horas trabalhadas anualmente	8760 horas	Todas as horas para um ano padrão de 365 dias
h_{PA}	Horas paradas anualmente	≈938 horas	Considerado que durante 6 dias por semana, o sistema para 3 horas / dia para desligamento no horário de pico
$Juros$	Valor do dinheiro	12% a.a.	Juros atualmente pagos para aplicações de maior volume (Dez/2011)

Sigla	Descrição	Valor	Premissa
P_T	Perdas Totais Consequentes das Harmônicas	0,03873 kW	Valor calculado no item 6.3 (soma das perdas nos 2 motores)
PB	Payback simples	2 anos	Tempo de payback aceito por grande parte das empresas para investimento em soluções

Considerando os dados apresentados na Tabela 31 os cálculos e resultados deste estudo de caso estão apresentados nas equações (78) a análise financeira da Figura 30.

$$G_A = P_T \times h_A \times R\$/kWh = 0,03873 \times (8760 - 938) \times 0,10 \cong R\$30,29 \quad (78)$$

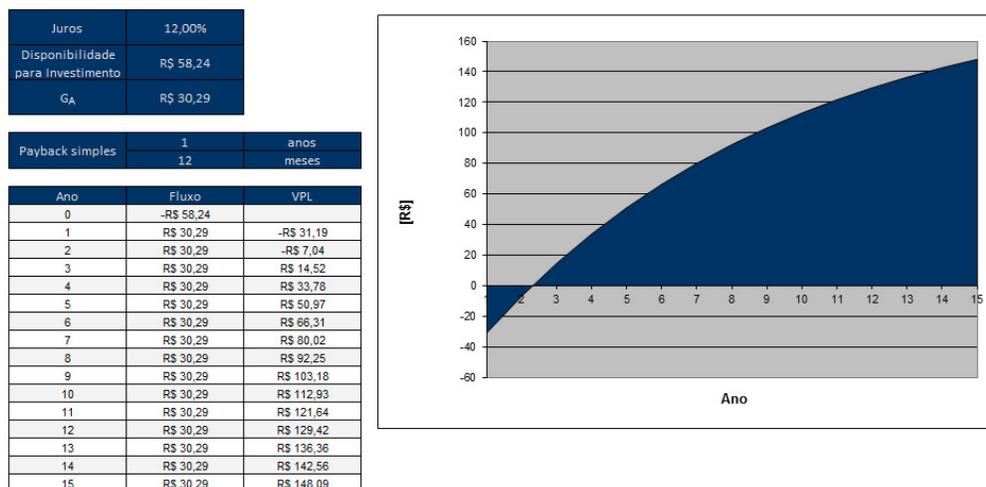


Figura 30 – Análise Financeira do Estudo de Caso
Fonte: Planilha Desenvolvida pelo Consultor Andreas Hahn

Os dados da análise financeira do estudo de caso apresentado na Figura 30, indica que considerando as condições contorno da Tabela 31 é possível investir o valor de R\$58,24 para aplicação em ações mitigadoras de componentes harmônicas, como por exemplo, filtros sintonizados para mitigar as harmônicas mais prejudiciais.

Para favorecer a análise do potencial financeiro deste trabalho, serão apresentadas nos itens 6.5.1 e 6.5.4 quatro extrapolações de cenários.

6.5.1 Cenário 1 – Considerando Efeito de Perdas sobre Todas as Cargas da Indústria do Estudo de Caso

Este cenário considera que as perdas contabilizadas para os motores do Elevador de Caçambas e Ventilador Ar Exaustor se repetirão para todas as outras cargas motóricas conectadas no mesmo PCC. As cargas consideradas nesta extrapolação são as cargas motóricas da Tabela 19. Para possibilitar estes cálculos será considerado que a mesma proporção de aumento de perdas observadas para as cargas analisadas se repetirão nas outras cargas com as mesmas características. Considerado que o aumento médio das perdas para as cargas analisadas foi de 0,205% (média entre 0,24% + 0,17%) vai se repetir em todos os motores listados na Tabela 19. A potência total destes motores é 815,42kW, sendo considerado um rendimento médio de 94%, portanto, uma perda total de aproximadamente 48,93kW. Desta forma, 0,205% de 48,93kW, ou seja, aproximadamente 0,1kW, são as perdas previstas para todas as cargas conectadas neste PCC.

Assim, na Tabela 32 são apresentados os valores utilizados nos cálculos e a premissas utilizadas para sua obtenção.

Tabela 32 – Valores Utilizados nos Cálculos de Ganhos e suas Premissas – Cenário 1

Sigla	Descrição	Valor	Premissa
$R\$/kWh$	Valor do kWh	R\$ 0,10	Valor próximo do cobrado pela concessionária para remunerar o consumo de energia da indústria analisada
h_{TA}	Horas trabalhadas anualmente	8760 horas	Todas as horas para um ano padrão de 365 dias
h_{PA}	Horas paradas anualmente	≈938 horas	Considerado que durante 6 dias por semana, o sistema para 3 horas / dia para desligamento no horário de pico
$Juros$	Valor do dinheiro	12% a.a.	Juros atualmente pagos para aplicações de maior volume (Dez/2011)

Sigla	Descrição	Valor	Premissa
P_T	Perdas Totais Consequentes das Harmônicas	0,1 kW	Considerado que o aumento médio das perdas de 0,205% (0,24% + 0,17%) vai se repetir em todos os motores listados na Tabela 19. A potência total destes motores é 815,42kW, sendo considerado um rendimento médio de 94%.
PB	Payback simples	2 anos	Tempo de payback aceito por grande parte das empresas para investimento em soluções

Considerando os dados apresentados na Tabela 32 os cálculos e resultados deste estudo de caso estão apresentados nas equações (79) a análise financeira da Figura 31.

$$G_A = P_T \times h_A \times R\$/kWh = 0,1 \times (8760 - 938) \times 0,10 \cong R\$78,22 \quad (79)$$

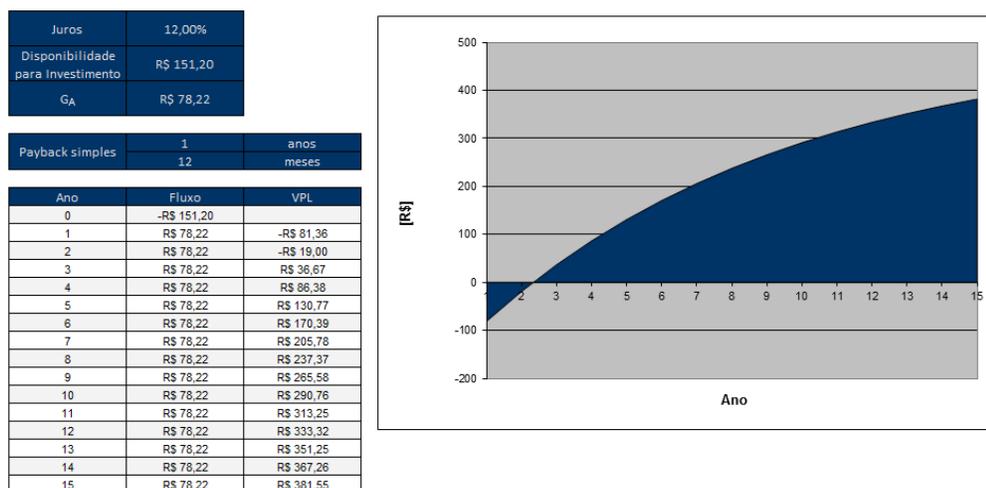


Figura 31 – Análise Financeira do Estudo de Caso - Cenário 1
Fonte: Planilha Desenvolvida pelo Consultor Andreas Hahn

Os dados da análise financeira do estudo de caso apresentado na Figura 30, indica que considerando as condições contorno da Tabela 32 é possível investir o

valor de R\$151,20. Esta é uma condição melhor do ponto de vista de possibilidades de investimento, porém, ainda muito distante dos valores de investimento necessário para se obter soluções adequadas, como construção a fabricação de filtros.

6.5.2 Cenário 2 – Considerando Distorções Harmônicas de Tensão Mais Severas Aplicadas ao Cenário 1

Este novo cenário tem como objetivo identificar duas questões, sendo a primeira, a identificação preliminar da regra de variação do percentual de aumento das perdas em relação à Distorção Harmônica Total de Tensão (THD_V). A segunda é associar perdas financeiras e fazer a análise de retorno de investimento para alguns valores.

Como ponto de partida para esta extrapolação, será novamente considerada a perda total dos motores instalados no PCC (aproximadamente 48,93kW), conforme cálculos apresentados no item 6.5.1. As perdas totais devido às harmônicas de 0,1kW, consequentes de um aumento médio das perdas de 0,205%, é resultado para uma THD_V de 5,11% (considerando todas as 50 componentes). Para análise da primeira questão, são necessárias simulações de outros valores de THD_V . Os resultados destas simulações estão apresentados na Tabela 33, descrevendo as perdas totais e aumento médio das perdas quando o valor da THD_V aumenta. As THD_V foram calculadas com base no aumento das distorções harmônicas características observadas no caso do item 6.5, ou seja, 5°, 7°, 11° e 13°. Foram mantidas as proporções originais entre as distorções das harmônicas de tensão medidas, sendo os valores individuais multiplicados por um fator. A THD_V de 4,75% foi medida no PCC do caso, considerando apenas as harmônicas 5, 7, 11 e 13.

Tabela 33 – Perdas Totais e Aumento Médio de Perdas por THD_v

THD _v (%)	Harmônica de Tensão em Percentual da Fundamental (%)				Aumento Médio das Perdas (%)	Perdas Totais Devido à Harmônicas (kW)	Coeficiente Angular
	5°	7°	11°	13°			
4,75	2,43	0,85	2,95	2,57	0,17	0,08	-
5,00	2,56	0,90	3,11	2,70	0,19	0,09	0,04
7,50	3,85	1,34	4,66	4,06	0,42	0,20	0,04
10,00	5,13	1,79	6,22	5,41	0,74	0,36	0,06
12,50	6,41	2,24	7,77	6,76	1,15	0,56	0,08
15,00	7,69	2,69	9,32	8,11	1,64	0,80	0,10
17,50	8,97	3,13	10,88	9,46	2,22	1,09	0,12
20,00	10,25	3,58	12,43	10,82	2,88	1,41	0,13
22,50	11,54	4,03	13,99	12,17	3,62	1,77	0,14
25,00	12,82	4,48	15,54	13,52	4,43	2,17	0,16
27,50	14,10	4,93	17,09	14,87	5,31	2,60	0,17
30,00	15,38	5,37	18,65	16,22	6,25	3,06	0,18
32,50	16,66	5,82	20,20	17,58	7,26	3,55	0,20
35,00	17,94	6,27	21,75	18,93	8,32	4,07	0,21
37,50	19,23	6,72	23,31	20,28	9,43	4,61	0,22
40,00	20,51	7,16	24,86	21,63	10,59	5,18	0,23
42,50	21,79	7,61	26,42	22,98	11,78	5,77	0,24
45,00	23,07	8,06	27,97	24,34	13,02	6,37	0,24
47,50	24,35	8,51	29,52	25,69	14,29	6,99	0,25
50,00	25,63	8,95	31,08	27,04	15,59	7,63	0,26
52,50	26,92	9,40	32,63	28,39	16,91	8,27	0,26
55,00	28,20	9,85	34,19	29,74	18,25	8,93	0,26
57,50	29,48	10,30	35,74	31,10	19,61	9,59	0,26
60,00	30,76	10,75	37,29	32,45	20,98	10,26	0,27
62,50	32,04	11,19	38,85	33,80	22,36	10,94	0,27

