

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS ALBERTO SARCINELLI

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE CONEXÃO EM PARALELO DE
CAPACITORES EM CIRCUITOS SECUNDÁRIOS DE BAIXA
TENSÃO**

VITÓRIA
2005

CARLOS ALBERTO SARCINELLI

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE CONEXÃO EM PARALELO DE
CAPACITORES EM CIRCUITOS SECUNDÁRIOS DE BAIXA
TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

VITÓRIA
2005

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

S243a Sarcinelli, Carlos Alberto, 1963-
Análise da aplicação de conexão em paralelo de capacitores em circuitos secundários de baixa tensão / Carlos Alberto Sarcinelli. – 2005.
127 f. : il.

Orientador: Domingos S. L. Simonetti.

Co-Orientador: Gilberto C. D. Sousa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas de energia elétrica - Controle. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Energia elétrica - Qualidade. 4. Força eletromotriz. 5. Filtros elétricos de resistência-capacitância. 6. Análise harmônica. I. Simonetti, Domingos Savio Lyrio. L. II. Sousa, Gilberto Costa Drumond. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

CARLOS ALBERTO SARCINELLI

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE CONEXÃO EM PARALELO DE
CAPACITORES EM CIRCUITOS SECUNDÁRIOS DE BAIXA
TENSÃO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 13 de maio de 2005

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Domingos S.L. Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Gilberto C. D. Sousa
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Wilson C. P. de Aragão Filho
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. José Antenor Pomílio
Universidade Estadual de Campinas

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados do circuito elétrico da rede de distribuição.....	54
Tabela 4.2 – Dados das cargas conectadas em cada poste.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circuito equivalente da fonte de alimentação.....	20
Figura 2.2 – Circuito equivalente T do transformador da rede de distribuição.....	21
Figura 2.3 – Circuito equivalente da linha de distribuição entre dois postes.....	22
Figura 2.4 – Circuito equivalente da carga elétrica ligada em cada poste.....	23
Figura 2.5 – Circuito equivalente de uma rede elétrica de distribuição genérica com k postes.....	25
Figura 2.6 – Modelo do banco de capacitores com reatância capacitiva X_{cap}	25
Figura 2.7 – Rede de distribuição com dois postes e diagrama fasorial sem e com banco de capacitores.....	26
Figura 2.8 – Circuito equivalente de uma rede elétrica de distribuição com 7 postes.....	28
Figura 2.9 – Circuito equivalente simplificado da rede de distribuição visto pela fonte.....	30
Figura 2.10 – Circuito equivalente simplificado da rede de distribuição visto pelo poste um.....	31
Figura 2.11 – Circuito equivalente simplificado da rede de distribuição visto pelo poste dois.....	32
Figura 2.12 – Espectro harmônico da tensão secundária de um transformador de 112.5 KVA.....	36
Figura 2.13 – Circuito harmônico equivalente visto do poste genérico n para a frequência do harmônico de ordem h.....	37
Figura 2.14 – Resposta em frequência de um transformador com núcleo de ferro.....	40
Figura 2.15 – Filtro passivo ligado em paralelo com uma carga.....	41
Figura 3.1 – Modelo da rede de distribuição com cinco postes, cargas lineares, banco de capacitores e impedância de correção harmônica.....	51
Figura 3.2 – Retificador monofásico de onda completa alimentando uma carga (modelo do Simulink).....	53
Figura 4.1 – Tensão eficaz no poste um com e sem inserção de banco de capacitores.....	56
Figura 4.2 – Tensão eficaz no poste três com e sem inserção de banco de capacitores.....	57
Figura 4.3 – Tensão eficaz no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores.....	58
Figura 4.4 – Tensão eficaz no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores com variação do fator de deslocamento.....	59
Figura 4.5 – Banco de capacitores a ser instalado no último poste para controle de tensão eficaz.....	61
Figura 4.6 – Tensão eficaz de terceiro harmônico no poste um com e sem inserção de banco de capacitores.....	63
Figura 4.7 – Tensão eficaz de terceiro harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores.....	64
Figura 4.8 – Razão entre as tensões eficazes de terceiro harmônico no poste um com e sem inserção de banco de capacitores.....	65
Figura 4.9 – Razão entre as tensões eficazes de terceiro harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores.....	66

Figura 4.10 – Razão entre as tensões eficazes de quinto harmônico no poste um com e sem inserção de banco de capacitores.....	67
Figura 4.11 – Razão entre as tensões eficazes de quinto harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores.....	68
Figura 4.12 – Impedância de correção harmônica.....	69
Figura 4.13 – Razão entre as tensões eficazes de terceiro harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores e com inserção de impedância de correção harmônica.....	70
Figura 4.14 – Razão entre as tensões eficazes de quinto harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores e com inserção de impedância de correção harmônica.....	71
Figura 4.15 – Relação entre as impedâncias de terceiro harmônico com e sem banco de capacitores vistas do poste cinco	72
Figura 4.16 – Relação entre as impedâncias de quinto harmônico com e sem banco de capacitores vistas do poste cinco.....	73
Figura 4.17 – Relação entre as impedâncias de sétimo harmônico com e sem banco de capacitores vistas do poste cinco.....	74
Figura 4.18 – Relação entre as impedâncias de terceiro harmônico com e sem banco de capacitores vistas do poste cinco com impedância de correção harmônica.....	75
Figura 4.19 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um sem banco de capacitores.....	77
Figura 4.20 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um com banco de capacitores.....	77
Figura 4.21 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três sem banco de capacitores.....	78
Figura 4.22 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três com banco de capacitores.....	78
Figura 4.23 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco sem banco de capacitores	79
Figura 4.24 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores.....	79
Figura 4.25 – Retificador de onda completa com filtro capacitivo e carga resistiva.....	80
Figura 4.26 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente elétrica solicitada por um retificador de onda completa.....	81
Figura 4.27 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um sem banco de capacitores.....	82
Figura 4.28 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um com banco de capacitores.....	83

Figura 4.29 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três sem banco de capacitores.....	83
Figura 4.30 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três com banco de capacitores.....	84
Figura 4.31 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco sem banco de capacitores.....	84
Figura 4.32 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores.....	85
Figura 4.33 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores e impedância de correção harmônica.....	86
Figura 4.34 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um sem banco de capacitores.....	87
Figura 4.35 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um com banco de capacitores.....	88
Figura 4.36 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três sem banco de capacitores.....	88
Figura 4.37 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três com banco de capacitores.....	89
Figura 4.38 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco sem banco de capacitores.....	89
Figura 4.39 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores.....	90
Figura 4.40 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores e impedância de correção harmônica.....	91
Figura 4.41 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um sem banco de capacitores.....	92
Figura 4.42 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um com banco de capacitores.....	92
Figura 4.43 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três sem banco de capacitores.....	93
Figura 4.44 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três com banco de capacitores.....	93
Figura 4.45 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco sem banco de capacitores.....	94
Figura 4.46 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores.....	94

Figura 4.47 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores e impedância de correção harmônica..... 95

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
C	Capacitância do banco de capacitores
C_{elb}	Capacitância de um elemento do banco de capacitores
C_{corre}	Capacitância de correção harmônica
EF_b	Tensão de fase base
f	Frequência fundamental da rede elétrica
h	Ordem da frequência do harmônico
H/km	Henry por quilômetro
I_b	Corrente base
I_c	Corrente total do banco de capacitores.
I_H	Corrente que circula na impedância Z_H
I_h	Corrente harmônica de ordem h
I_I	Corrente que circula na impedância Z_I
I_K	Corrente que circula na impedância Z_K
I_L	Corrente que circula na impedância Z_L
I_{m, m=1 a 7}	Corrente total da carga ligada à rede no poste m
I_T	Corrente total da rede de distribuição
kVA	Kilo Volt Ampère
L	Distância da fonte de alimentação até o poste onde está localizado o banco de capacitores em km.
L_{corre}	Indutância de correção harmônica
L_f	Indutância equivalente da geração até a entrada do transformador de distribuição
L_{li}	Indutância dos condutores elétricos entre dois postes
L_m	Indutância de magnetização do transformador de distribuição
L_{t1}	Indutância do primário do transformador de distribuição referida ao secundário

L_{t2}	Indutância do secundário do transformador de distribuição
nF	Nano faraday
P_n	Potência ativa por fase das cargas ligadas à rede no poste n
pu	Por unidade
Q_C	Potência reativa do banco de capacitores
Q_n	Potência reativa por fase das cargas ligadas à rede no poste genérico n
R_f	Resistência equivalente da geração até a entrada do transformador de distribuição
R_{li}	Resistência dos condutores elétricos entre dois postes
R_m	Resistência de magnetização do transformador de distribuição
R_n	Resistência elétrica equivalente das cargas ligadas à rede no poste n
R_{t1}	Resistência do primário do transformador de distribuição referida ao secundário
R_{t2}	Resistência do secundário do transformador de distribuição
S_b	Potência aparente base
THD	Taxa de distorção harmônica (“Total Harmonic Distortion”)
V_{CN}	Tensão nominal do banco de capacitores
V_f	Tensão eficaz de alimentação da rede de distribuição
V_{m, m = 1 a 7}	Tensão eficaz fase neutro aplicada à carga ligada ao poste m
V_n	Tensão eficaz fase neutro aplicada às cargas ligadas ao poste genérico n
V_{nf}	Tensão eficaz no poste genérico n após a inserção do banco de capacitores
V_{ni}	Tensão eficaz no poste n antes da inserção do banco de capacitores
X_{cap}	Reatância do banco de capacitores a ser conectado à rede no último poste
X_{Ch}	Reatância na frequência do harmônico de ordem h para a uma carga capacitiva
X_L	Reatância indutiva a ser percorrida pela corrente I _C (da fonte até o poste de conexão do banco de capacitores)
X_{Lh}	Reatância na frequência do harmônico de ordem h para uma carga indutiva

X_{ln}	Reatância indutiva equivalente das cargas ligadas à rede no poste genérico n
X_m	Reatância de magnetização do transformador de distribuição
Z_{5cap}	Impedância equivalente da associação paralela de Z_{cap} e Z_5
Z_{6cap}	Impedância equivalente da associação paralela de Z_{cap} e Z_6
Z_{7cap}	Impedância equivalente da associação paralela de Z_{cap} e Z_7
Z_b	Impedância base
Z_{cap}	Impedância do banco de capacitores a ser conectado à rede no último poste
Z_{corre}	Impedância de correção harmônica
Z_f	Impedância equivalente da geração até a entrada do transformador de distribuição, vista no secundário
$Z_i, i = A \text{ a } G$	Impedância equivalente do ponto i até a fonte
Z_{in}	Impedância de entrada da rede de distribuição (fonte e transformador)
$Z_{innh}, n = 1 \text{ a } 7$	Impedância vista do poste genérico n até a fonte de alimentação para a frequência da harmônica de ordem h
$Z_j, j = H \text{ a } M$	Impedâncias equivalentes dos pontos H, I, J, K, L, M até o último poste
Z_{li}	Impedância dos condutores elétricos entre dois postes
$Z_{locnh}, n = 1 \text{ a } 7$	Impedância equivalente das cargas do poste genérico n para a frequência do harmônico de ordem h
Z_m	Indutância de magnetização do transformador de distribuição
Z_n	Impedância equivalente das cargas ligadas à rede no poste n
$Z_{outnh}, n = 1 \text{ a } 7$	Impedância vista do poste genérico n até o final da rede de distribuição para a frequência do harmônico de ordem h
Z_T	Impedância total vista pela fonte de alimentação

$\Delta V\%$	Incremento percentual de tensão eficaz no poste onde está inserido o banco de capacitores.
Ω/km	Ohm por quilômetro