THD _v (%)	Harmônica de Tensão em Percentual da Fundamental (%)				Aumento Médio das Perdas (%)	Perdas Totais Devido à Harmônicas (kW)	Coeficiente Angular
	5°	7°	11°	13°			
65,00	33,33	11,64	40,40	35,15	23,74	11,62	0,27
67,50	34,61	12,09	41,96	36,50	25,12	12,29	0,27
70,00	35,89	12,54	43,51	37,86	26,51	12,97	0,27
72,50	37,17	12,98	45,06	39,21	27,89	13,65	0,27
75,00	38,45	13,43	46,62	40,56	29,26	14,32	0,27
77,50	39,73	13,88	48,17	41,91	30,63	14,99	0,27
80,00	41,02	14,33	49,72	43,26	31,99	15,65	0,26
82,50	42,30	14,78	51,28	44,62	33,33	16,31	0,26
85,00	43,58	15,22	52,83	45,97	34,66	16,96	0,26
87,50	44,86	15,67	54,39	47,32	35,97	17,60	0,26
90,00	46,14	16,12	55,94	48,67	37,27	18,24	0,26
92,50	47,42	16,57	57,49	50,02	38,55	18,86	0,25
95,00	48,71	17,01	59,05	51,38	39,81	19,48	0,25
97,50	49,99	17,46	60,60	52,73	41,05	20,09	0,24
100,00	51,27	17,91	62,16	54,08	42,28	20,69	0,24

Distorções harmônicas de tensão tão severas quanto as apresentadas na Tabela 33 são extremamente raras, sendo que [IEE 93], Cap. 10, Pág. 85 recomenda o limite de THD_v de 5% para tensões < 69kV. Porém, foram realizadas simulações até THD_v de 100% para possibilitar uma análise da tendência de crescimento.

A Figura 32 apresenta o gráfico da variação das Perdas Totais Devido à Harmônicas em função da THD_v .

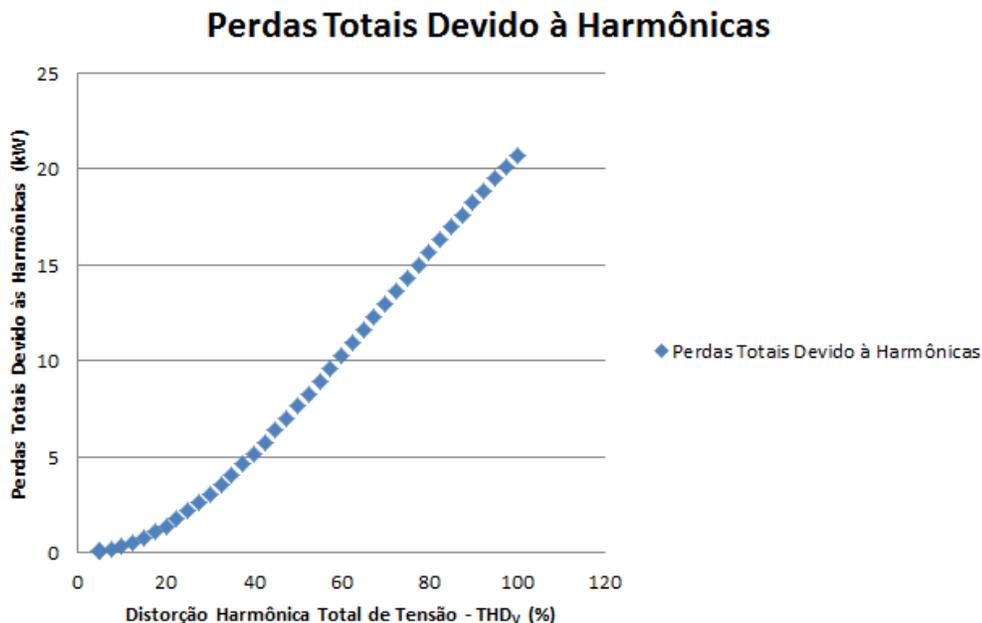


Figura 32 – Gráfico de Perdas Totais Devido à Harmônicas em função da THD_v

Percebe-se que existem duas fases no gráfico, sendo uma com característica de equação do segundo grau (relação quadrática), aproximadamente entre 0 e 40%, e outra acima de 40% até 100%, com característica de equação de primeiro grau (relação linear). Foi inserido na tabela o coeficiente angular entre o valor da linha e o anterior para auxiliar na identificação das duas fases. Os valores dos coeficientes reforçam esta interpretação, pois, variam razoavelmente entre 4,75% a 40% e mantêm praticamente constantes acima de 40% até 100%.

Assim o gráfico da Figura 32 será dividido em dois (Figura 33 e Figura 34), apresentando respectivamente as fases quadrática e linear.

Perdas Totais Devido à Harmônicas

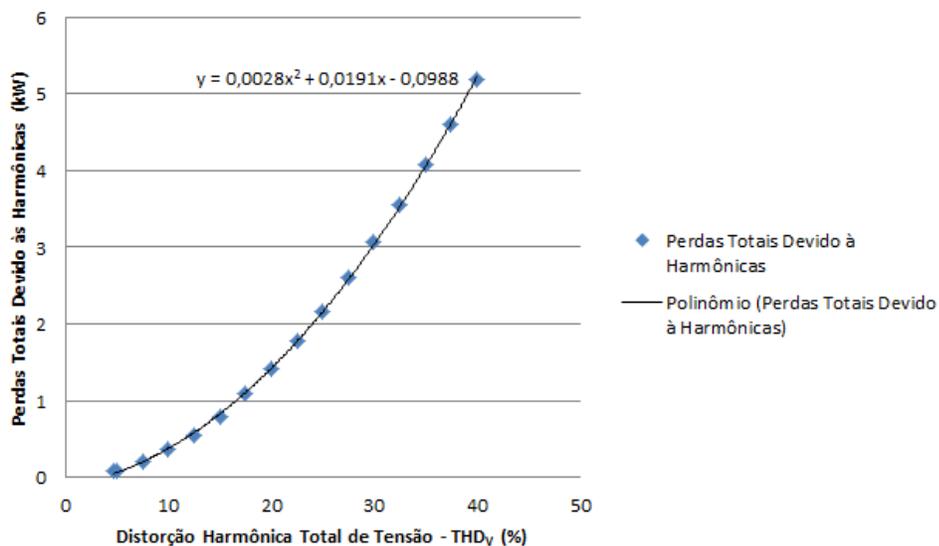


Figura 33 – Gráfico de Perdas Totais Devido à Harmônicas em função da THD_v (Fase Quadrática)

Perdas Totais Devido à Harmônicas

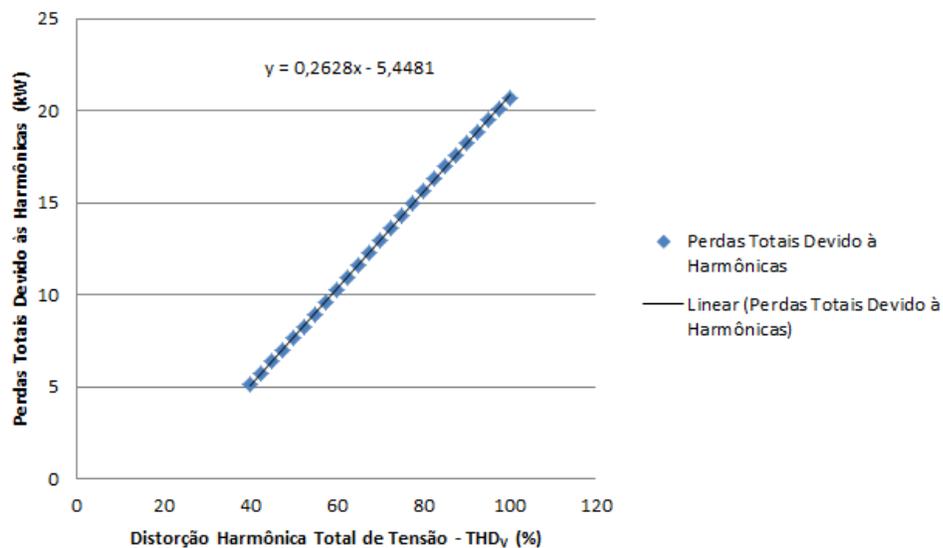


Figura 34 – Gráfico de Perdas Totais Devido à Harmônicas em função da THD_v (Fase Linear)

Considerando que a maioria das THD_V são de valores abaixo de 40%, este trabalho conclui que existe uma relação quadrática entre a THD_V e as perdas relacionadas a esta harmônicas. Como as perdas financeiras são diretamente proporcionais às perdas elétricas, é direta a conclusão que limitar as distorções nos valores recomendados pelas normas é interessante não apenas sob a ótica regulamentar, mas também, sob a ótica financeira. A Tabela 35 relaciona os valores em real para as perdas financeiras anuais relacionadas às distorções harmônicas extrapoladas para o caso deste trabalho. As premissas destes cálculos são apresentadas na Tabela 34.

Considerando os dados apresentados na Tabela 34 os cálculos da foram realizados com base na equação (80).

$$G_A = P_T \times h_A \times \frac{R\$}{kWh} = \text{Coluna 3 da Tabela 35} \times (8760 - 938) \times 0,10 \quad (80)$$

$$\cong \text{Coluna 4 da Tabela 35}$$

Tabela 34 – Valores Utilizados nos Cálculos de Ganhos e suas Premissas – Cenário 2

Sigla	Descrição	Valor	Premissa
$R\$/kWh$	Valor do kWh	R\$ 0,10	Valor próximo do cobrado pela concessionária para remunerar o consumo de energia da indústria analisada
h_{TA}	Horas trabalhadas anualmente	8760 horas	Todas as horas para um ano padrão de 365 dias
h_{PA}	Horas paradas anualmente	≈938 horas	Considerado que durante 6 dias por semana, o sistema para 3 horas / dia para desligamento no horário de pico
$Juros$	Valor do dinheiro	12% a.a.	Juros atualmente pagos para aplicações de maior volume (Dez/2011)

Sigla	Descrição	Valor	Premissa
P_T	Perdas Totais Consequentes das Harmônicas	Valores da coluna 3 da Tabela 35	Premissas do cenário do item 6.5.1, porém, com aumento médio das perdas percentuais de acordo com os valores da coluna 2 da Tabela 35, referentes os novos valores das componentes harmônicas previstas neste cenário.
P_B	Payback simples	2 anos	Tempo de payback aceito por grande parte das empresas para investimento em soluções

Tabela 35 – Perdas Financeiras em Função das Perdas Elétricas e THD_v

THD _v (%)	Aumento Médio das Perdas (%)	Perdas Totais Devido à Harmônicas (kW)	Perdas Financeiras - G _A (R\$)
4,75	0,17	0,08	62,58
5,00	0,19	0,09	70,40
7,50	0,42	0,20	156,44
10,00	0,74	0,36	281,59
12,50	1,15	0,56	438,03
15,00	1,64	0,80	625,76
17,50	2,22	1,09	852,60
20,00	2,88	1,41	1.102,90
22,50	3,62	1,77	1.384,49
25,00	4,43	2,17	1.697,37
27,50	5,31	2,60	2.033,72
30,00	6,25	3,06	2.393,53
32,50	7,26	3,55	2.776,81
35,00	8,32	4,07	3.183,55
37,50	9,43	4,61	3.605,94
40,00	10,59	5,18	4.051,80

THD _v (%)	Aumento Médio das Perdas (%)	Perdas Totais Devido à Harmônicas (kW)	Perdas Financeiras - G _A (R\$)
42,50	11,78	5,77	4.513,29
45,00	13,02	6,37	4.982,61
47,50	14,29	6,99	5.467,58
50,00	15,59	7,63	5.968,19
52,50	16,91	8,27	6.468,79
55,00	18,25	8,93	6.985,05
57,50	19,61	9,59	7.501,30
60,00	20,98	10,26	8.025,37
62,50	22,36	10,94	8.557,27
65,00	23,74	11,62	9.089,16
67,50	25,12	12,29	9.613,24
70,00	26,51	12,97	10.145,13
72,50	27,89	13,65	10.677,03
75,00	29,26	14,32	11.201,10
77,50	30,63	14,99	11.725,18
80,00	31,99	15,65	12.241,43
82,50	33,33	16,31	12.757,68
85,00	34,66	16,96	13.266,11
87,50	35,97	17,60	13.766,72
90,00	37,27	18,24	14.267,33
92,50	38,55	18,86	14.752,29
95,00	39,81	19,48	15.237,26
97,50	41,05	20,09	15.714,40
100,00	42,28	20,69	16.183,72

Para favorecer a percepção do montante disponível para aplicação em soluções de mitigação do problema de distorção harmônica de tensão, será

realizada a análise financeira para alguns valores da Tabela 35. Os valores escolhidos são 25% e 40%, devido respectivamente a possível existência de sistemas com esta distorção para o valor de 25% e o limite identificado da relação quadrática entre a THD_V e as perdas. Permanecem válidas as premissas da Tabela 34. Os resultados são respectivamente apresentados na Figura 35 e Figura 36 respectivamente.

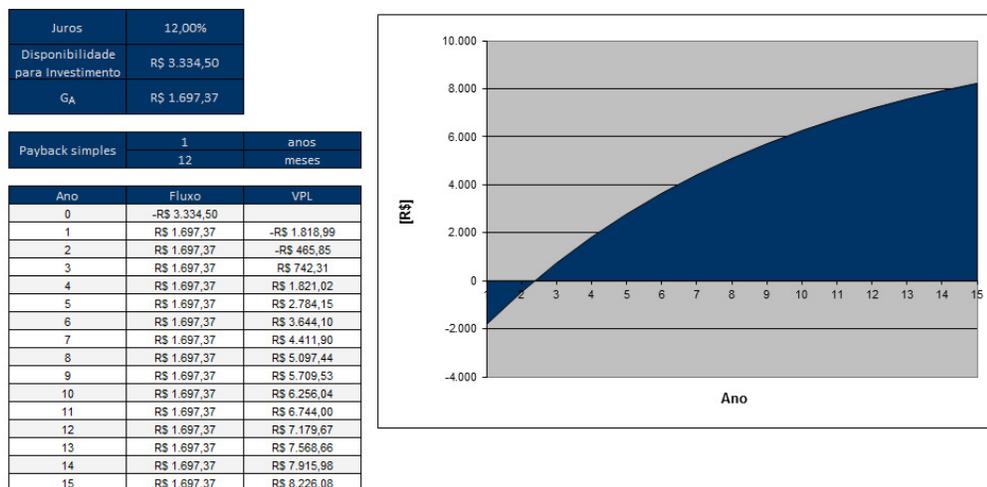


Figura 35 – Análise Financeira do Estudo de Caso - Cenário 2 - THD_V de 25%
Fonte: Planilha Desenvolvida pelo Consultor Andreas Hahn

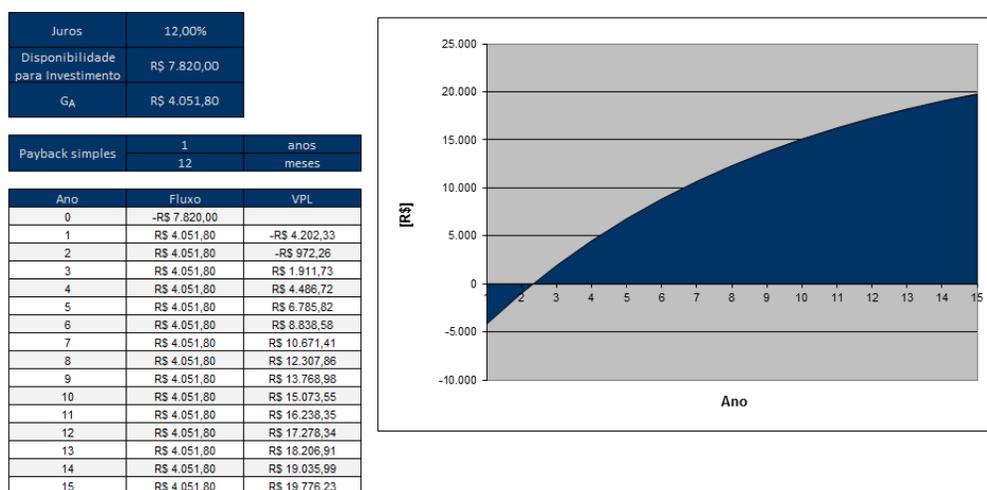


Figura 36 – Análise Financeira do Estudo de Caso - Cenário 2 - THD_V de 40%
Fonte: Planilha Desenvolvida pelo Consultor Andreas Hahn

As análises financeiras indicam valores de R\$ 3.334,50 e R\$ 7.820,00 para os valores de THD_V de 25% e 40%, respectivamente, considerando as condições contorno da Tabela 34. Estes valores começam a viabilizar projetos de soluções padronizadas para faixas de potência e harmônicas determinadas previamente.

6.5.3 Cenário 3 – Análise das Perdas Relativas para Motores de Pequeno, Médio e Grande Porte

Com o objetivo de comparar a influência do acréscimo das perdas provocadas pelas harmônicas entre máquinas de pequeno, médio e grande porte, são apresentados na Tabela 37 os valores obtidos para cada uma.

Para obtenção destes valores, está considerada uma distorção harmônica total (THD_V) de 5%, com as componentes 5°, 7°, 11° e 13° respectivamente e aproximadamente iguais a 2,51%, 1,04%, 3,07% e 2,75%, valores próximos aos da Tabela 33. Foram considerados os valores dos parâmetros citados na Tabela 25, convertidos para Ohms. Para a máquina média, estes valores foram calculados através da média entre a máquina pequena e a grande. Estes parâmetros estão apresentados na Tabela 36. Foram consideradas as seguintes máquinas do fabricante Siemens: 18,5kW/440V (pequena), 550kW/4,16kV (média) e 950kW/4,16kV (grande). Características detalhadas destas máquinas podem ser obtidas em [SIE 09] e [SIE 10].

Tabela 36 – Parâmetros dos Motores (Valores em pu / Ohms)

Parâmetro	R_1 (pu/ Ω)	R_2 (pu/ Ω)	X_1 (pu/ Ω)	X_2 (pu/ Ω)	X_m (pu/ Ω)	R_c (pu/ Ω)
Máquina Pequena	0,02/0,21	0,02/0,21	0,1/1,04	0,1/1,04	1,5/15,7	20/209,29
Máquina Média	0,0125/0,39	0,0125/0,39	0,1/3,14	0,1/3,14	2,75/86,53	30/943,94
Máquina Grande	0,005/0,09	0,005/0,09	0,1/1,82	0,1/1,82	4/72,87	40/728,66

Tabela 37 – Acréscimo de Perdas Por Harmônicas

Máquina	Acréscimo de Perdas
Máquina Pequena	0,26%
Máquina Média	0,26%
Máquina Grande	0,19%

Analisando estes valores é possível verificar que quando a potência da máquina aumenta, a influência relativa das perdas provocadas pelas componentes harmônicas da diminuem. Outro indicativo neste trabalho que fortalece desta determinação está apresentado no item 6.3, quando para máquina de 75kW é obtido um aumento de 0,24% nas perdas provocadas pelas harmônicas, na máquina 220kW este valor é de 0,17%.

Vale destacar que análise sobre a máquina pequena 18,5kW/440V não possibilitou um boa base de comparação, visto que para esta potência elas não são fabricadas para alimentação em alta tensão, bem como as máquinas média e grande que tradicionalmente não são fabricadas em baixa tensão, dificultando uma análise prática do problema.

6.5.4 Cenário 4 – Análise do Acréscimo de Perdas Devido ao Desequilíbrio de Tensão

O motor de indução é um dos equipamentos que mais possui o seu comportamento alterado pelo desequilíbrio de tensão. Em [MOR 00], Cap. 5, Pág. 62, são citados alguns destes efeitos:

- Desperdício de energia devido à existência de maiores perdas provocadas por altas correntes desequilibradas (redução do rendimento);
- Elevação de temperatura acima dos limites aceitáveis pelo motor;
- Redução do conjugado disponível para a carga, pela existência pela existência de componentes de campo magnético girante em sentido contrário ao da rotação do rotor;
- Pequena redução do fator de potência.

Durantes as medições realizadas para o estudo de caso foram identificados desequilíbrios de tensão na fonte, conforme valores das tensões e FDT (Fator de Desequilíbrio de Tensão) apresentados na Tabela 38, com o FDT calculado através da equação (81).

Tabela 38 – Tensões e FDT das Fontes dos Motores dos Estudos

Carga Analisada	V_{RN} (V)	V_{SN} (V)	V_{TN} (V)	FDT (%)
Motor do Elevador de Caçambas	252,30	255,60	262,00	1,11
Motor do Ventilador Ar Exaustor	252,70	256,00	262,50	1,12

$$FDT (\%) = \frac{V_{neg}}{V_{pos}} \times 100 \quad (81)$$

Estes desequilíbrios provocaram significativos aumentos nas perdas das máquinas analisadas, conforme demonstrado na Tabela 39.

Tabela 39 – Aumento das Perdas dos Motores

Motor do Elevador de Caçambas								
Totais	Perdas - Equilibrado	(W)	1719,61	1014,65	1492,87	1814,12	3306,98	6041,25
	Perdas - Desequilibrado	(W)	1721,59	2707,86	1493,05	1814,35	3307,40	7736,86
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,12%	166,88%	0,01%	0,01%	0,01%	28,07%
-			P_{R1} (R)	P_{ROTOR} (R)	P_H (R)	P_F (R)	P_N (R)	P_T (R)
Motor do Ventilador Ar Exaustor								
Totais	Perdas - Equilibrado	(W)	4496,08	2621,25	3101,45	3768,86	6870,31	13987,64
	Perdas - Desequilibrado	(W)	4499,85	6993,15	3101,85	3769,34	6871,19	18364,19
	Acréscimo de Perdas	(%)	0,08%	166,79%	0,01%	0,01%	0,01%	31,29%
-			P_{R1} (R)	P_{ROTOR} (R)	P_H (R)	P_F (R)	P_N (R)	P_T (R)

Os resultados apresentados na Tabela 39 foram obtidos através da análise dos circuitos apresentados na Figura 37 e Figura 38.