SUMÁRIO

ABSTRACT.....	15
RESUMO.....	16
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA.....	20
2.1 – Modelo da fonte de alimentação.....	20
2.2 – Modelo do transformador de distribuição.....	21
2.3 – Modelo da linha de distribuição.....	22
2.4 – Modelo da carga elétrica total em cada poste.....	23
2.5 – Modelo da rede de distribuição.....	24
2.6 – Modelo do banco de capacitores.....	25
2.7 – Equacionamento do modelo.....	27
2.7.1 – Cálculo das impedâncias.....	29
2.7.2 – Cálculo das correntes e tensões elétricas.....	30
2.8 – Análise Harmônica.....	35
2.9 – Representação em por unidade (pu).....	42
3 IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DO MODELO.....	43
3.1 – Implementação em ambiente Matlab.....	43
3.1.1 – Entrada de dados.....	44
3.1.2 – Descrição do programa.....	45
3.1.2.1 – Cálculo das impedâncias de carga em cada poste.....	45
3.1.2.2 – Cálculo das tensões e correntes em cada poste.....	47
3.1.2.3 – Cálculo dos capacitores para correção da tensão eficaz	48
3.1.2.4 – Análise harmônica.....	49
3.2 – Implementação em ambiente Simulink.....	50
4 RESULTADOS OBTIDOS	54
4.1 – Modelo da rede de distribuição implementado em Matlab.....	54
4.1.1 – Tensões eficazes.....	56
4.1.2 – Banco de capacitores.....	60
4.1.3 – Harmônicos.....	62

4.2 – Modelo da rede de distribuição implementado em Simulink.....	75
4.2.1 – Rede de distribuição alimentando cargas lineares.....	76
4.2.2 – Rede de distribuição alimentando cargas não lineares.....	80
4.2.2.1 – Carga não linear localizada no poste um.....	81
4.2.2.2 – Carga não linear localizada no poste três.....	86
4.2.2.3 – Carga não linear localizada no poste cinco.....	91
5 CONCLUSÕES.....	97
5.1 – Comprimento da rede de distribuição.....	97
5.2 – Potência solicitada pelos consumidores.....	98
5.3 – Distribuição da potência solicitada pelos consumidores.....	99
5.4 – Tipos de carga instalada na rede.....	99
5.5 – Presença de componentes harmônicos na tensão de alimentação.....	100
5.6 – Instalação de banco de capacitores.....	101
5.7 – Conclusões finais.....	101
5.8 – Sugestões para estudos futuros a serem desenvolvidos nesta área.....	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
ANEXOS.....	106
ANEXO A – Programa implementado em Matlab.....	107
ANEXO B – Dados técnicos de cabos de alumínio usados em redes de distribuição.....	124

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the behavior of a radial low voltage secondary distribution network subject to linear and non-linear loads, with and without magnitude voltage control by the automatic insertion of capacitor banks. The analysis is performed by considering the variations in the secondary distribution network elements. These elements are the loads connected to each pole of the network (power varying from no-load to full load, and displacement factor varying from 0.7 to 1.0), the changes in the ratings of the supply transformers (apparent power in kVA, primary and secondary impedances, and primary and secondary voltages), the number of poles and the distance among them.

The harmonic behavior of the *rms* voltage of the distribution network is also analyzed, with and without the insertion of a capacitor bank at the last pole, since the distribution network might amplify harmonics as a result of resonances in the system, which have influence on the control of the voltage magnitude.

Finally, a steady-state frequency domain analysis is performed by using a computer program (MATLAB), whose results are confirmed through time domain simulations performed using SIMULINK. The results concerning the time and frequency analyses are presented as a set of plots, from which some conclusions are highlighted, for a case study consisting in a network having five poles and a 13,800/220 V, 75kVA transformer.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de uma rede de distribuição secundária radial sob condições de cargas lineares e não lineares, com e sem controle de tensão eficaz através de inserção automática de banco de capacitores. A análise é feita considerando-se as variações nos diversos elementos constituintes da rede de distribuição secundária, a saber: nas cargas ligadas em cada poste da rede (potências: de vazio à plena carga, fator de deslocamento: de 0,7 a 1,0), da troca do transformador de alimentação da rede (potência em kVA, impedâncias do primário e secundário e das tensões primária e secundária), do número de postes da rede e da distância entre postes.

Também é analisado o comportamento harmônico da tensão eficaz da rede de distribuição para diferentes frequências sem e com capacitores inseridos no último poste, pois na rede de distribuição pode haver amplificações harmônicas devidas às ressonâncias no sistema, que influenciam o valor de tensão eficaz a ser controlado.

Por fim, são mostrados os resultados na forma de gráficos, obtidos através de um programa computacional do modelo da rede de distribuição secundária, implementado em ambiente MATLAB e verificação por simulação em SIMULINK. As conclusões e análises são efetuadas através dos resultados obtidos no domínio da frequência e do tempo, para uma rede de distribuição contendo cinco postes e um transformador de 13800 / 220 Volts, 75 kVA.

1 – INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil, as concessionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica têm efetuado estudos para melhorar a qualidade da energia fornecida aos consumidores, por imposição de resoluções do órgão regulador do setor elétrico, ANEEL.

O aumento do consumo, os novos equipamentos eletroeletrônicos industriais, residenciais e comerciais, fazendo uso de dispositivos semicondutores, têm feito com que estes estudos se tornem mais complexos, já que o número de variáveis que influenciam na qualidade da energia elétrica se torna cada vez maior. Uma das principais variáveis que afetam a qualidade do fornecimento de energia elétrica é o nível de tensão eficaz nas instalações elétricas alimentadas em baixa tensão que, pela resolução 505 de 26 de novembro de 2001 da ANEEL [1], deve variar entre 116 e 132 Volts para as redes de distribuição com tensão entre fase e neutro de 127 Volts e entre 201 e 231 Volts para as redes de distribuição com tensão entre fase e neutro de 220 Volts.

As principais variações fora destes limites podem ser causadas por problemas na geração, transmissão, subestações e nas redes de distribuição de energia elétrica. Cabe ainda destacar o incremento das perdas devido às correntes harmônicas nestes locais causado pelo aumento da conexão à rede de distribuição de cargas não lineares (aparelhos eletrônicos com dispositivos semicondutores).

Os principais motivos das variações de tensão fora dos limites permissíveis nas redes de distribuição de energia elétrica são [2]:

- Níveis de tensão eficaz acima dos limites de 132/229 Volts.
 - Erros de operação.
 - Bancos de capacitores mal dimensionados.
 - Desligamento de grandes cargas elétricas na rede.
 - Curto circuito desequilibrado.
 - Sistemas desequilibrados com neutro interrompido.

- Níveis de tensão eficaz abaixo dos limites 116/201 Volts:
 - Erros de operação.
 - Baixo fator de potência das cargas ligadas na rede.
 - Ligação de grandes cargas elétricas na rede.
 - Sobrecarga na rede.
 - Alimentador mal dimensionado.
 - Presença de harmônicas de corrente na rede, proporcionando variações na forma de onda da tensão.

Quando o nível de tensão está fora dos limites permissíveis, a ação corretiva das concessionárias é efetuada normalmente na alta tensão através de [2]:

- Ajuste dos taps dos transformadores nas subestações.
- Inserção e desligamento de banco de capacitores.
- Transferência de cargas para outros alimentadores menos carregados através de operação de chaves de transferência.
- Melhoria do fator de deslocamento.
- Troca da bitola dos cabos do alimentador.
- Construção de um novo alimentador.
- Mudança da tensão primária de alimentação.
- Construção de novas subestações.

Para melhorar o nível de tensão eficaz de alimentação dos consumidores numa rede de baixa tensão, deve-se reduzir ao máximo possível a queda de tensão na rede. Uma das maneiras de alcançar este objetivo é efetuar a inserção controlada de banco de capacitores. Adicionalmente obter-se-á uma redução nas perdas resistivas do alimentador já que está sendo reduzida a parcela reativa da corrente circulante.

Os bancos de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica para controle de tensão e correção de fator de potência são normalmente utilizados na alta tensão (rede primária), pois na baixa tensão (rede secundária) facilitam a ocorrência de problemas de ressonância, distorção harmônica e sobretensões. Para diminuir as perdas por correntes harmônicas podem ser inseridos na rede de distribuição em baixa tensão filtros de harmônicas ativos ou passivos.

Este estudo faz uma análise da inserção automática de banco de capacitores no fim da rede de distribuição secundária para controle do nível de tensão eficaz e seus possíveis efeitos harmônicos, sendo dividido em cinco capítulos conforme descrição abaixo:

- O capítulo dois mostra como foi efetuada a modelagem dos componentes elétricos do sistema, que são: fonte de alimentação, transformador de distribuição, cargas ligadas aos postes, linha de distribuição, bancos de capacitores e as transformações das grandezas envolvidas para pu (por unidade).
- O capítulo três mostra como o modelo matemático da rede de distribuição secundária foi implementado em MATLAB e SIMULINK, descrevendo passo a passo as implementações.
- O capítulo quatro contém os resultados de estudos em MATLAB e SIMULINK do perfil de tensão eficaz de fornecimento na forma de gráficos sem e com inserção de banco de capacitores com a análise harmônica dos modelos da rede de distribuição.
- O capítulo cinco apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido com opiniões e sugestões de novos estudos.

2 – MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIA

Neste capítulo apresenta-se a modelagem dos diversos elementos que compõem o sistema de distribuição objeto deste estudo. Considerando a realidade em que estamos inseridos, o sistema é considerado radial, por ser esta a configuração predominante no estado do Espírito Santo.

2.1 - Modelo da fonte de alimentação

A fonte de alimentação foi representada como um barramento infinito com tensão constante, conforme mostrado na figura 2.1, tendo em série uma impedância formada pela associação em série de uma resistência com uma indutância, que representam toda a impedância do sistema de alta tensão (AT) da subestação até o transformador de distribuição. Os valores de tensão e impedância são aqueles já refletidos no secundário do transformador de distribuição.

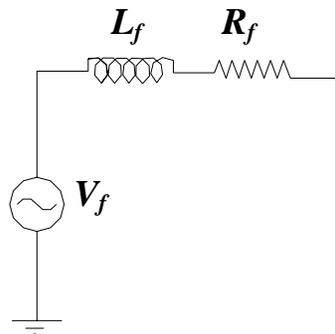


Figura 2.1 – Circuito equivalente da fonte de alimentação.

A impedância equivalente da geração até a entrada do transformador de distribuição Z_f , representada na figura 2.1 é dada por:

$$Z_f = R_f + j.(2.\pi.f.L_f) \quad (2.1)$$

Onde:

f – Frequência da rede elétrica;

R_f – Resistência elétrica equivalente da geração até a entrada do transformador de distribuição, vista no secundário.

L_f – Indutância equivalente da geração até a entrada do transformador de distribuição, vista no secundário.

2.2 - Modelo do transformador de distribuição

O transformador foi representado pelo circuito equivalente T, conforme mostrado na figura 2.2, tendo a resistência e a indutância do primário referidas ao secundário e o ramo de magnetização representado pela associação paralela da resistência de perdas no núcleo e da indutância de magnetização, também referidas ao secundário..

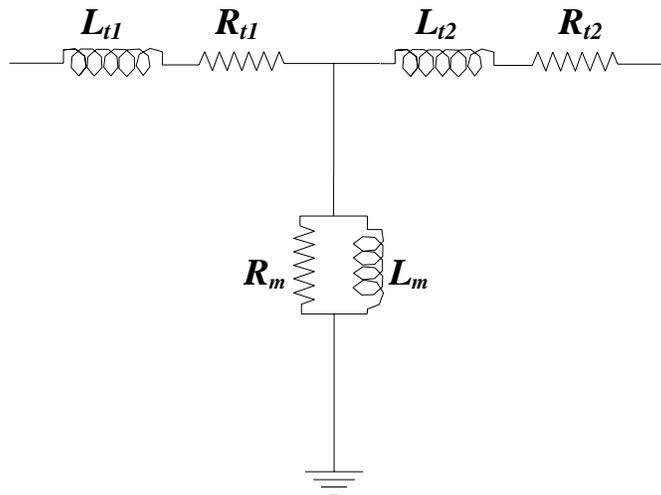


Figura 2.2 – Circuito equivalente T do transformador da rede de distribuição.