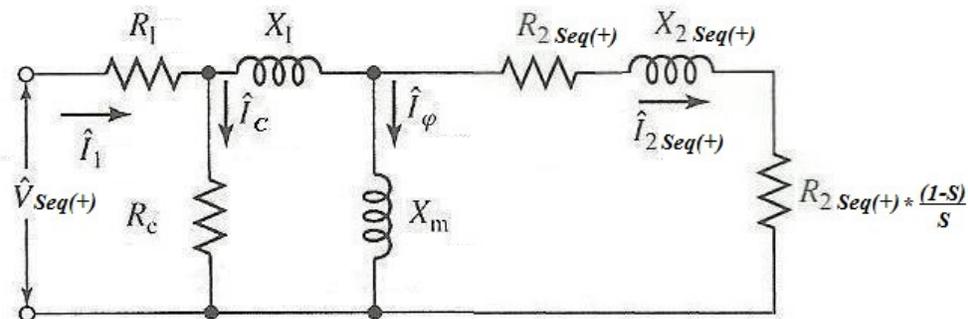


Figura 37 – Modelo do Circuito do Motor de Indução para Sequência Positiva

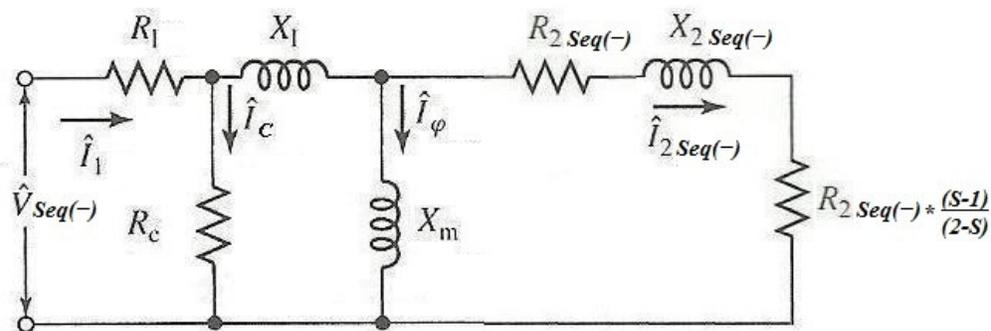


Figura 38 – Modelo do Circuito do Motor de Indução para Sequência Negativa

Os aumentos de 28,07% e 31,29% nas perdas representam respectivamente 1.695,61W e 4.376,55W, refletindo respectivamente 2,26% e 1,99% da potência de ponta de eixo do motor, ou seja, redução destes percentuais na potência de saída. Esta conclusão é muito coerente com os fatores de *derating* recomendados pela norma NEMA, conforme gráfico apresentado na Figura 39, considerando os FDTs da Tabela 38.

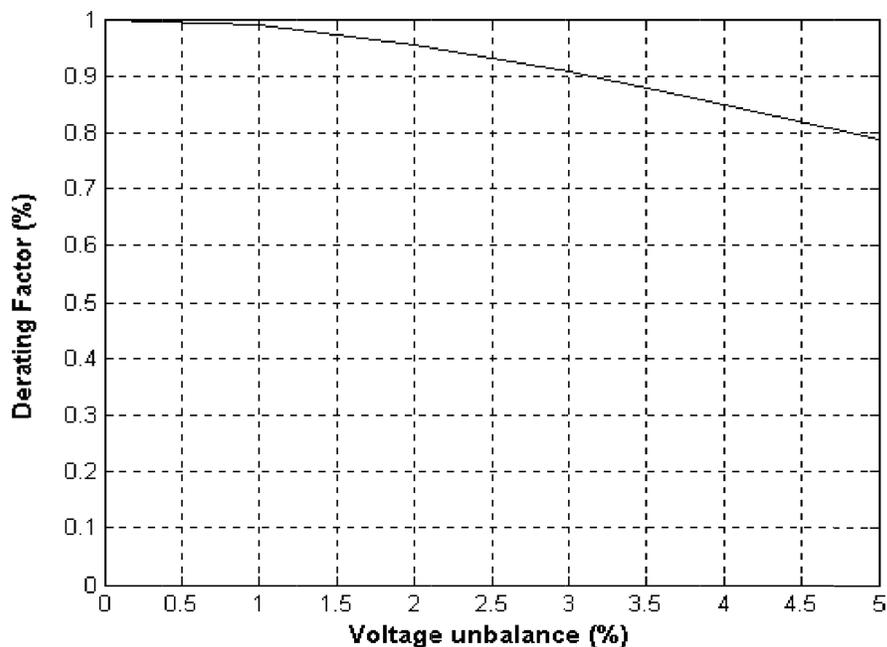


Figura 39 – Curva de *Derating* de Motores de Indução

Fonte: Norma NEMA

Prosseguindo com as análises financeiras do impacto dos problemas de qualidade de energia, a seguir são apresentados os cálculos para as novas perdas inseridas devido ao desequilíbrio de tensão.

Assim, na Tabela 40 são apresentados os valores utilizados nos cálculos e a premissas utilizadas para sua obtenção.

Tabela 40 – Valores Utilizados nos Cálculos de Ganhos e suas Premissas – Cenário 4

Sigla	Descrição	Valor	Premissa
$R\$/kWh$	Valor do kWh	R\$ 0,10	Valor próximo do cobrado pela concessionária para remunerar o consumo de energia da indústria analisada
h_{TA}	Horas trabalhadas anualmente	8760 horas	Todas as horas para um ano padrão de 365 dias
h_{PA}	Horas paradas anualmente	≈938 horas	Considerado que durante 6 dias por semana, o sistema para 3 horas / dia para desligamento no horário de pico
<i>Juros</i>	Valor do dinheiro	12% a.a.	Juros atualmente pagos para aplicações de maior volume (Dez/2011)

Sigla	Descrição	Valor	Premissa
P_T	Perdas Totais Consequentes dos Desequilíbrios de Tensão Medidos	6,07kW	Valores calculados a partir das distorções medidas na barra das cargas analisadas. A Tabela 39 apresenta os resultados e a Tabela 38 os valores de entrada. Obs.: 6,07kW = 1.695,61+4.376,55
PB	Payback simples	2 anos	Tempo de payback aceito por grande parte das empresas para investimento em soluções

Considerando os dados apresentados na Tabela 40 os cálculos e resultados deste estudo de caso estão apresentados nas equações (82) a análise financeira da Figura 40.

$$G_A = P_T \times h_A \times R\$/kWh = 6,07 \times (8760 - 938) \times 0,10 \cong R\$4.747,95 \quad (82)$$

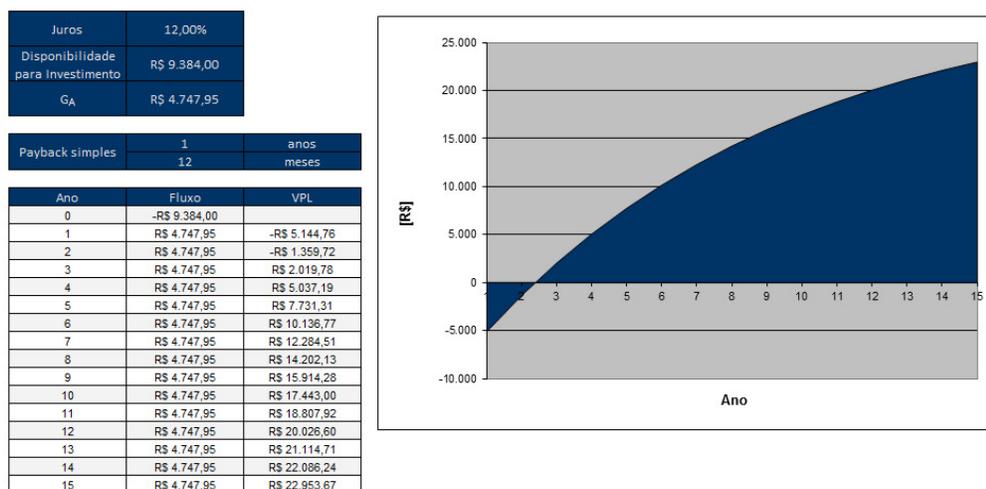


Figura 40 – Análise Financeira do Estudo de Caso - Cenário 4
Fonte: Planilha Desenvolvida pelo Consultor Andreas Hahn

Este cenário demonstra através dos resultados da análise financeira apresentada na Figura 40, que é possível investir o valor de R\$9.384,00, considerando as condições de entrada da Tabela 40. Comparando com os valores

apresentados nos estudos dos cenários, este é o caso que apresenta o maior retorno financeiro, porém, também é o que demanda maiores investimentos para mitigar o problema, pois a origem do desequilíbrio de tensão geralmente é a inserção de cargas desequilibradas no sistema, ou seja, um problema difícil de corrigir depois de estabelecido.

7. CONCLUSÃO

Os modelos adaptados que foram apresentados neste trabalho precisam ser devidamente validados, através de novas referências, de pesquisas teóricas mais profundas, de eventuais readequações, de testes laboratoriais e de novos estudos de caso.

Os estudos de caso precisam estar devidamente orientados às necessidades de confirmação do projeto. A disponibilidade para análise em campo mostrou-se insuficiente, sendo necessárias novas visitas para possibilitar aquisição de uma melhor massa de dados para comparação e confirmações.

Considerando o atual custo da energia e do dinheiro no Brasil, existem fortes indicativos que pequenas distorções na tensão não proporcionam ganhos que justifiquem o investimento em ações mitigadoras. Porém, existem boas possibilidades de ganhos caso o valor da energia aumente substancialmente, o custo do dinheiro reduza (fator menos impactante) ou as distorções alcancem valores próximos aos simulados no cenário do item 6.5.2.

Do ponto de vista de perdas, os desequilíbrios de tensão tendem a provocar um impacto financeiro maior que as distorções harmônicas de tensão, como pode ser inicialmente identificado no item 6.5.4.

São necessários estudos de casos onde a influência das distorções harmônicas de corrente impacta no aumento das perdas, como por exemplo, cabos, transformadores e indutores. Sob estas condições, as perdas provocadas por estes componentes poderão apresentar-se mais prejudiciais financeiramente que os cenários estudados neste trabalho.

As conclusões acima indicam a necessidade de novos estudos no sentido de confirmação dos modelos e mapeamento de condições que justifiquem investimentos na mitigação das harmônicas.

REFERÊNCIAS

[ARR 03] ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. Power System Harmonics. Chichester, England. John Wiley & Sons Ltd, 2003. Cap. 1, Pág.1-15, Cap. 2, Pág.17-59, Cap. 4, Pág.143-189 e Cap. 5, Pág.193-218.

[CIG 81] CIGRE Working Group 36-05 (Disturbing Loads). Harmonic characteristic parameters, method of study, estimating of existing values in network. Electra 77, 1981. Pág. 35-54.

[FIT 06] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas. Porto Alegre, Brasil. Bookman, 2006. Cap. 2, Pág.69-118, Cap. 5, Pág.245-258, Cap. 6, Pág.295-342.

[IEE 04] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 112-2004 - IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2004.

[IEE 93] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.

[IEE 97] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 399-1997 - IEEE Recommended Practices for Industrial and Commercial Power System Analysis. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998. Cap. 10, Pág.265-312.

[LIP 96] LIPO, T. A.; Introduction to AC Machine Design. Madison, USA. University of Wisconsin, 1996. Cap. 5, Pág.244-252.

[MOR 00] MOREIRA, Heloi José Fernandes. Guia Operacional de Motores Elétricos. Rio de Janeiro, Brasil. Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras). Cap. 5, Pág. 61-64.

[MOR 01] MORENO, Hilton. Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, Efeitos e Soluções. São Paulo, Brasil. Instituto Brasileiro do Cobre (Procobre). Cap. 1, Pág.1-15.

[NIL 09] NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. Circuitos Eléctricos. São Paulo, Brasil. Pearson Prentice Hall, 2009. Cap. 3, Pág.90.

[NOV 82] NOVOTNY, D. W.; SCHMITZ, N. L.; JIAN, T. W. Characteristic Induction Motor Slip Values for Variable Part Load Performance Optimization. Article Presented at the IEEE PES 1982 Winter Meeting. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1982.

[SLE 92] SLEMON, Gordon R. Electric Machines and Drives. Boston, USA. Addison-Wesley Publishing Company, 1992. Cap. 1, Pág.31-34.

[SIE 09] Siemens AG. Three-phase Induction Motors – Order No. E86060-K5584-A111-A1-7600. Nürnberg, Germany. Siemens AG, 2009. Cap. 2, Pág.10.

[SIE 10] Siemens. Motores Trifásicos de Baixa Tensão – Catálogo Mod. I DT SDM/2389-CA. São Paulo, Brasil. Siemens Ltda, 2010. Cap. 7, Pág.9.

[WEG 06] WEG Motores. Motores Eléctricos – Linha de Produtos, Características, Especificações, Instalações, Manutenções – Catálogo Mod. 050.04/112006. Santa Catarina, Brasil. WEG Motores, 2006. Cap. 2, Pág.B3-B4.

ANEXOS

ANEXO A - DADOS PARA CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO DA FIGURA 8

Material:		Aço Silício 3%			
Espessura:		in	mm		
		0,0250	0,6350		
Tipo de perda		Perda por Corrente de Foucault			
		Pico da Densidade de Fluxo Magnético		Perdas no Núcleo	
Kilolines/in ²	Weber/m ²	Gauss lines/cm ²	Tesla/cm ²	Watts/in ³	Watts/cm ³
65,00	1,0074	10075,00	1,0075	0,1258	0,0077
70,00	1,0849	10850,00	1,0850	0,1387	0,0085
75,00	1,1624	11625,00	1,1625	0,1613	0,0098
80,00	1,2399	12400,00	1,2400	0,1839	0,0112
90,00	1,3949	13950,00	1,3950	0,2355	0,0144
100,00	1,5499	15500,00	1,5500	0,3065	0,0187
110,00	1,7049	17050,00	1,7050	0,3613	0,0220
120,00	1,8599	18600,00	1,8600	0,4065	0,0248
Tipo de perda		Perda por Histerese			
		Pico da Densidade de Fluxo Magnético		Perdas no Núcleo	
Kilolines/in ²	Weber/m ²	Gauss lines/cm ²	Tesla/cm ²	Watts/in ³	Watts/cm ³
65,00	1,0074	10075,00	1,0075	0,1000	0,0061
70,00	1,0849	10850,00	1,0850	0,1194	0,0073
75,00	1,1624	11625,00	1,1625	0,1355	0,0083
80,00	1,2399	12400,00	1,2400	0,1581	0,0096
90,00	1,3949	13950,00	1,3950	0,2000	0,0122
100,00	1,5499	15500,00	1,5500	0,2387	0,0146
110,00	1,7049	17050,00	1,7050	0,2871	0,0175
120,00	1,8599	18600,00	1,8600	0,3290	0,0201
Tipo de perda		Perdas Totais			
		Pico da Densidade de Fluxo Magnético		Perdas no Núcleo	
Kilolines/in ²	Weber/m ²	Gauss lines/cm ²	Tesla/cm ²	Watts/in ³	Watts/cm ³
65,00	1,0074	10075,00	1,0075	0,2258	0,0138
70,00	1,0849	10850,00	1,0850	0,2581	0,0157
75,00	1,1624	11625,00	1,1625	0,2968	0,0181
80,00	1,2399	12400,00	1,2400	0,3419	0,0209
90,00	1,3949	13950,00	1,3950	0,4355	0,0266
100,00	1,5499	15500,00	1,5500	0,5452	0,0333
110,00	1,7049	17050,00	1,7050	0,6484	0,0396
120,00	1,8599	18600,00	1,8600	0,7355	0,0449

Relação entre as perdas Histerese e Corrente de Foucault					
Weber/m ²	Histerese		Corrente de Foucault		Total Watts/cm ³
	Watts/cm ³	(%) do Total	Watts/cm ³	(%) do Total	
1,0074	0,0061	44,29%	0,0077	55,71%	0,0138
1,0849	0,0073	46,25%	0,0085	53,75%	0,0157
1,1624	0,0083	45,65%	0,0098	54,35%	0,0181
1,2399	0,0096	46,23%	0,0112	53,77%	0,0209
1,3949	0,0122	45,93%	0,0144	54,07%	0,0266
1,5499	0,0146	43,79%	0,0187	56,21%	0,0333
1,7049	0,0175	44,28%	0,0220	55,72%	0,0396
1,8599	0,0201	44,74%	0,0248	55,26%	0,0449
Média	-	45,14%	-	54,86%	-

(Base [LIP 96], Cap. 5, Pág.252)

ANEXO B – CÓDIGO MATLAB PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE MOTORES DE INDUÇÃO

```

%-----
% Simulacao de motores de inducao
% Curvas caracteristicas de operacao
%
% Braz J. Cardoso Filho, PhD

% -----
% inicializacao

clear
j = sqrt(-1);

% -----
% definicao de parametros do motor
% representacao [pu] do motor

Pnom = 1;
Vlnom = 1;
Wenom = 1;
swenom = 0.0111;

r1pu = XX; % "entrar com valor no lugar do XX"
xL1pu = XX; % "entrar com valor no lugar do XX"
rmpu = XX; % "entrar com valor no lugar do XX"
xmpu = XX; % "entrar com valor no lugar do XX"
xL2pu = XX; % "entrar com valor no lugar do XX"
r2pu = XX; % "entrar com valor no lugar do XX"

% -----
% Caracteristica Caracteristicaa W vs. md para we constante

v1 = 1;
swe = 1:-0.001:0;
we = 1;
zm = j*xmpu*(r2pu./swe+j*xL2pu)./(r2pu./swe+j*(xmpu+xL2pu));
zx = zm+j*xL1pu;
z1 = r1pu+rmpu*zx./(rmpu+zx);
i1 = v1./z1;
vx = v1-r1pu.*i1;
zx = j*xL1pu+zm;
ilx = vx./zx;
vm = vx-j*xL1pu*ilx;
i2 = -vm./(r2pu./swe+j*xL2pu);

md(1,:) = abs(i2).*abs(i2)*we*r2pu./swe;
Pout(1,:) = abs(i2).*abs(i2).*(1-swe)*r2pu./swe;
ilout(1,:) = abs(i1);
i2out(1,:) = abs(i2);

```

```

pfout(1,:) = cos(angle(i1));
w(1,:)    = 1-swe;
perdas    = abs(i1).*abs(i1)*r1pu+abs(i2).*abs(i2)*r2pu+...
           abs(vx).*abs(vx)/rmpu;
rend      = Pout./(abs(v1)*real(i1));

% Graficos de saida

figure(1)
clf
plot(md(1,:),w(1:,:), 'b')
title ('Velocidade VS Conjugado')
grid
ylabel('Velocidade [pu]')
xlabel('Conjugado [pu]')

figure(2)
clf
plot(swe,Pout(1,:), 'b')
title ('Potência VS Escorregamento')
grid
ylabel('Potência [pu]')
xlabel('Escorregamento [pu]')

figure(3)
clf
plot(swe,ilout(1,:), 'b')
title ('Corrente de Estator VS Escorregamento')
grid
ylabel('Corrente de Estator [pu]')
xlabel('Escorregamento [pu]')

figure(4)
clf
plot(swe,md(1,:), 'b')
title ('Conjugado VS Escorregamento')
grid
ylabel('Conjugado [pu]')
xlabel('Escorregamento [pu]')

figure(5)
clf
plot(swe,pfout(1,:), 'b')
title ('Fator de Potência VS Escorregamento')
grid
ylabel('Fator de Potência [pu]')
xlabel('Escorregamento [pu]')

figure(6)
clf
plot(swe,i2out(1,:), 'b')
title ('Corrente de Rotor VS Escorregamento')
grid

```

```
ylabel('Corrente de Rotor [pu]')
xlabel('Escorregamento [pu]')

figure(7)
clf
plot(swe,rend(1,:), 'b')
title ('Rendimento VS Escorregamento')
grid
ylabel('Rendimento [pu]')
xlabel('Escorregamento [pu]')
```

```
% -----
```