As impedâncias do transformador são dadas por:

$$Z_m = \frac{R_m \cdot j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_m)}{R_m + j \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_m)} \quad (2.2)$$

$$Z_{t1} = R_{t1} + j.(2.\pi.f.L_{t1}) \quad (2.3)$$

$$Z_{t2} = R_{t2} + j.(2.\pi.f.L_{t2}) \quad (2.4)$$

Onde:

Z_m – Impedância do ramo de magnetização do transformador, vista pelo secundário.

Z_{t1} – Impedância do primário referida ao secundário do transformador.

Z_{t2} – Impedância do secundário do transformador.

R_{t1} – Resistência elétrica do primário referida ao secundário.

R_{t2} – Resistência elétrica do secundário.

L_{t1} – Indutância do primário referida ao secundário.

L_{t2} – Indutância do secundário.

R_m – Resistência de perdas no núcleo, vista pelo secundário.

L_m – Indutância do ramo de magnetização, vista pelo secundário.

f – Freqüência da rede de distribuição.

2.3 - Modelo da linha de distribuição

A linha de distribuição entre dois postes foi representada como uma resistência em série com uma indutância, conforme mostrado na figura 2.3, sendo estes valores dependentes da distância entre os postes e as características dos cabos utilizados (resistência e indutância por quilômetro).

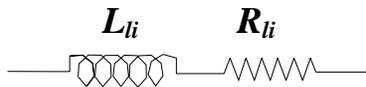


Figura 2.3 – Circuito equivalente da linha de distribuição entre dois postes.

A linha será representada pela sua impedância, dada por:

$$Z_{li} = R_{li} + j.(2.\pi.f.L_{li}) \quad (2.5)$$

Onde:

Z_{li} – Impedância dos condutores elétricos entre dois postes.

R_{li} – Resistência dos condutores elétricos entre dois postes.

L_{li} – Indutância dos condutores elétricos entre dois postes.

Os valores de R_{li} e L_{li} podem ser calculados através da multiplicação da distância entre dois postes e os valores de indutância e resistência por quilômetro obtidos em tabelas de fabricantes de condutores.

Por simplicidade, será considerado que a distância entre postes seja constante no circuito secundário em análise.

2.4 – Modelo da carga elétrica total em cada poste

A carga elétrica total conectada em cada poste foi representada como uma indutância em paralelo com uma resistência, conforme mostrado na figura 2.4, ou seja, através da potência ativa e reativa consumida em cada poste.

Seja um poste genérico n da rede de distribuição, então tem-se:

Poste n

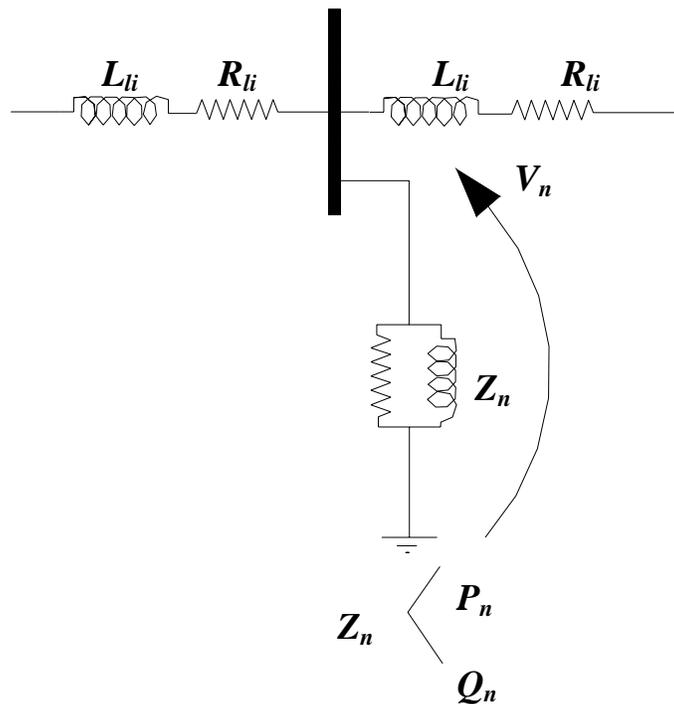


Figura 2.4 – Circuito equivalente da carga elétrica ligada em cada poste.

Neste estudo as cargas conectadas em cada poste foram consideradas como sendo de impedância constante e em condições nominais alimentadas com tensão eficaz de 127 Volts. Então pode-se considerar:

$$R_n = \frac{(V_n)^2}{P_n} \quad (2.6)$$

$$X_{Ln} = \frac{(V_n)^2}{Q_n} \quad (2.7)$$

$$Z_n = \frac{R_n \cdot j \cdot (X_{Ln})}{R_n + j \times (X_{Ln})} \quad (2.8)$$

Onde:

Z_n – Impedância equivalente das cargas ligadas à rede no poste genérico n.

R_n – Resistência elétrica equivalente das cargas ligadas à rede no poste genérico n.

X_{Ln} – Reatância indutiva equivalente das cargas ligadas à rede no poste genérico n.

P_n – Potência ativa por fase consumida pelas cargas ligadas à rede no poste genérico n.

Q_n – Potência reativa por fase consumida pelas cargas ligadas à rede no poste genérico n.

V_n – Tensão fase neutro aplicada nas cargas ligadas à rede no poste genérico n.

Se for necessário fazer a análise da rede de distribuição com carga capacitiva instalada em um poste genérico n, basta substituir nas fórmulas acima a potência reativa Q_n por $-Q_n$. Para cargas puramente resistiva basta considerar somente a potência ativa da carga.

2.5 - Modelo da rede de distribuição

A rede de distribuição secundária de baixa tensão (BT) foi representada pelo seu modelo por fase, conforme mostrado na figura 2.5, considerando o circuito para uma rede com k postes, sendo cada poste representado como um barramento com tensão fase-neutro e impedância por fase.

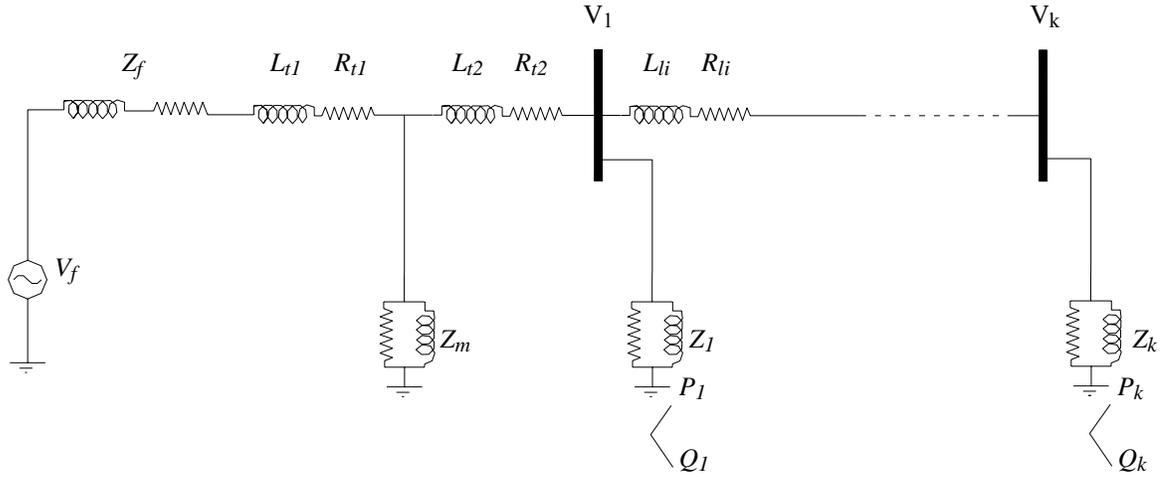


Figura 2.5 – Circuito equivalente de uma rede elétrica de distribuição genérica com k postes.

2.6 – Modelo do banco de capacitores

O banco de capacitores a ser instalado na rede de distribuição para melhoria do nível de tensão eficaz é formado por um conjunto de capacitores em paralelo, cuja capacitância equivalente é dada pela soma das capacitâncias destes capacitores. Pode-se representar o banco de capacitores como sendo um único capacitor com reatância capacitiva X_{cap} , conforme a figura 2.6.

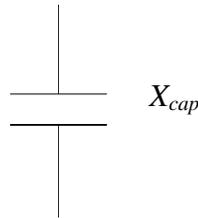


Figura 2.6 – Modelo do banco de capacitores com reatância capacitiva X_{cap} .

A ação corretiva do nível de tensão eficaz pela inserção do banco de capacitores pode ser melhor observada através do diagrama fasorial da figura 2.7.

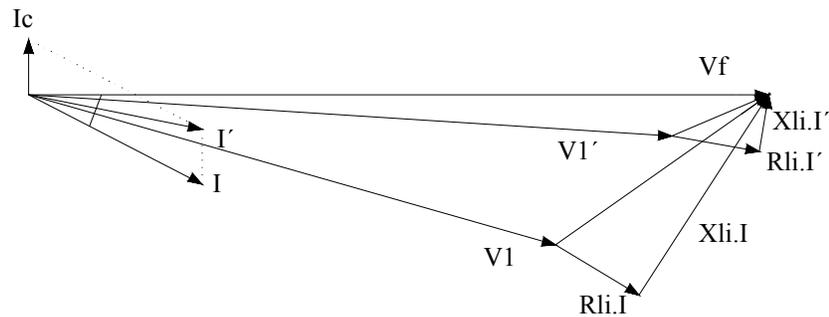
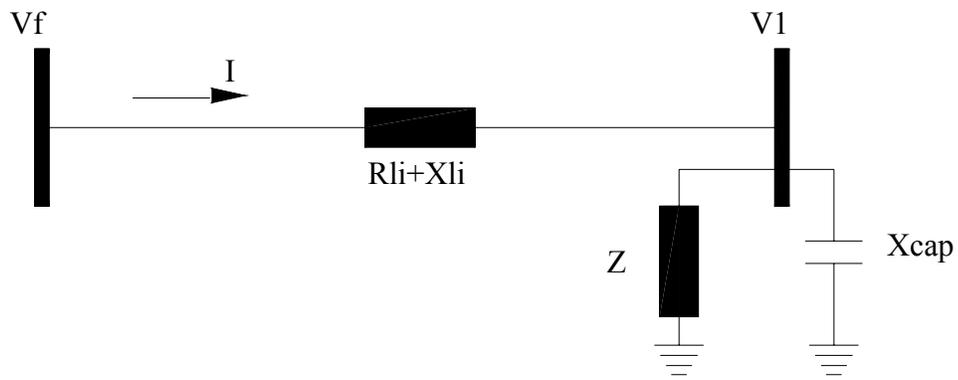


Figura 2.7 – Rede de distribuição com dois postes e diagrama fasorial sem e com banco de capacitores

Onde:

V_f – Tensão eficaz de alimentação da rede de distribuição.

V_1 – Tensão eficaz no último poste sem banco de capacitores.

V_1' – Tensão eficaz no último poste com banco de capacitores.

I – Corrente solicitada da fonte sem banco de capacitores.

I' – Corrente solicitada da fonte com banco de capacitores.

I_c – Corrente solicitada pelo banco de capacitores.

$R_{li}.I$ – Queda de tensão na resistência da linha sem banco de capacitores.

$X_{li}.I$ – Queda de tensão na indutância da linha sem banco de capacitores.

$R_{li}.I'$ – Queda de tensão na resistência da linha com banco de capacitores.

$X_{li}.I'$ – Queda de tensão na indutância da linha com banco de capacitores.

Como o objetivo da inserção do banco de capacitores é a melhoria do nível de tensão eficaz, ele deve ser alocado no poste que possibilita o maior ganho de tensão eficaz.

O ganho de tensão eficaz percentual no ponto do circuito onde é inserido o banco de capacitores pode ser calculado através da seguinte equação[2]:

$$\Delta V\% = \frac{Q_c \cdot X \cdot L}{10 \cdot (kV)^2} \quad (2.9)$$

Onde:

$\Delta V\%$ – Incremento percentual de tensão eficaz no poste onde está inserido o banco de capacitores.

Q_c – Potência reativa do banco de capacitores.

kV – Tensão eficaz fase neutro do poste onde está inserido o banco de capacitores.

X – Reatância indutiva da fonte de alimentação até o poste onde está localizado o banco de capacitores em Ω/km .

L – Distância da fonte de alimentação até o poste onde está localizado o banco de capacitores em km.

Através desta equação, observa-se que o maior ganho de tensão ocorre quando se aloca o banco de capacitores no último poste da rede de distribuição, já que maior será o comprimento do alimentador (L).

2.7 – Equacionamento do modelo

A rede de distribuição a ser utilizada neste trabalho pode ter cinco, seis, ou sete postes, pois em média as redes de distribuição têm comprimento de 200 a 280 metros, com uma distância média entre postes de 40 metros.

O circuito da figura 2.8 representa o modelo completo de uma rede de distribuição com sete postes.

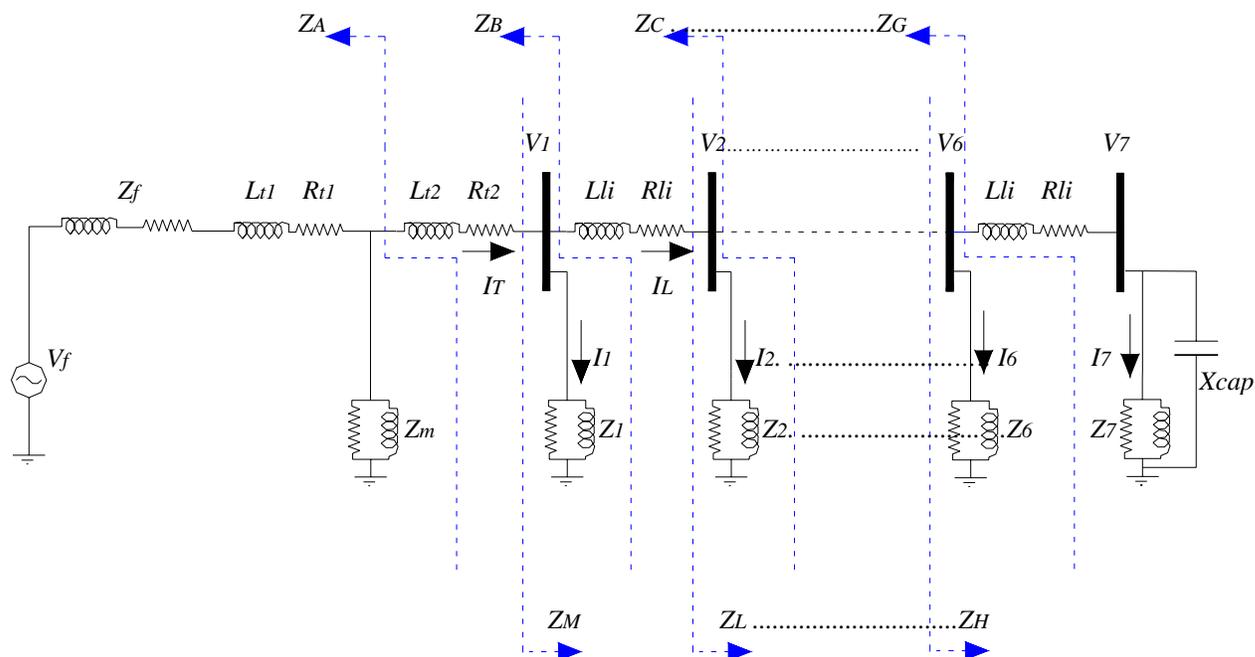


Figura 2.8 – Circuito equivalente de uma rede elétrica de distribuição com 7 postes.

Onde:

$Z_{i, i = A a G}$ – Impedância vista do ponto i até a fonte.

$Z_{j, j = H a M}$ – Impedância vista do ponto j até o último poste da rede de distribuição.

$I_{m, m = 1 a 7}$ – Corrente da carga ligada à rede no poste m.

I_T – Corrente total da rede de distribuição.

$V_{m, m = 1 a 7}$ – Tensão eficaz fase neutro aplicada à carga ligada ao poste m.

X_{cap} – Reatância do banco de capacitores a ser conectado à rede no último poste.

No circuito, para controle do nível de tensão eficaz, serão inseridos capacitores no último poste da rede de distribuição. Os capacitores poderão estar no poste cinco (rede de distribuição com cinco postes), no poste seis (rede de distribuição com seis postes), ou no poste sete (rede de distribuição com sete postes). A conexão de capacitores no final de um alimentador é a situação que possibilita o maior ganho de tensão no circuito[3].

Como a impedância de magnetização é muito grande em relação às impedâncias de carga, da linha, e do primário e secundário do transformador, o ramo de magnetização será desprezado para efeito do cálculo das tensões e correntes do circuito em regime permanente.

2.7.1 - Cálculo das impedâncias

As impedâncias são calculadas a partir do circuito da figura 2.8 usando-se as teorias tradicionais de circuitos elétricos.

$$Z_H = \frac{(Z_7 + Z_{li}).Z_6}{Z_7 + Z_{li} + Z_6} \quad (2.10)$$

$$Z_I = \frac{(Z_H + Z_{li}).Z_5}{Z_H + Z_{li} + Z_5} \quad (2.11)$$

$$Z_J = \frac{(Z_I + Z_{li}).Z_4}{Z_I + Z_{li} + Z_4} \quad (2.12)$$

$$Z_K = \frac{(Z_J + Z_{li}).Z_3}{Z_J + Z_{li} + Z_3} \quad (2.13)$$

$$Z_L = \frac{(Z_K + Z_{li}).Z_2}{Z_K + Z_{li} + Z_2} \quad (2.14)$$

$$Z_M = \frac{(Z_L + Z_{li}).Z_1}{Z_L + Z_{li} + Z_1} \quad (2.15)$$

2.7.2 – Cálculo das correntes e tensões elétricas

Pode-se representar o circuito da figura 2.8 de maneira simplificada, substituindo toda a linha a partir do ponto “M” pela sua impedância equivalente, conforme mostrado na figura 2.9, tendo uma tensão V_1 aplicada sobre a impedância vista do poste um (Z_M) até o último poste da rede de distribuição.

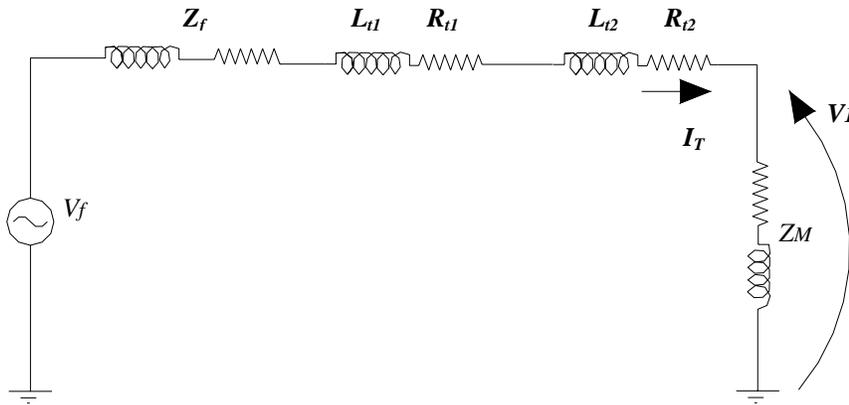


Figura 2.9 – Circuito equivalente simplificado da rede de distribuição visto pela fonte.

Através deste circuito pode-se calcular a impedância equivalente total, a corrente total e a tensão no poste um, conforme a seguir:

$$Z_{in} = Z_f + Z_{1t} + Z_{2t} \quad (2.16)$$

$$Z_T = Z_{in} + Z_M \quad (2.17)$$

$$I_T = \frac{V_f}{Z_T} \quad (2.18)$$

$$V_1 = Z_M \cdot I_T \quad (2.19)$$

Onde:

Z_{in} – Impedância de entrada da rede de distribuição (fonte e transformador).

Z_T – Impedância total vista pela fonte de alimentação.

Também pode-se representar o circuito da figura 2.8 de maneira simplificada, substituindo toda a linha a partir do ponto “L” pela sua impedância equivalente, como mostrado na figura 2.10, tendo uma tensão V_2 aplicada sobre a impedância vista do poste dois até o último poste da rede de distribuição.

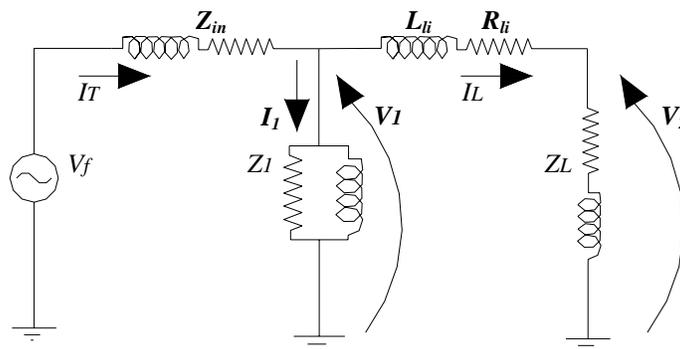


Figura 2.10 – Circuito equivalente simplificado da rede de distribuição visto pelo poste um.

Através deste circuito pode-se calcular a corrente na carga um, a corrente I_L e a tensão no poste dois, conforme abaixo:

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} \quad (2.20)$$

$$I_L = I_T - I_1 \quad (2.21)$$

$$V_2 = Z_L \cdot I_L \quad (2.22)$$

Onde:

I_L – Corrente que circula na impedância Z_L .

Z_L – Impedância vista do poste dois até o último poste da rede de distribuição.

Da mesma forma pode-se representar o circuito da figura 2.8 de maneira simplificada, substituindo toda a linha a partir do ponto “K” pela sua impedância equivalente e mostrando somente a parte final do circuito, como mostrado na figura 2.11, tendo uma tensão V_3 aplicada sobre a impedância vista do poste três até o último poste da rede de distribuição.

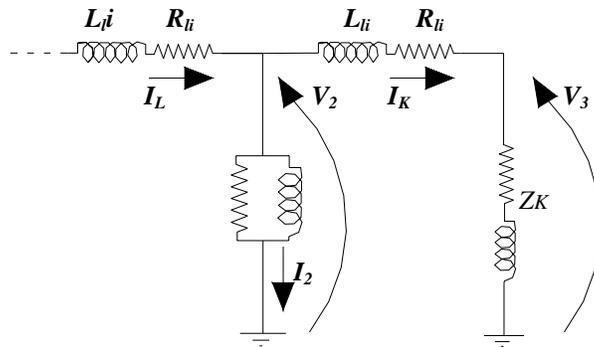


Figura 2.11 – Circuito equivalente simplificado da rede de distribuição visto pelo poste dois.

Através deste circuito pode-se calcular a corrente na carga dois, a corrente I_K e a tensão no poste três, conforme a seguir:

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_2} \quad (2.23)$$

$$I_K = I_L - I_2 \quad (2.24)$$

$$V_3 = Z_K \cdot I_K \quad (2.25)$$

Onde:

I_K – Corrente que circula na impedância Z_K .

Z_K – Impedância vista do poste três até o último poste da rede de distribuição.