ANEXO C – VALORES DO CIRCUITO DA FIGURA 24 – PLANILHA DE CÁLCULOS

Elevador de Caçambas																				
Equação	(8)	(33)	(9)	(34)	(10)	V _{wh} (V)		I ₁ (R) (A)		I ₂ (R) (A)		I ₀ (R) (A)		P ₂₁ (R) (W)	P ₂₀ (R) (W)	P ₁ (R) (W)	P ₀ (R) (W)	P ₁ (R) (W)		
Grandeza	R1 (Ω)	R2 (Ω)	RC (Ω)	X1 (Ω)	X2 (Ω)	Xm (Ω)	Módulo	Âng (°)												
(h) ↓																				
1	0,0323	0,0258	58,08	0,224576j	0,224576j	4,77546666666667j	252,30	0,00	131,03	-32,86	112,53	-11,47	4,28	0,53	554,02	326,90	480,97	584,47	1065,44	1946,37
2	0,0414	0,0688	77,16	0,449152j	0,44241472j	9,55093333333333j	0,2523	115,00	0,2873	32,46	0,2743	32,21	0,0033	117,69	0,0034	0,0052	0,0002	0,0006	0,0008	0,0094
3	0,0490	0,0774	85,47	0,673728j	0,66699072j	14,3264j	2,2707	-130,00	1,7250	146,09	1,6466	145,51	0,0265	-127,87	0,1459	0,2100	0,0130	0,0473	0,0603	0,4162
4	0,0581	0,0860	90,33	0,898304j	0,89156672j	19,1018666666667j	0,2523	-44,00	0,1438	-128,43	0,1372	-129,29	0,0028	-42,11	0,0012	0,0016	0,0001	0,0006	0,0007	0,0035
5	0,0683	0,0731	93,52	1,12288j	1,10940544j	23,8773333333333j	7,0644	90,00	3,2304	4,88	3,0839	3,71	0,0754	91,79	0,7132	0,6956	0,0754	0,4582	0,5336	1,9424
6	0,0797	0,0774	93,52	1,347456j	1,33398144j	28,6528j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0920	0,0817	97,45	1,572032j	1,55855744j	33,4282666666667j	2,5230	77,00	0,8232	-8,09	0,7855	-9,75	0,0258	78,72	0,0624	0,0504	0,0069	0,0584	0,0653	0,1781
8	0,1053	0,0746	98,75	1,796608j	1,77639616j	38,2037333333333j	1,2615	-92,00	0,3607	-177,14	0,3442	-179,05	0,0127	-90,28	0,0137	0,0088	0,0015	0,0146	0,0161	0,0386
9	0,1194	0,0774	99,79	2,021184j	2,00097216j	42,9792j	0,5046	21,00	0,1282	-63,98	0,1223	-66,14	0,0050	22,73	0,0020	0,0012	0,0002	0,0023	0,0026	0,0057
10	0,1343	0,0803	100,63	2,24576j	2,22554816j	47,7546666666667j	1,0092	117,00	0,2306	32,20	0,2200	29,81	0,0100	118,76	0,0071	0,0039	0,0008	0,0094	0,0101	0,0212
11	0,1500	0,0753	101,33	2,470336j	2,44338688j	52,5301333333333j	9,3351	-119,00	1,9413	156,32	1,8517	153,68	0,0919	-117,22	0,5652	0,2581	0,0599	0,8001	0,8600	1,6834
12	0,1664	0,0774	101,92	2,694912j	2,66796288j	57,3056j	0,7569	170,00	0,1442	85,53	0,1375	82,66	0,0074	171,81	0,0035	0,0015	0,0004	0,0053	0,0056	0,0105
13	0,1835	0,0796	102,43	2,919488j	2,89253888j	62,0810666666667j	5,2983	38,00	0,9317	-46,25	0,8883	-49,35	0,0516	39,84	0,1593	0,0628	0,0163	0,2578	0,2741	0,4962
14	0,2013	0,0757	102,86	3,144064j	3,1103776j	66,8565333333333j	2,7753	-57,00	0,4535	-141,07	0,4323	-144,41	0,0269	-55,12	0,0414	0,0142	0,0042	0,0707	0,0749	0,1304
15	0,2197	0,0774	102,86	3,36864j	3,3349536j	71,632j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
16	0,2388	0,0792	103,58	3,593216j	3,5595296j	76,4074666666667j	0,5046	150,00	0,0721	66,40	0,0687	62,60	0,0049	151,95	0,0012	0,0004	0,0001	0,0023	0,0025	0,0041
17	0,2584	0,0760	103,88	3,817792j	3,77736832j	81,1829333333333j	3,5322	-106,00	0,4755	170,61	0,4529	166,57	0,0339	-104,01	0,0584	0,0156	0,0055	0,1146	0,1201	0,1941
18	0,2787	0,0774	103,88	4,042368j	4,00194432j	85,9584j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19	0,2995	0,0789	104,39	4,266944j	4,22652032j	90,7338666666667j	0,2523	-138,00	0,0304	139,10	0,0289	134,60	0,0024	-135,94	0,0003	0,0001	0,0000	0,0006	0,0006	0,0010
20	0,3209	0,0762	104,61	4,49152j	4,44435904j	95,5093333333333j	0,5046	68,00	0,0578	-14,68	0,0550	-19,40	0,0048	70,10	0,0011	0,0002	0,0001	0,0023	0,0024	0,0037
21	0,3428	0,0774	104,61	4,716096j	4,66893504j	100,2848j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
22	0,3652	0,0787	104,61	4,940672j	4,89351104j	105,0602666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
23	0,3882	0,0764	105,15	5,165248j	5,11134976j	109,835733333333j	0,2523	45,00	0,0251	-36,94	0,0239	-42,36	0,0024	47,20	0,0002	0,0000	0,0000	0,0006	0,0006	0,0009
24	0,4116	0,0774	105,15	5,389824j	5,33592576j	114,6112j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	0,4356	0,0785	105,44	5,6144j	5,56050176j	119,3866666666667j	0,2523	-13,00	0,0231	-94,44	0,0219	-100,32	0,0024	-10,73	0,0002	0,0000	0,0000	0,0006	0,0006	0,0009
26	0,4600	0,0765	105,57	5,838976j	5,77834048j	124,162133333333j	0,2523	-125,00	0,0222	153,80	0,0211	147,69	0,0024	-122,69	0,0002	0,0000	0,0000	0,0006	0,0006	0,0009
27	0,4850	0,0774	105,57	6,063552j	6,00291648j	128,9376j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
28	0,5103	0,0784	105,57	6,288128j	6,22749248j	133,7130666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	0,5362	0,0766	105,57	6,512704j	6,4453312j	138,488533333333j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
30	0,5625	0,0774	105,57	6,73728j	6,6699072j	143,264j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
31	0,5892	0,0783	105,57	6,961856j	6,8944832j	148,0394666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
32	0,6164	0,0767	105,57	7,186432j	7,11232192j	152,814933333333j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
33	0,6439	0,0774	105,57	7,411008j	7,33689792j	157,5904j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
34	0,6720	0,0782	105,57	7,635584j	7,56147392j	162,3658666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
35	0,7004	0,0767	105,57	7,86016j	7,77931264j	167,141333333333j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
36	0,7292	0,0774	105,57	8,084736j	8,00388864j	171,9168j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
37	0,7585	0,0782	105,57	8,309312j	8,22846464j	176,6922666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
38	0,7881	0,0768	105,57	8,533888j	8,44630336j	181,467733333333j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
39	0,8181	0,0774	105,57	8,758464j	8,67087936j	186,2432j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
40	0,8486	0,0781	105,57	8,98304j	8,89545536j	191,0186666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
41	0,8794	0,0768	105,57	9,207616j	9,11329408j	195,794133333333j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
42	0,9105	0,0774	105,57	9,432192j	9,33787008j	200,5696j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
43	0,9421	0,0781	105,57	9,656768j	9,56244608j	205,3450666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
44	0,9740	0,0769	105,57	9,881344j	9,7802848j	210,120533333333j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
45	1,0063	0,0774	105,57	10,10592j	10,0048608j	214,896j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
46	1,0389	0,0780	105,57	10,330496j	10,2294368j	219,6714666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
47	1,0719	0,0769	105,57	10,555072j	10,44727552j	224,446933333333j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
48	1,1053	0,0774	105,57	10,779648j	10,67185152j	229,2224j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
49	1,1390	0,0780	105,57	11,004224j	10,89642752j	233,9978666666667j	0,0000	0,0000	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
50	1,1731	0,0769	105,57	11,2288j	11,11426624j	238,773333333333j	0,0000	0,0000</												

Elevador de Caçambas																				
Equação →	(8)	(33)	-	(9)	(34)	(10)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(3)	(30)	(31)	(11)	
Grandeza →	R1 (Ω)	R2 (Ω)	RC (Ω)	X1 (Ω)	X2 (Ω)	Xm (Ω)	V _{0N} (V)		I ₁ (S)		I ₂ (S)		I _c (S)		P ₀₁ (S)	P _{02TOR} (W)	P ₀₃ (W)	P ₀₄ (S)	P ₀₅ (W)	
(h) ↓							Módulo	Âng (°)	Módulo	Âng (°)	Módulo	Âng (°)	Módulo	Âng (°)						
1	0,0323	0,0258	58,08	0,224576j	0,224576j	4,77546666666667j	255,60	-120,00	132,75	-152,86	114,01	-131,47	4,34	-119,47	568,61	335,51	493,64	599,86	1093,50	1997,62
2	0,0414	0,0688	77,16	0,449152j	0,44241472j	9,55093333333333j	0,5112	5,00	0,5820	-77,54	0,5558	-77,79	0,0066	7,69	0,0140	0,0213	0,0010	0,0024	0,0034	0,0387
3	0,0490	0,0774	85,47	0,673728j	0,66699072j	14,3264j	2,5560	-229,00	1,9417	47,09	1,8535	46,51	0,0298	133,13	0,1849	0,2661	0,0165	0,0600	0,0764	0,5274
4	0,0581	0,0860	85,47	0,898304j	0,89156672j	19,1018666666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0683	0,0731	93,52	1,12288j	1,10940544j	23,8773333333333j	4,8564	-14,00	2,2207	-99,12	2,1200	-100,29	0,0518	-12,21	0,3370	0,3287	0,0356	0,2166	0,2522	0,9180
6	0,0797	0,0774	93,52	1,347456j	1,33398144j	28,6528j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0920	0,0817	97,45	1,572032j	1,55855744j	33,4282666666667j	2,3004	-110,00	0,7506	164,91	0,7162	163,25	0,0236	-108,28	0,0518	0,0419	0,0057	0,0486	0,0543	0,1481
8	0,1053	0,0746	98,75	1,796608j	1,77639616j	38,2037333333333j	0,7668	-190,00	0,2192	84,86	0,2092	82,95	0,0077	171,72	0,0051	0,0033	0,0006	0,0054	0,0060	0,0143
9	0,1194	0,0774	99,79	2,021184j	2,00097216j	42,9792j	0,5112	23,00	0,1299	-61,98	0,1239	-64,14	0,0051	24,73	0,0020	0,0012	0,0002	0,0024	0,0026	0,0058
10	0,1343	0,0803	100,63	2,24576j	2,22554816j	47,7546666666667j	0,5112	12,00	0,1168	-72,80	0,1114	-75,19	0,0051	13,76	0,0018	0,0010	0,0002	0,0024	0,0026	0,0054
11	0,1500	0,0753	101,33	2,470336j	2,44338688j	52,5301333333333j	7,6680	-192,00	1,5946	83,32	1,5210	80,68	0,0755	169,78	0,3814	0,1742	0,0404	0,5399	0,5803	1,1358
12	0,1664	0,0774	101,92	2,694912j	2,66796288j	57,3056j	0,5112	-238,00	0,0974	37,53	0,0929	34,66	0,0050	123,81	0,0016	0,0007	0,0002	0,0024	0,0026	0,0048
13	0,1835	0,0796	102,43	2,919488j	2,89253888j	62,0810666666667j	7,6680	-50,00	1,3485	-134,25	1,2855	-137,35	0,0747	-48,16	0,3337	0,1315	0,0342	0,5399	0,5741	1,0393
14	0,2013	0,0757	102,86	3,144064j	3,1103776j	66,8565333333333j	1,7892	-123,00	0,2924	152,93	0,2787	149,59	0,0173	-121,12	0,0172	0,0059	0,0017	0,0294	0,0311	0,0542
15	0,2197	0,0774	103,25	3,36864j	3,3349536j	71,632j	0,2556	-203,00	0,0390	73,16	0,0371	69,59	0,0025	158,91	0,0003	0,0001	0,0000	0,0006	0,0006	0,0011
16	0,2388	0,0792	103,58	3,593216j	3,5595296j	76,4074666666667j	0,5112	23,00	0,0731	-60,60	0,0696	-64,40	0,0049	24,95	0,0013	0,0004	0,0001	0,0024	0,0025	0,0042
17	0,2584	0,0760	103,88	3,817792j	3,7736832j	81,1829333333333j	1,7892	-180,00	0,2408	96,61	0,2294	92,57	0,0172	-178,01	0,0150	0,0040	0,0014	0,0294	0,0308	0,0498
18	0,2787	0,0774	103,88	4,042368j	4,00194432j	85,9584j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
19	0,2995	0,0789	104,39	4,266944j	4,22652032j	90,7338666666667j	1,0224	23,00	0,1231	-59,90	0,1172	-64,40	0,0098	25,06	0,0045	0,0011	0,0004	0,0096	0,0100	0,0156
20	0,3209	0,0762	104,61	4,49152j	4,44435904j	95,5093333333333j	0,2556	24,00	0,0293	-58,68	0,0278	-63,40	0,0024	26,10	0,0003	0,0001	0,0000	0,0006	0,0006	0,0010
21	0,3428	0,0774	104,80	4,716096j	4,6689504j	100,2848j	0,2556	-126,00	0,0279	151,57	0,0265	146,62	0,0024	-123,87	0,0003	0,0001	0,0000	0,0006	0,0006	0,0009
22	0,3652	0,0787	104,80	4,940672j	4,89351104j	105,060266666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
23	0,3882	0,0764	105,15	5,165248j	5,11134976j	109,835733333333j	0,5112	48,00	0,0509	-33,94	0,0484	-39,36	0,0048	50,20	0,0010	0,0002	0,0001	0,0024	0,0025	0,0037
24	0,4116	0,0774	105,15	5,389824j	5,33592576j	114,6112j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	0,4356	0,0785	105,15	5,6144j	5,56050176j	119,386666666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
26	0,4600	0,0765	105,15	5,838976j	5,77834048j	124,162133333333j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27	0,4850	0,0774	105,15	6,063552j	6,00291648j	128,9376j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
28	0,5103	0,0784	105,15	6,288128j	6,22749248j	133,713066666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	0,5362	0,0766	105,91	6,512704j	6,4453312j	138,488533333333j	0,2556	-160,00	0,0202	119,54	0,0192	112,76	0,0024	-157,59	0,0002	0,0000	0,0000	0,0006	0,0006	0,0009
30	0,5625	0,0774	105,91	6,73728j	6,6699072j	143,264j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
31	0,5892	0,0783	105,91	6,961856j	6,8944832j	148,039466666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
32	0,6164	0,0767	105,91	7,186432j	7,11232192j	152,814933333333j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
33	0,6439	0,0774	105,91	7,411008j	7,33689792j	157,5904j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
34	0,6720	0,0782	105,91	7,635584j	7,56147392j	162,365866666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
35	0,7004	0,0767	105,91	7,86016j	7,77931264j	167,141333333333j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
36	0,7292	0,0774	105,91	8,084736j	8,00388864j	171,9168j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
37	0,7585	0,0782	105,91	8,309312j	8,22846464j	176,692266666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
38	0,7881	0,0768	105,91	8,533888j	8,44630336j	181,467733333333j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
39	0,8181	0,0774	105,91	8,758464j	8,67087936j	186,2432j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
40	0,8486	0,0781	105,91	8,98304j	8,89545536j	191,018666666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
41	0,8794	0,0768	105,91	9,207616j	9,11329408j	195,794133333333j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
42	0,9105	0,0774	105,91	9,432192j	9,33787008j	200,5696j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
43	0,9421	0,0781	105,91	9,656768j	9,56244608j	205,345066666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
44	0,9740	0,0769	105,91	9,881344j	9,7802848j	210,120533333333j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
45	1,0063	0,0774	105,91	10,10592j	10,0048608j	214,896j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
46	1,0389	0,0780	105,91	10,330496j	10,2294368j	219,671466666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
47	1,0719	0,0769	105,91	10,555072j	10,44727552j	224,446933333333j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
48	1,1053	0,0774	105,91	10,779648j	10,67185152j	229,2224j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
49	1,1390	0,0780	105,91	11,004224j	10,89642752j	233,997866666667j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
50	1,1731	0,0769	105,91	11,2288j	11,11426624j	238,773333333333j	0,0000	-120,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,000			