Repetindo o procedimento anterior nos próximos postes da rede de distribuição, pode-se calcular as correntes e tensões em cada poste, conforme a seguir:

$$I_3 = \frac{V_3}{Z_3} \quad (2.26)$$

$$I_J = I_K - I_3 \quad (2.27)$$

$$V_4 = Z_J \cdot I_J \quad (2.28)$$

$$I_4 = \frac{V_4}{Z_4} \quad (2.29)$$

$$I_I = I_J - I_4 \quad (2.30)$$

$$V_5 = Z_I \cdot I_I \quad (2.31)$$

$$I_5 = \frac{V_5}{Z_5} \quad (2.32)$$

$$I_H = I_I - I_5 \quad (2.33)$$

$$V_6 = Z_H \cdot I_H \quad (2.34)$$

$$I_6 = \frac{V_6}{Z_6} \quad (2.35)$$

$$I_7 = I_H - I_6 \quad (2.36)$$

$$V_7 = Z_7 \cdot I_7 \quad (2.37)$$

Onde:

I_J – Corrente que circula na impedância Z_J .

Z_J – Impedância vista do poste quatro até o último poste da rede de distribuição.

I_I – Corrente que circula na impedância Z_I .

Z_I – Impedância vista do poste cinco até o último poste da rede de distribuição

I_H – Corrente que circula na impedância Z_H .

Z_H – Impedância vista do poste seis até o último poste da rede de distribuição.

No caso de termos somente seis postes na rede de distribuição secundária, pode-se manter os mesmos cálculos acima, bastando fazer Z_7 igual a infinito. Neste caso a corrente nas cargas do poste sete será zero e a tensão no poste sete igual à do poste seis. Para o caso da linha de distribuição secundária ter somente cinco postes, pode-se fazer Z_6 e Z_7 iguais a infinito. Neste caso as correntes nas cargas dos postes seis e sete são zero, e as tensões dos postes seis e sete são iguais à tensão do poste cinco.

Ao serem inseridos os capacitores no último poste da rede de distribuição (cinco, seis ou sete, dependendo do tamanho da rede de distribuição secundária) a impedância do último poste será dada pela associação em paralelo da impedância de carga deste poste e a impedância total do banco de capacitores.

Na rede de distribuição com cinco postes, deve-se substituir a impedância do poste cinco por:

$$Z_{5cap} = \frac{Z_5 \cdot Z_{cap}}{Z_5 + Z_{cap}} \quad (2.38)$$

Na rede de distribuição com seis postes, deve-se substituir a impedância do poste seis por:

$$Z_{6cap} = \frac{Z_6 \cdot Z_{cap}}{Z_6 + Z_{cap}} \quad (2.39)$$

Na rede de distribuição com sete postes, deve-se substituir a impedância do poste sete por:

$$Z_{7cap} = \frac{Z_7 \cdot Z_{cap}}{Z_7 + Z_{cap}} \quad (2.40)$$

Onde:

Z_{cap} – Impedância do banco de capacitores a ser conectado à rede no último poste.

Z_{5cap} – Impedância equivalente da associação paralela de Z_{cap} e Z_5 .

Z_{6cap} – Impedância equivalente da associação paralela de Z_{cap} e Z_6 .

Z_{7cap} – Impedância equivalente da associação paralela de Z_{cap} e Z_7 .

Após feita estas modificações, o cálculo das tensões e das correntes poderá ser feito da mesma maneira mostrada anteriormente.

2.8 – Análise Harmônica

Na rede de distribuição secundária de baixa tensão pode-se ter cargas de comportamento não linear (aparelhos eletroeletrônicos, e outras cargas com retificadores), que solicitam da rede correntes com conteúdo harmônico alto. A circulação destas correntes com frequências diferentes da fundamental provoca quedas de tensões harmônicas ao longo da linha de distribuição, provocando variações e deformações da tensão eficaz fornecida aos consumidores.

O gráfico da figura 2.12 mostra o espectro harmônico típico de tensão entre fases da alimentação fornecida a consumidores residenciais [4].

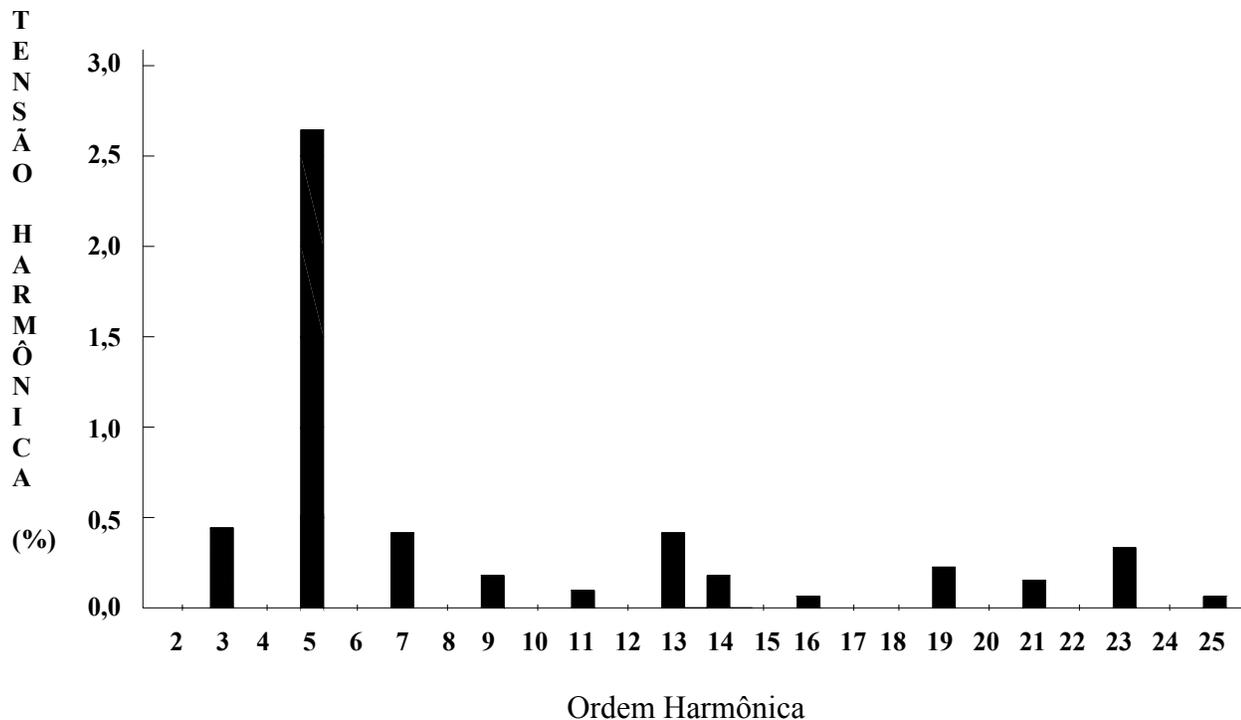


Figura 2.12 – Espectro harmônico típico da tensão secundária de um transformador de 112,5 kVA.

Algumas cargas não lineares injetam correntes harmônicas na rede e podem ser modeladas em cada frequência do espectro da corrente como uma fonte de corrente cujo valor é a respectiva corrente harmônica (eficaz). Outras se comportam como fonte de tensão, não tendo ainda um modelo matemático definido, sendo necessário efetuar simulações computacionais (neste trabalho usa-se o Simulink) para determinação de sua influência no comportamento harmônico da rede de distribuição.

Uma carga não linear, do tipo fonte de corrente, ao ser instalada em um poste qualquer da rede de distribuição, provoca a circulação de correntes harmônicas que têm três caminhos possíveis a percorrer, como mostra a figura 2.13:

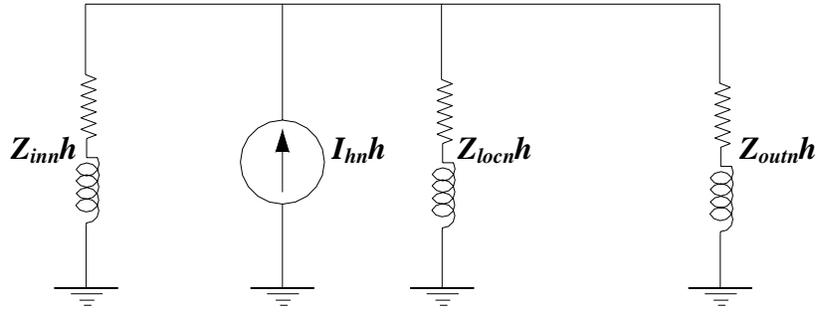


Figura 2.13 – Circuito harmônico equivalente visto do poste genérico n para a frequência do harmônico de ordem h .

Onde:

$Z_{innh, n = 1 \text{ a } 7}$ – Impedância vista do poste genérico n até a fonte de alimentação para a frequência do harmônico de ordem h .

$Z_{lonch, n = 1 \text{ a } 7}$ – Impedância equivalente das cargas do poste genérico n para a frequência do harmônico de ordem h .

$Z_{outnh, n = 1 \text{ a } 7}$ – Impedância vista do poste genérico n até o final da rede de distribuição para a frequência do harmônico de ordem h .

Analisando o comportamento da rede de distribuição para uma carga não linear instalada individualmente em cada um dos postes da rede de distribuição, injetando na rede uma corrente harmônica de ordem h , tem-se para cada poste:

$$Z_{in1}h = Z_Ah + Z_{i2}h \quad (2.41)$$

$$Z_{loc1}h = Z_1h \quad (2.42)$$

$$Z_{out1}h = Z_{li}h + Z_Lh \quad (2.43)$$

$$Z_{in2}h = Z_Bh + Z_{li}h \quad (2.44)$$

$$Z_{loc2}h = Z_2h \quad (2.45)$$

$$Z_{out2}h = Z_{li}h + Z_Kh \quad (2.46)$$

$$Z_{in3}h = Z_Ch + Z_{li}h \quad (2.47)$$

$$Z_{loc3}h = Z_3h \quad (2.48)$$

$$Z_{out3}h = Z_{li}h + Z_Jh \quad (2.49)$$

$$Z_{in4}h = Z_Dh + Z_{li}h \quad (2.50)$$

$$Z_{loc4}h = Z_4h \quad (2.51)$$

$$Z_{out4}h = Z_{li}h + Z_Ih \quad (2.52)$$

$$Z_{in5}h = Z_Eh + Z_{li}h \quad (2.53)$$

$$Z_{loc5}h = Z_5h \quad (2.54)$$

$$Z_{out5}h = Z_{li}h + Z_Hh \quad (2.55)$$

$$Z_{in6}h = Z_Fh + Z_{li}h \quad (2.56)$$

$$Z_{loc6}h = Z_6h \quad (2.57)$$

$$Z_{out6}h = Z_{li}h + Z_7h \quad (2.58)$$

$$Z_{in7}h = Z_Gh + Z_{li}h \quad (2.59)$$

$$Z_{loc7}h = Z_7h \quad (2.60)$$

$$Z_{out7}h = \text{INFINITO} \quad (2.61)$$

Onde:

h – Ordem da frequência do harmônico.

$Z_{inn}h, n = 1 \text{ a } 7$ – Impedância vista do poste genérico n até a fonte de alimentação para a frequência do harmônico de ordem h .

$Z_{locn}h, n = 1, \text{ a } 7$ – Impedância equivalente das cargas do poste genérico n para a frequência do harmônico de ordem h .

$Z_{outn}h, n = 1 \text{ a } 7$ – Impedância vista do poste genérico n até o final da rede de distribuição para a frequência do harmônico de ordem h .

As impedâncias deverão ser calculadas para cada ordem “ h ” da frequência fundamental, conforme a seguir:

$$X_{Lh} = 2.\pi.h.f.L \quad (2.62)$$

$$X_{Ch} = \frac{1}{2.\pi.h.f.C} \quad (2.63)$$

Onde:

X_{Lh} – Reatância indutiva na frequência do harmônico de ordem h para uma carga de indutância L .

X_{Ch} – Reatância capacitiva na frequência do harmônico de ordem h para uma carga de capacitância C .

f – Frequência fundamental da rede, que no caso do Brasil é de 60 Hz.

h – Ordem do harmônico que se deseja obter as reatâncias.

A figura 2.14 mostra o gráfico da tensão eficaz de saída de um transformador abaixador com núcleo de ferro em função da frequência [5].

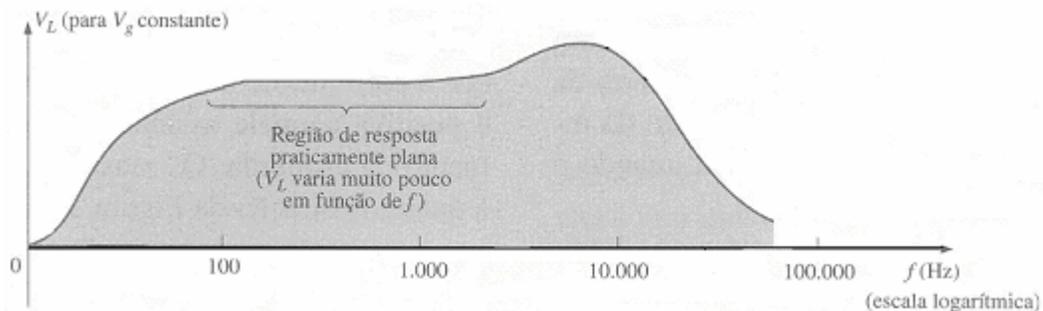


Figura 2.14 – Resposta em frequência típica de um transformador com núcleo de ferro.

Observa-se através do gráfico que a tensão de saída (V_L) fica praticamente constante para frequências entre 50 Hz e 5 kHz. Portanto, para este estudo pode-se considerar as indutâncias de dispersão do transformador constantes, ou seja, independentes da frequência.

A capacitância do banco de capacitores, a indutância e a resistência da linha também serão consideradas invariáveis com a frequência para efeito da análise harmônica.

Quando as cargas não lineares forem do tipo fonte de corrente, pode-se melhorar o espectro harmônico de uma rede de distribuição secundária, ou seja, diminuir o THD (Taxa de Distorção Harmônica) através da inserção de filtros de harmônicos. O uso de filtros passivos em paralelo com as cargas, para as duas ou três frequências mais baixas e um filtro passa alta para as outras frequências maiores do espectro harmônico da rede, ou ainda filtros ativos, ligados em série ou paralelo com as cargas, podem corrigir as distorções harmônicas.

Para efeito da melhoria do nível de tensão eficaz, que é o objetivo deste trabalho, o harmônico mais problemático é o de terceira ordem, pois este não se anula no neutro do secundário do transformador de distribuição, sendo referido para o primário, onde fica preso no delta que é usualmente empregado no lado de alta tensão do transformador.

Se as cargas não lineares forem desequilibradas, os outros componentes também não se anulam, o que causa as distorções de tensão mostradas na figura 2.12.

Pode-se diminuir a queda de tensão de terceiro harmônico, melhorando o nível de tensão na rede de distribuição, e também diminuindo a distorção da onda de tensão, através da inserção de um filtro passivo de terceiro harmônico instalado no primeiro poste da rede de distribuição. Isso reduz também a perda de energia pela circulação de terceiro harmônico no transformador.

O filtro passivo de terceiro harmônico é composto de um capacitor em série com um indutor de modo que na frequência da rede (60 Hz) o filtro se comporta como uma impedância alta e que na frequência do terceiro harmônico (180 Hz) a impedância seja aproximadamente igual a zero para que o filtro absorva toda a corrente de terceiro harmônico, diminuindo as quedas de tensão e as distorções na rede de distribuição. Pode-se ainda melhorar o nível de tensão da rede de distribuição fazendo com que na frequência de 60 hertz o filtro tenha uma impedância capacitiva, tal que forneça a quantidade de reativos solicitada pela rede de distribuição. Na figura 2.15, temos um filtro passivo com capacitância C e Indutância L, sendo a resistência R igual à soma das resistências internas do capacitor e indutor.

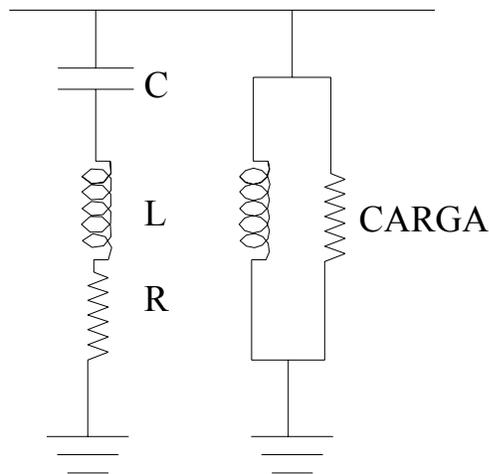


Figura 2.15 – Filtro passivo ligado em paralelo com uma carga.

A utilização de filtros passivos, embora prevista no programa implementado em MATLAB, não foi objeto de estudo neste trabalho.

2.9 – Representação em por unidade (pu)

Todas as grandezas dos circuitos podem ser representadas em por unidade (pu). Para efetuar esta transformação utilizam-se como base os valores nominais do transformador. A tensão base é igual à tensão de fase nominal da rede secundária de distribuição, e a potência base é a potência aparente monofásica do transformador da rede de distribuição.

A impedância base é dada por:

$$Z_b = \frac{V_{Fb}^2}{S_b} \cdot 1000 \quad (2.64)$$

Onde:

Z_b – Impedância base em ohms.

S_b – Potência base em kVA por fase.

V_{Fb} – Tensão de fase base em volts.

A corrente base é dada por:

$$I_b = \frac{S_b}{V_{Fb}} \cdot 1000 \quad (2.65)$$

Onde:

I_b – Corrente de linha base em ampères.

V_{Fb} – Tensão de fase base em volts.

3 – IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DO MODELO

3.1 – Implementação em ambiente Matlab

O modelo da rede de distribuição foi implementado em ambiente Matlab, considerando uma rede de distribuição genérica, onde é possível especificar as seguintes grandezas:

- Para a rede de distribuição:
 - Quantidade de postes.
 - Tipo dos cabos.
 - Distância entre postes.

- Para o transformador da rede de distribuição:
 - Potência aparente.
 - Indutâncias e resistências do primário, secundário e magnetização.
 - Tensão eficaz de entrada.

- Para o filtro passivo de harmônico:
 - Impedâncias do filtro passivo.
 - Ordem do harmônico a ser filtrado.
 - Potência reativa a ser inserida na rede pelo filtro.

- Para a fonte de alimentação:
 - Tensão de alimentação.
 - Frequência da rede.
 - Impedâncias da rede de alta tensão.

- Para as cargas em cada poste:
 - Potência aparente em cada poste.
 - Fator de deslocamento em cada poste.

Pode-se, ainda, analisar as seguintes questões:

- Para as harmônicas:
 - Qual a ordem do harmônico a ser estudado.
 - Relação entre impedâncias com e sem banco de capacitores.
 - Tensão de alimentação da rede de distribuição possuindo conteúdo harmônico.
 - Cargas não lineares modeladas como fonte de corrente.
 - Inserção de impedância de correção harmônica.

- Para o uso ou não de banco de capacitores para correção de tensão eficaz:
 - Mudança da capacitância base de composição dos bancos de capacitores.
 - Quais tensões a serem calculadas sem e com inserção de capacitores.
 - Quais e quantos níveis de capacitores devem ser inseridos para a correção de tensão eficaz.
 - Inserção ou não de impedância de correção harmônica em série com o banco de capacitores.

3.1.1 – Entrada de dados

- Dados da fonte de alimentação.
 - Tensão elétrica em pu.
 - Frequência elétrica em Hertz.
 - Resistência da fonte até a entrada do transformador de distribuição em ohm.
 - Indutância da fonte até a entrada do transformador de distribuição em Henry.

- Dados do transformador de distribuição.
 - Potência aparente nominal em kVA por fase.
 - Tensão eficaz no primário do transformador.
 - Tensão eficaz no secundário do transformador.
 - Resistência do primário do transformador em pu.
 - Indutância do primário do transformador em pu.
 - Resistência do secundário do transformador em pu.
 - Indutância do secundário do transformador em pu.
 - Resistência de perdas no núcleo do transformador em pu.
 - Indutância do ramo de magnetização do transformador em pu.

- Dados da rede de distribuição.
 - Resistência dos cabos elétricos em Ohms por quilômetro.
 - Indutância dos cabos elétricos em Henry por quilômetro.
 - Distância entre os postes em quilômetros.
 - Número de postes da rede de distribuição (5, 6 ou 7).

- Dados do filtro de harmônico.
 - Capacitância do filtro em Faraday.
 - Indutância do filtro em Henry.
 - Potência reativa fornecida pelo filtro.
- Dados para análise harmônica.
 - Ordem da frequência do harmônico a ser analisado.
- Dados do banco de capacitores.
 - Capacitância de cada unidade do banco em Faraday.
- Dados das cargas em cada poste.
 - Potência aparente.
 - Fator de deslocamento.

3.1.2 – Descrição do programa

Os itens a seguir descrevem cada parte do programa implementado em Matlab, destacando os principais passos. O programa completo encontra-se no anexo A deste trabalho.

3.1.2.1 – Cálculo das impedâncias de carga em cada poste.

As cargas em cada poste são representadas por matrizes de potência ativa e reativa por fase, calculadas a partir de dois vetores de doze posições com valores de potência aparente e fator de deslocamento. Os vetores de potência aparente e fator de deslocamento são preenchidos de acordo com a necessidade da análise a ser feita, tendo como valor mínimo a potência do transformador a vazio e como valor máximo a potência nominal multiplicada pelo fator de serviço do transformador, e fatores de deslocamento podendo variar entre zero e um. A matriz de potência ativa é calculada pela multiplicação do vetor de potência aparente pelo vetor de fator de deslocamento, gerando uma matriz de doze por doze em cada poste. A seguir é mostrada a matriz de potência ativa para o poste um em kW.

$$\begin{pmatrix} 3,50 & 4,25 & 3,50 & 4,59 & 3,75 & 4,25 & 4,25 & 3,50 & 3,75 & 4,75 & 4,00 & 4,50 \\ 1,75 & 2,12 & 1,75 & 2,25 & 1,87 & 2,12 & 2,12 & 1,75 & 1,87 & 2,37 & 2,00 & 2,25 \\ 1,75 & 2,12 & 1,75 & 2,25 & 1,87 & 2,12 & 2,12 & 1,75 & 1,87 & 2,37 & 2,00 & 2,25 \\ 1,75 & 2,12 & 1,75 & 2,25 & 1,87 & 2,12 & 2,12 & 1,75 & 1,87 & 2,37 & 2,00 & 2,25 \\ 4,90 & 5,95 & 4,90 & 6,30 & 5,25 & 5,95 & 5,95 & 4,90 & 5,25 & 6,65 & 5,60 & 6,30 \\ 4,37 & 5,31 & 4,37 & 5,62 & 4,68 & 5,31 & 5,31 & 4,37 & 4,68 & 5,93 & 5,00 & 5,62 \\ 1,75 & 2,12 & 1,75 & 2,25 & 1,87 & 2,12 & 2,12 & 1,75 & 1,87 & 2,37 & 2,00 & 2,25 \\ 3,50 & 4,25 & 3,50 & 4,50 & 3,75 & 4,25 & 4,25 & 3,50 & 3,75 & 4,75 & 4,00 & 4,50 \\ 5,25 & 6,37 & 5,25 & 6,75 & 5,62 & 6,37 & 6,37 & 5,25 & 5,62 & 7,12 & 6,00 & 6,75 \\ 0,87 & 1,06 & 0,87 & 1,12 & 0,93 & 1,06 & 1,06 & 0,87 & 0,93 & 1,18 & 1,00 & 1,12 \\ 1,75 & 2,12 & 1,75 & 2,25 & 1,87 & 2,12 & 2,12 & 1,75 & 1,87 & 2,37 & 2,00 & 2,25 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{pmatrix}$$

A matriz de potência reativa é calculada pela multiplicação do vetor de potência aparente pelo seno do ângulo relativo ao vetor de fator de deslocamento, gerando uma matriz de doze por doze em cada poste. A seguir é mostrada a matriz de potência reativa para o poste um em kVAr.