Elevador de Caçambas																				
Equação →	(8)	(33)	-	(9)	(34)	(10)	-	-	-	-	-	-	-	(3)	(30)	(31)	(11)	-		
Grandeza →	R1 (Ω)	R2 (Ω)	RC (Ω)	X1 (Ω)	X2 (Ω)	Xm (Ω)	V _{ch} (V)	I ₁ (T) (A)	I ₂ (T) (A)	I ₀ (T) (A)	P ₀₁ (T) (W)	P _{ch} (T) (W)	P ₁ (T) (W)	P ₂ (T) (W)	P ₃ (T) (W)	P ₄ (T) (W)	P ₅ (T) (W)			
(h) ↓							Módulo	Âng (°)	Módulo	Âng (°)	Módulo	Âng (°)	Módulo	Âng (°)						
1	0,0323	0,0258	58,08	0,224576j	0,224576j	4,77546666666667j	262,00	-240,00	136,07	87,14	116,86	108,53	4,45	120,53	597,44	352,52	518,67	630,28	1148,94	2098,91
2	0,0414	0,0688	77,16	0,449152j	0,44241472j	9,55093333333333j	0,2620	-99,00	0,2983	178,46	0,2848	178,21	0,0034	-96,31	0,0037	0,0056	0,0003	0,0006	0,0009	0,0102
3	0,0490	0,0774	85,47	0,673728j	0,66699072j	14,3264j	3,1440	-373,00	2,3884	-96,91	2,2799	-97,49	0,0367	-10,87	0,2797	0,4025	0,0249	0,0908	0,1157	0,7979
4	0,0581	0,0860	85,47	0,898304j	0,89156672j	19,1018666666667j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0683	0,0731	93,52	1,12288j	1,10940544j	23,8773333333333j	7,3360	-126,00	3,3546	148,88	3,2025	147,71	0,0783	-124,21	0,7691	0,7501	0,0813	0,4941	0,5755	2,0946
6	0,0797	0,0774	93,52	1,347456j	1,33398144j	28,6528j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	0,0920	0,0817	97,45	1,572032j	1,55855744j	33,4282666666667j	3,1440	-219,00	1,0258	55,91	0,9789	54,25	0,0322	142,72	0,0968	0,0783	0,0107	0,0908	0,1014	0,2766
8	0,1053	0,0746	98,75	1,796608j	1,77639616j	38,2037333333333j	0,7860	-306,00	0,2247	-31,14	0,2145	-33,05	0,0079	55,72	0,0053	0,0034	0,0006	0,0057	0,0063	0,0150
9	0,1194	0,0774	99,79	2,021184j	2,00097216j	42,9792j	0,2620	-365,00	0,0666	-89,98	0,0635	-92,14	0,0026	-3,27	0,0005	0,0003	0,0001	0,0006	0,0007	0,0015
10	0,1343	0,0803	100,63	2,24576j	2,22554816j	47,7546666666667j	0,5240	-86,00	0,1198	-170,80	0,1142	-173,19	0,0052	-84,24	0,0019	0,0010	0,0002	0,0025	0,0027	0,0057
11	0,1500	0,0753	101,33	2,470336j	2,44338688j	52,5301333333333j	6,5500	-341,00	1,3621	-65,68	1,2992	-68,32	0,0645	20,78	0,2783	0,1271	0,0295	0,3939	0,4234	0,8288
12	0,1664	0,0774	101,92	2,694912j	2,66796288j	57,3056j	0,7860	-209,00	0,1498	66,53	0,1428	63,66	0,0077	152,81	0,0037	0,0016	0,0004	0,0057	0,0061	0,0114
13	0,1835	0,0796	102,43	2,919488j	2,89253888j	62,0810666666667j	8,1220	-176,00	1,4283	99,75	1,3616	96,65	0,0791	-174,16	0,3744	0,1476	0,0383	0,6057	0,6440	1,1660
14	0,2013	0,0757	102,86	3,144064j	3,1103776j	66,8565333333333j	1,8340	-271,00	0,2997	4,93	0,2857	1,59	0,0178	90,88	0,0181	0,0062	0,0018	0,0309	0,0327	0,0570
15	0,2197	0,0774	103,25	3,36864j	3,3349536j	71,632j	0,2620	-336,00	0,0400	-59,84	0,0381	-63,41	0,0025	25,91	0,0004	0,0001	0,0000	0,0006	0,0007	0,0011
16	0,2388	0,0792	103,58	3,593216j	3,5595296j	76,4074666666667j	0,2620	-413,00	0,0374	-136,60	0,0357	-140,40	0,0025	-51,05	0,0003	0,0001	0,0000	0,0006	0,0007	0,0011
17	0,2584	0,0760	103,88	3,817792j	3,77736832j	81,1829333333333j	3,4060	-306,00	0,4585	-29,39	0,4367	-33,43	0,0327	55,99	0,0543	0,0145	0,0052	0,1065	0,1117	0,1805
18	0,2787	0,0774	104,15	4,042368j	4,00194432j	85,9584j	0,2620	-169,00	0,0333	107,85	0,0317	103,59	0,0025	-166,98	0,0003	0,0001	0,0000	0,0006	0,0007	0,0010
19	0,2995	0,0789	104,39	4,266944j	4,22652032j	90,7338666666667j	1,0480	-85,00	0,1262	-167,90	0,1201	-172,40	0,0100	-82,94	0,0048	0,0011	0,0004	0,0101	0,0105	0,0164
20	0,3209	0,0762	104,61	4,49152j	4,44435904j	95,5093333333333j	0,2620	-143,00	0,0300	134,32	0,0285	129,60	0,0025	-140,90	0,0003	0,0001	0,0000	0,0006	0,0007	0,0010
21	0,3428	0,0774	104,61	4,716096j	4,66893504j	100,2848j	0,0000	-260,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
22	0,3652	0,0787	104,61	4,940672j	4,89351104j	105,060266666667j	0,0000	-271,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
23	0,3882	0,0764	105,15	5,165248j	5,11134976j	109,835733333333j	0,5240	-141,00	0,0522	137,06	0,0496	131,64	0,0050	-138,80	0,0011	0,0002	0,0001	0,0025	0,0026	0,0039
24	0,4116	0,0774	105,15	5,389824j	5,33592576j	114,6112j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
25	0,4356	0,0785	105,44	5,6144j	5,56050176j	119,386666666667j	0,5240	-291,00	0,0480	-12,44	0,0456	-18,32	0,0049	71,27	0,0010	0,0002	0,0001	0,0025	0,0026	0,0038
26	0,4600	0,0765	105,44	5,838976j	5,77834048j	124,162133333333j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
27	0,4850	0,0774	105,44	6,063552j	6,00291648j	128,9376j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
28	0,5103	0,0784	105,44	6,288128j	6,22749248j	133,713066666667j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	0,5362	0,0766	105,91	6,512704j	6,4453312j	138,488533333333j	0,2620	-240,00	0,0207	39,54	0,0196	32,76	0,0025	122,41	0,0002	0,0000	0,0000	0,0006	0,0006	0,0009
30	0,5625	0,0774	105,91	6,73728j	6,6699072j	143,264j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
31	0,5892	0,0783	106,09	6,961856j	6,8944832j	148,039466666667j	0,2620	-240,00	0,0194	40,05	0,0184	32,81	0,0025	122,48	0,0002	0,0000	0,0000	0,0006	0,0006	0,0009
32	0,6164	0,0767	106,09	7,186432j	7,11232192j	152,814933333333j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
33	0,6439	0,0774	106,09	7,411008j	7,33689792j	157,5904j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
34	0,6720	0,0782	106,09	7,635584j	7,56147392j	162,365866666667j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
35	0,7004	0,0767	106,09	7,86016j	7,77931264j	167,141333333333j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
36	0,7292	0,0774	106,09	8,084736j	8,00388864j	171,9168j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
37	0,7585	0,0782	106,09	8,309312j	8,2284464j	176,692266666667j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
38	0,7881	0,0768	106,09	8,533888j	8,44630336j	181,467733333333j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
39	0,8181	0,0774	106,09	8,758464j	8,67087936j	186,2432j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
40	0,8486	0,0781	106,09	8,98304j	8,89545536j	191,018666666667j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
41	0,8794	0,0768	106,09	9,207616j	9,11329408j	195,794133333333j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
42	0,9105	0,0774	106,09	9,432192j	9,33787008j	200,5696j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
43	0,9421	0,0781	106,09	9,656768j	9,56244608j	205,345066666667j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
44	0,9740	0,0769	106,09	9,881344j	9,7802848j	210,120533333333j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
45	1,0063	0,0774	106,09	10,10592j	10,0048608j	214,896j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
46	1,0389	0,0780	106,09	10,330496j	10,2294368j	219,671466666667j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
47	1,0719	0,0769	106,09	10,555072j	10,44727552j	224,446933333333j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
48	1,1053	0,0774	106,09	10,779648j	10,67185152j	229,2224j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
49	1,1390	0,0780	106,09	11,004224j	10,89642752j	233,997866666667j	0,0000	-240,00	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
50	1,1731	0,0769	106,09	11,2288j	11,11426624j	238,773333333333j	0,0000	-240,00	0,0000											