$$\begin{pmatrix} 1,65 & 1,65 & 0,78 & 1,50 & 1,31 & 0,78 & 1,08 & 1,78 & 1,31 & 1,65 & 1,78 & 1,78 \\ 3,30 & 3,30 & 1,56 & 3,00 & 2,63 & 1,56 & 2,17 & 3,57 & 2,63 & 3,30 & 3,57 & 3,57 \\ 1,65 & 1,65 & 0,78 & 1,50 & 1,31 & 0,78 & 1,08 & 1,78 & 1,31 & 1,65 & 1,78 & 1,78 \\ 4,96 & 4,96 & 2,34 & 4,50 & 3,95 & 2,34 & 3,26 & 5,35 & 3,95 & 4,96 & 5,35 & 5,35 \\ 1,98 & 1,98 & 0,93 & 1,80 & 1,58 & 0,93 & 1,30 & 2,14 & 1,58 & 1,98 & 2,14 & 2,14 \\ 1,65 & 1,65 & 0,78 & 1,50 & 1,31 & 0,78 & 1,08 & 1,78 & 1,31 & 1,65 & 1,78 & 1,78 \\ 1,65 & 1,65 & 0,78 & 1,50 & 1,31 & 0,78 & 1,08 & 1,78 & 1,31 & 1,65 & 1,78 & 1,785 \\ 2,97 & 2,97 & 1,40 & 2,70 & 2,37 & 1,40 & 1,96 & 3,21 & 2,37 & 2,97 & 3,21 & 3,21 \\ 3,30 & 3,30 & 1,56 & 3,00 & 2,63 & 1,56 & 2,17 & 3,57 & 2,63 & 3,30 & 3,57 & 3,57 \\ 1,98 & 1,98 & 0,93 & 1,80 & 1,58 & 0,93 & 1,30 & 2,14 & 1,58 & 1,98 & 2,14 & 2,14 \\ 4,96 & 4,96 & 2,34 & 4,50 & 3,95 & 2,34 & 3,26 & 5,35 & 3,95 & 4,96 & 5,35 & 5,35 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{pmatrix}$$

A diversidade de valores de potência e fator de deslocamento atribuídos a cada barra (poste), associados no circuito secundário de forma a nunca superar a máxima potência do transformador, que é dada pelo produto do fator de serviço e a potência nominal, proporciona a análise de todas as combinações possíveis de carga passiva. Dos resultados obtidos podem-se visualizar os piores casos do estudo.

A matriz de impedâncias complexas na forma retangular de carga em cada poste é calculada a partir das matrizes de potência ativa e reativa e transformada em pu através da divisão pela impedância base, gerando uma matriz de carga (impedâncias), de modo que cada posição desta matriz simula uma situação de carga. Como a matriz gerada é de 12 x 12, temos 144 diferentes situações de carga em cada poste. A seguir o programa efetua o cálculo das associações das impedâncias para simplificar o circuito e facilitar o cálculo das tensões e correntes em cada poste.

3.1.2.2 – Cálculo das tensões e correntes em cada poste.

A segunda parte do programa efetua os cálculos das correntes e tensões em cada poste, sem inserção de banco de capacitores para controle de tensão eficaz. Primeiro são calculadas as correntes através das impedâncias simplificadas e da tensão eficaz do poste anterior. Em seguida é calculada a tensão no poste em análise, através das impedâncias simplificadas e da corrente naquele poste, fechando os cálculos no último poste.

Todas as correntes e tensões são calculadas como um número complexo na forma retangular em função da tensão de entrada da rede de distribuição em pu. Em seguida são calculados os valores eficazes de correntes e tensões e, se necessário, é possível, através de comandos simples, determinar o ângulo de cada corrente ou tensão em relação ao ângulo da tensão de entrada.

3.1.2.3 – Cálculo dos capacitores para correção da tensão eficaz

O banco de capacitores para correção da tensão eficaz localizado no último poste da rede de distribuição é composto por três conjuntos de associações em paralelo de capacitores de 127 volts, que é o valor nominal da tensão eficaz fase neutro adotada neste trabalho. O motivo de se usar 3 conjuntos de bancos capacitivos é que exige do sistema de controle a utilização de apenas 2 bits, e o resultado mostrou ser adequado.

Pode-se trabalhar matematicamente a equação 2.9 de modo a se obter:

$$I_c = \frac{V_{nf} - V_{ni}}{X_L} \quad (3.1)$$

A capacitância do banco de capacitores pode ser calculada por:

$$X_C = \frac{V_{CN}}{I_C} \quad (3.2)$$

$$Q_C = \frac{(V_{CN})^2}{X_C} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} \quad (3.4)$$

Onde:

I_c – Corrente total do banco de capacitores.

V_{nf} – Tensão eficaz no poste n após a inserção do banco de capacitores.

V_{ni} – Tensão eficaz no poste n antes da inserção do banco de capacitores.

X_L – Reatância indutiva a ser percorrida pela corrente I_c (da fonte até o poste de conexão do banco de capacitores).

X_C – Reatância capacitiva do banco de capacitores.

Q_C – Potência reativa do banco de capacitores.

V_{CN} – Tensão nominal do banco de capacitores.

C – Capacitância do banco de capacitores.

f – Frequência fundamental da rede elétrica.

Após definidos os conjuntos de capacitores a serem inseridos para cada situação de carga, as correntes e tensões em cada poste são calculadas da mesma maneira que no item 3.1.2.2 substituindo a impedância do último poste pela associação em paralelo da impedância de carga do último poste com a impedância do banco de capacitores.

De acordo com a análise a ser feita, os valores de tensão eficaz para conexão/desconexão do banco de capacitores podem ser ajustados pelo usuário. O valor de desconexão do banco de capacitores deve ser ajustado de forma a evitar que a tensão no primeiro poste suba acima dos valores permitidos pela ANEEL, e deve ser estimado em função da tensão no último poste, uma vez que só ali é efetuada a medição de tensão eficaz.

Neste trabalho adota-se que toda vez que a tensão eficaz no último poste da rede for inferior a 0.935 pu, que corresponde a 118.7 volts, haverá a inserção automática de um conjunto de capacitores para aumentar a tensão eficaz. Se a tensão no último poste permanecer inferior ao valor especificado haverá inserção de novo conjunto de capacitores e assim por diante até o limite de três conjuntos. Se a tensão no último poste da rede for superior ao valor especificado não haverá inserção dos conjuntos de capacitores. Se a tensão eficaz no poste de conexão do banco de capacitores ultrapassar 0,97 pu, que corresponde a 123,2 Volts, e se há bancos de capacitores conectados, eles são desligados até a tensão eficaz cair abaixo deste valor.

3.1.2.4 Análise harmônica

Na rede de distribuição podem ocorrer problemas de amplificação harmônica devidos à ressonância entre os capacitores e as indutâncias da rede e do transformador.

Na implementação do programa em Matlab foram previstos dois tipos de cálculos para análise harmônica. No primeiro, são calculadas as tensões harmônicas em cada poste, da mesma maneira que no item 3.1.2.2, considerando que a fonte de alimentação fornece uma componente harmônica de ordem “h”, a qual se deseja fazer a análise, sendo que todas as impedâncias são calculadas para a frequência “h” multiplicada pela frequência fundamental da fonte de alimentação. No segundo, para cada poste individualmente, são calculadas com e sem o banco de capacitores inserido: a impedância de carga do poste, a impedância equivalente deste poste até a fonte de alimentação e a impedância equivalente deste poste até o final da rede, com a ordem harmônica variando de 1 a qualquer valor desejado.

Além destes cálculos pode-se acrescentar ou não, à escolha de quem irá analisar o comportamento dos harmônicos na rede de distribuição, uma impedância de correção harmônica em série com o banco de capacitores para dessintonizar a ressonância, evitando amplificações.

Através destes cálculos é possível fazer a análise harmônica da rede de distribuição sem e com capacitores inseridos para qualquer harmônico presente na rede, seja oriundo da fonte de alimentação ou devido a cargas não lineares instaladas na rede.

3.2 – Implementação em ambiente Simulink

As cargas não lineares tipo fonte de tensão (retificadores com filtros capacitivos na saída) não têm ainda um modelo matemático com equações bem definidas. Para se efetuar uma análise das influências deste tipo de carga ligada à rede de distribuição é necessário o uso de ferramentas computacionais que trabalhem com modelos não lineares, como por exemplo o Simulink. As simulações efetuadas nesta fase do trabalho foram utilizadas também para comprovar os resultados obtidos na implementação em Matlab.

O modelo implementado em ambiente Simulink considerando uma rede de distribuição com cinco postes, é mostrado na figura 3.1.

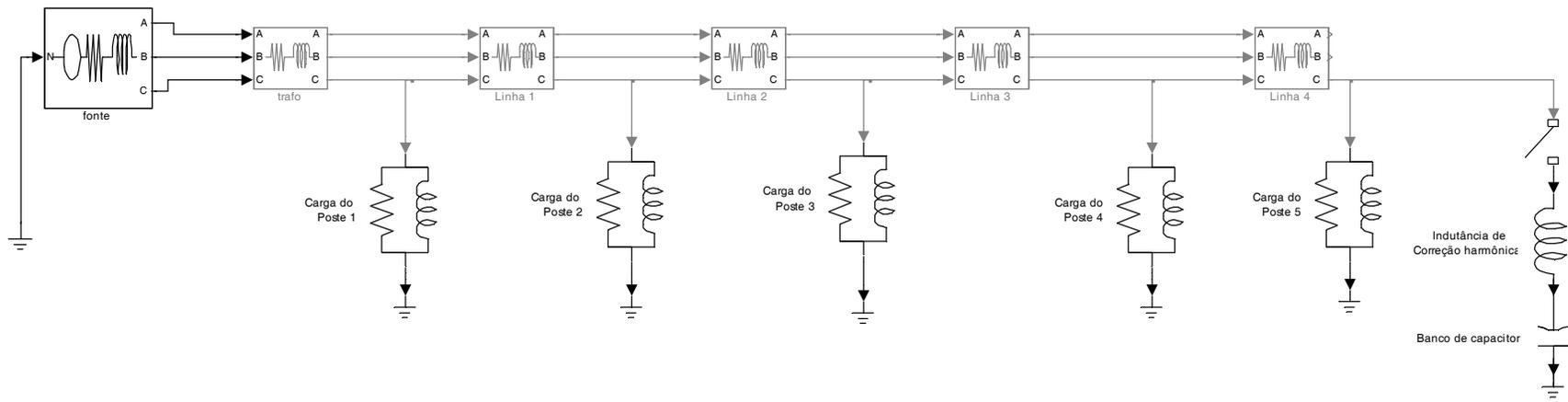


Figura 3.1 – Modelo da rede de distribuição com cinco postes, cargas lineares, banco de capacitores e impedância de correção harmônica

O modelo mostrado está sem carga elétrica e o transformador foi substituído por uma impedância série dada pela soma das impedâncias do primário referida ao secundário do transformador e a impedância do secundário do transformador, pois a impedância de magnetização não foi considerada nos cálculos por ser muito maior que as impedâncias do sistema.

A vantagem no uso do Simulink é a fácil implementação de cargas não lineares na rede de distribuição para análise do comportamento harmônico das tensões e correntes em cada poste, especialmente cargas com comportamento fonte de corrente.

Como a maioria dos aparelhos eletro-eletrônicos utilizados nos dias de hoje são alimentados por retificadores monofásicos de onda completa, e eles não se comportam como fonte de corrente, seu modelamento matemático é ainda desconhecido. A corrente absorvida da rede de distribuição por estes retificadores depende da impedância (especialmente a reatância) equivalente da rede no ponto de conexão[6]. Assim, a análise de sua influência no sistema só é viável por verificação em Simulink. O seu circuito geral empregado em simulação neste trabalho é aquele visto na figura 3.2.