ANEXO E – TABELA COMPARATIVA – VALORES CALCULADOS VS VALORES MEDIDOS NO ESTUDO DE CASO

Elevador de Caçambas																		
h	I ₁ (R)						I ₁ (S)						I ₁ (T)					
	Medido		Calculado		Erro do Medido em Relação ao Calculado (Referência) (%)		Medido		Calculado		Erro do Medido em Relação ao Calculado (Referência) (%)		Medido		Calculado		Erro do Medido em Relação ao Calculado (Referência) (%)	
	RMS	*	RMS	*	RMS	*	RMS	*	RMS	*	RMS	*	RMS	*	RMS	*	RMS	*
1	57,4000	0,00	131,0350	-32,86	56,19%	100,00%	58,1000	0,00	132,7489	-152,86	56,23%	100,00%	55,5000	0,00	136,0728	87,14	59,21%	100,00%
2	0,4018	150,00	0,2873	32,46	-39,88%	-362,09%	0,5810	178,00	0,5820	-77,54	0,18%	329,56%	0,4440	168,00	0,2983	178,46	-48,84%	5,86%
3	0,1148	175,00	1,7250	146,09	93,34%	-19,79%	0,4067	30,00	1,9417	47,09	79,05%	36,30%	0,3885	-97,00	2,3884	-96,91	83,73%	-0,10%
4	0,1722	77,00	0,1438	-128,43	-19,79%	159,96%	0,1162	-2,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
5	3,3866	-93,00	3,2304	4,88	-4,83%	2006,97%	3,4279	-78,00	2,2207	-99,12	-54,36%	21,31%	3,2190	-87,00	3,3546	148,88	4,04%	158,44%
6	0,0000	0,00	0,0000				0,0581	10,00	0,0000				0,0555	-153,00	0,0000			
7	1,0906	-66,00	0,8232	-8,09	-32,48%	-716,04%	0,8715	-71,00	0,7506	164,91	-16,11%	143,05%	0,9990	-114,00	1,0258	55,91	2,61%	303,89%
8	0,4018	-135,00	0,3607	-177,14	-11,40%	23,79%	0,4648	-105,00	0,2192	84,86	-112,01%	223,73%	0,3330	-130,00	0,2247	-31,14	-48,18%	-317,52%
9	0,2870	13,00	0,1282	-63,98	-123,91%	120,32%	0,1162	149,00	0,1299	-61,98	10,52%	340,40%	0,1665	-118,00	0,0666	-89,98	-150,18%	-31,14%
10	0,4018	159,00	0,2306	32,20	-74,22%	-393,75%	0,1162	160,00	0,1168	-72,80	0,54%	319,79%	0,2220	178,00	0,1198	-170,80	-85,39%	204,22%
11	2,9274	-21,00	1,9413	156,32	-50,79%	113,43%	2,7888	15,00	1,5946	83,32	-74,89%	82,00%	2,4420	-15,00	1,3621	-65,68	-79,28%	77,16%
12	0,1722	-46,00	0,1442	85,53	-19,39%	153,78%	0,2324	51,00	0,0974	37,53	-138,57%	-35,89%	0,1110	154,00	0,1498	66,53	25,89%	-131,48%
13	1,7220	-140,00	0,9317	-46,25	-84,82%	-202,71%	1,7430	-89,00	1,3485	-134,25	-29,26%	33,71%	2,0535	-122,00	1,4283	99,75	-43,77%	222,30%
14	0,6314	180,00	0,4535	-141,07	-39,22%	227,59%	0,5810	-123,00	0,2924	152,93	-98,71%	180,43%	0,4995	-167,00	0,2997	4,93	-66,66%	3488,48%
15	0,1148	-42,00	0,0000				0,0581	-158,00	0,0390	73,16	-49,07%	315,96%	0,0555	148,00	0,0400	-59,84	-38,92%	347,34%
16	0,1722	104,00	0,0721	66,40	-138,77%	-56,62%	0,1162	125,00	0,0731	-60,60	-59,04%	306,28%	0,1665	131,00	0,0374	-136,60	-344,63%	195,90%
17	0,5740	-82,00	0,4755	170,61	-20,73%	148,06%	0,5810	-31,00	0,2408	96,61	-141,24%	132,09%	0,4995	-64,00	0,4585	-29,39	-8,95%	-117,76%
18	0,0000	0,00	0,0000				0,0581	53,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0333	107,85	100,00%	100,00%
19	0,1148	-157,00	0,0304	139,10	-277,91%	212,87%	0,1162	-72,00	0,1231	-59,90	5,60%	-20,20%	0,1665	-123,00	0,1262	-167,90	-31,95%	26,74%
20	0,0574	-118,00	0,0578	-14,68	0,61%	-704,03%	0,0581	-62,00	0,0293	-58,68	-98,61%	-5,66%	0,0555	-91,00	0,0300	134,32	-85,09%	167,75%
21	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0279	151,57	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,0000			
22	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
23	0,0574	30,00	0,0251	-36,94	-128,52%	181,21%	0,0581	78,00	0,0509	-33,94	-14,16%	329,79%	0,0555	55,00	0,0522	137,06	-6,39%	59,87%
24	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
25	0,0000	0,00	0,0231	-94,44	100,00%	100,00%	0,0581	108,00	0,0000				0,0555	8,00	0,0480	-12,44	-15,64%	164,32%
26	0,0000	0,00	0,0222	153,80	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
27	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
28	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
29	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0202	119,54	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,0207	39,54	100,00%	100,00%
30	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
31	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0194	40,05	100,00%	100,00%
32	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
33	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
34	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
35	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
36	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
37	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
38	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
39	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
40	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
41	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
42	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
43	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
44	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
45	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
46	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
47	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
48	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
49	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			
50	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000			

Ventilador ar Exaustor																				
h	I ₁ (R)						I ₁ (S)						I ₁ (T)							
	Medido		Calculado		Erro do Medido em Relação ao Calculado (Referência) (%)		Medido		Calculado		Erro do Medido em Relação ao Calculado (Referência) (%)		Medido		Calculado		Erro do Medido em Relação ao Calculado (Referência) (%)			
	RMS	°	RMS	°	RMS	°	RMS	°	RMS	°	RMS	°	RMS	°	RMS	°	RMS	°	RMS	°
1	266,501	0,00	385,041	-35,06	30,79%	100,00	270,301	0,00	390,061	-155,0	30,70%	100,00	271,001	0,00	399,971	84,94	32,25%	100,00		
2	0,7995	0,00	0,7113	20,53	-12,40%	100,00%	1,3515	129,00	0,7206	-78,47	-87,55%	264,38%	1,0840	0,00	0,7389	-172,47	-46,70%	100,00%		
3	0,2665	115,00	4,7393	142,55	94,38%	19,33%	1,0812	18,00	4,8012	43,55	77,48%	58,67%	1,0840	153,00	5,9078	-99,45	81,65%	253,85%		
4	0,0000	-45,00	0,0000				0,5406	-69,00	0,3599	5,19	-50,20%	1428,68%	0,2710	-82,00	0,0000					
5	8,5280	0,00	7,6944	-1,28	-10,83%	100,00%	8,6496	-117,00	5,7740	-103,28	-49,80%	-13,28%	9,2140	-169,00	7,1047	138,72	-29,69%	221,83%		
6	0,0000	-126,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	-129,00	0,0000					
7	2,3985	0,00	1,0165	22,80	-135,96%	100,00%	1,6218	-104,00	0,6179	109,80	-162,49%	194,72%	2,7100	0,00	2,5342	107,80	-6,94%	100,00%		
8	0,5330	1,00	0,7125	173,79	25,19%	99,42%	0,8109	153,00	0,5414	77,79	-49,79%	-96,68%	0,8130	6,00	0,5551	-31,21	-46,46%	119,22%		
9	0,2665	-177,00	0,3165	-77,07	15,80%	-129,67%	0,2703	46,00	0,1603	-79,07	-68,60%	158,18%	0,0000	178,00	0,0000					
10	0,5330	-53,00	0,4271	24,09	-24,79%	320,00%	0,0000	0,00	0,1442	-103,91	100,00%	100,00%	0,5420	0,00	0,4437	-151,91	-22,16%	100,00%		
11	5,0635	101,00	4,0161	143,20	-26,08%	29,47%	4,3248	-95,00	3,0186	83,20	-43,27%	214,18%	4,0650	139,00	4,1718	-80,80	2,56%	272,03%		
12	0,0000	-88,00	0,1187	96,38	100,00%	191,30%	0,2703	-89,00	0,2405	34,38	-12,38%	358,85%	0,5420	-108,00	0,3699	77,38	-46,51%	239,56%		
13	2,6650	0,00	1,7528	-40,43	-52,04%	100,00%	2,9733	150,00	2,8855	-137,43	-3,04%	209,15%	3,5230	86,00	3,4139	101,57	-3,20%	15,33%		
14	0,7995	160,00	0,9162	-147,27	12,74%	208,64%	0,8109	87,00	0,6188	145,73	-31,05%	40,30%	0,8130	160,00	0,8460	-7,27	3,90%	2300,32%		
15	0,0000	107,00	0,0950	-77,07	100,00%	238,83%	0,0000	0,00	0,0962	57,93	100,00%	100,00%	0,0000	88,00	0,0987	-75,07	100,00%	217,22%		
16	0,0000	0,00	0,0890	42,13	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,1804	-68,87	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,1850	-133,87	100,00%	100,00%		
17	1,0660	0,00	1,0900	161,31	2,20%	100,00%	1,0812	152,00	0,5946	91,31	-81,84%	-66,47%	1,0840	0,00	1,0452	-43,69	-3,71%	100,00%		
18	0,0000	-170,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	171,00	0,0000					
19	0,0000	0,00	0,0000				0,2703	128,00	0,2279	-71,28	-18,59%	279,57%	0,0000	0,00	0,3116	179,72	100,00%	100,00%		
20	0,0000	0,00	0,0713	-28,09	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,0722	-61,09	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,0741	110,91	100,00%	100,00%		
21	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
22	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
23	0,0000	0,00	0,1240	-53,48	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,0628	-42,48	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,1932	117,52	100,00%	100,00%		
24	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
25	0,0000	0,00	0,0570	-95,06	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,1185	-34,06	100,00%	100,00%		
26	0,0000	0,00	0,0549	124,14	100,00%	100,00%	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
27	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
28	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
29	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0511	-95,23	100,00%	100,00%		
30	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
31	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0478	107,19	100,00%	100,00%		
32	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
33	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
34	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
35	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
36	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
37	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
38	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
39	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
40	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
41	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
42	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
43	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
44	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
45	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
46	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
47	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
48	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
49	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					
50	0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000				0,0000	0,00	0,0000					

Observação: Havendo interesse sobre o trabalho com objetivo de debater, comentar, obter uma cópia do código matlab, planilhas excel, gráficos, etc, envie uma mensagem para fabiocoutoamorim@yahoo.com.br