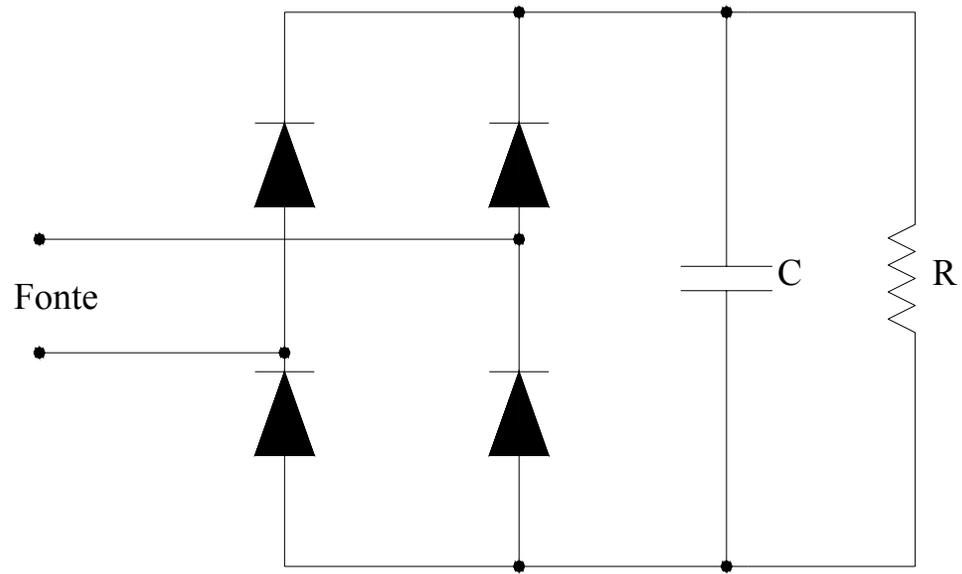


Figura 3.2 – Retificador monofásico de onda completa alimentando uma carga (modelo do Simulink).

4 – RESULTADOS OBTIDOS

Tanto no programa em Matlab como na simulação em Simulink existem diversas possibilidades de análise. Neste trabalho são mostrados exemplos de algumas situações comuns encontradas em redes de distribuição secundária, observadas nas concessionárias de fornecimento de energia elétrica.

4.1 – Modelo da rede de distribuição implementado em Matlab

A rede de distribuição analisada neste exemplo é composta por cinco postes e é alimentada através de um transformador trifásico com tensão de linha de 13,8 kV para 220 V. As características do sistema estão apresentadas na tabela 4.1 abaixo:

Tabela 4.1

Dados do circuito elétrico da rede de distribuição

Potência aparente nominal por fase	25 kVA
Tensão nominal do primário do transformador	13,8 kV
Tensão nominal do secundário do transformador	220 V
Resistência do primário do transformador em pu	0,0076 pu
Indutância do primário do transformador em pu	0,016 pu
Resistência do secundário do transformador em pu	0,0076 pu
Indutância do secundário do transformador em pu	0,016 pu
Resistência do ramo de magnetização do transformador em pu	62 pu
Indutância do ramo de magnetização do transformador em pu	227 pu
Fator de serviço	1,15
Resistência por quilômetro do cabo utilizado na linha de distribuição	0,2665 Ω /km
Indutância por quilômetro do cabo utilizado na linha de distribuição	0.0030 H/km
Distância entre postes da rede de distribuição	40 m

A corrente nominal do transformador é a própria corrente de base, que pode ser calculada utilizando a equação 2.64, conforme abaixo:

$$I_N = \frac{25}{127} \cdot 1000$$

$$I_N = 196,85A$$

Para esta corrente será necessário usar na linha de distribuição um cabo 4/0 AWG. Os valores de resistência e indutância por quilômetro listados na tabela 4.1 foram obtidos nos dados técnicos apresentados no anexo B.

Como existe uma variedade muito grande de resultados, neste trabalho apresentam-se somente aqueles mais expressivos, considerando que o transformador trabalha com cargas variando desde a vazio, até no máximo quinze por cento de sobrecarga (1,15 pu). Assume-se sempre que o sistema esteja operando em regime permanente.

Os gráficos mostrados neste item são em função das cargas nos postes 1, 2, 3, 4 e 5. As diferentes situações de carga foram implementadas considerando:

- 10 % da carga da rede de distribuição instalada no poste 1.
- 25 % da carga da rede de distribuição instalada no poste 2.
- 20 % da carga da rede de distribuição instalada no poste 3.
- 20 % da carga da rede de distribuição instalada no poste 4.
- 25 % da carga da rede de distribuição instalada no poste 5.

As cargas em todos os postes foram consideradas com fator de deslocamento médio constante de 0,81, exceto onde seja apresentado outro valor.

4.1.1 – Tensões eficazes

Nesta seção são mostrados os resultados de tensões eficazes com e sem controle por inserção de banco de capacitores. Foi utilizada a rotina desenvolvida em MATLAB descrita na seção 3.1 e listada no anexo A. Para se fazer uma análise do comportamento da tensão eficaz da rede de distribuição, são mostrados os resultados para os postes 1, 3 e 5, que são os postes do início, meio e fim do alimentador secundário.

Os gráficos das figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram as tensões eficazes nos postes 1, 3 e 5 da rede de distribuição. Ao longo do eixo X o ponto de tensão igual a 1 pu é para o transformador a vazio e o pontos de menor tensão representam o transformador a plena carga.

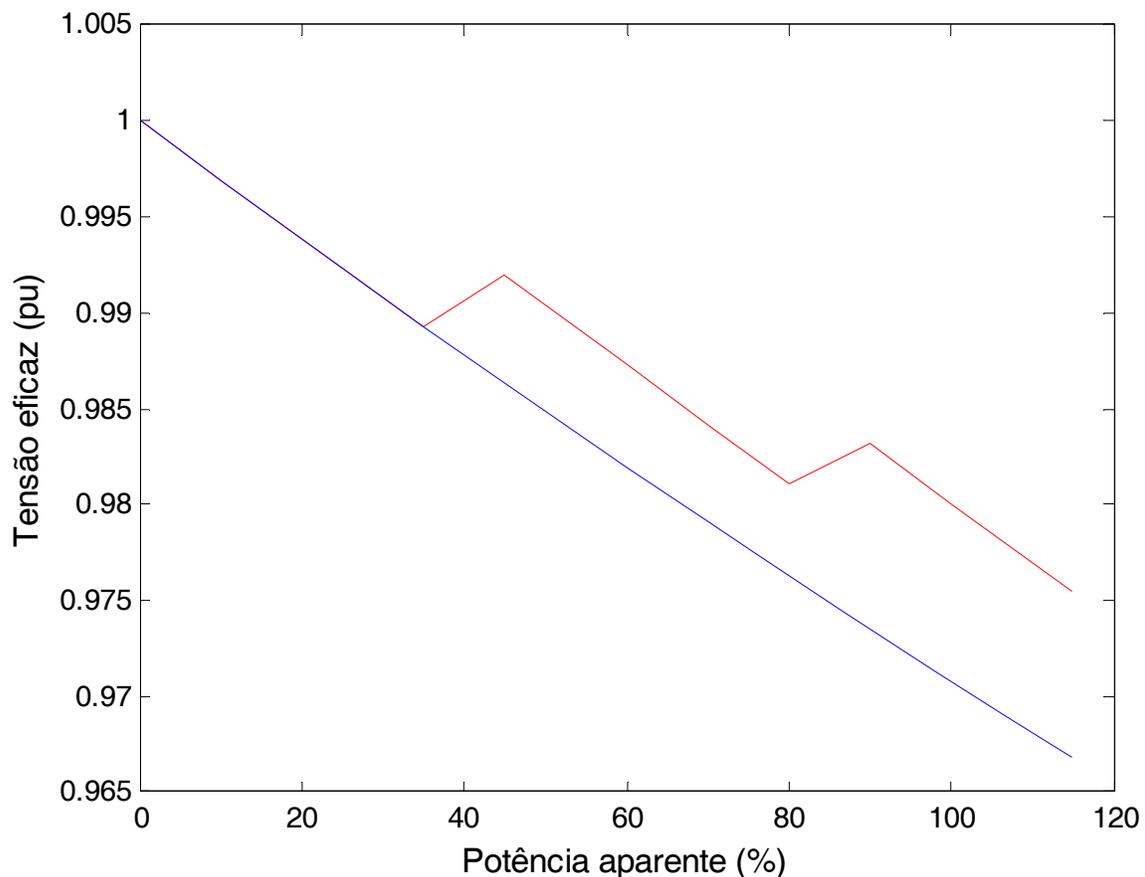


Figura 4.1 – Tensão eficaz no poste um com e sem inserção de banco de capacitores.

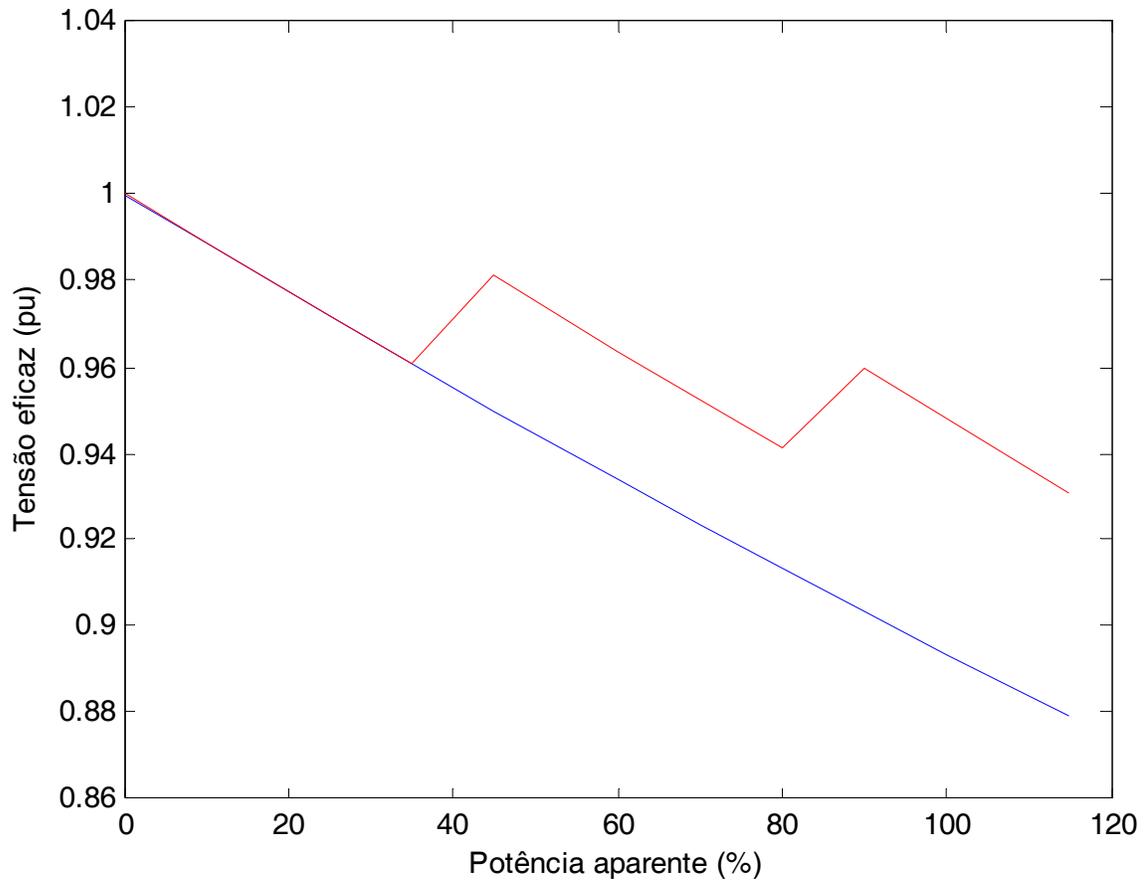


Figura 4.2 – Tensão eficaz no poste três com e sem inserção de banco de capacitores.

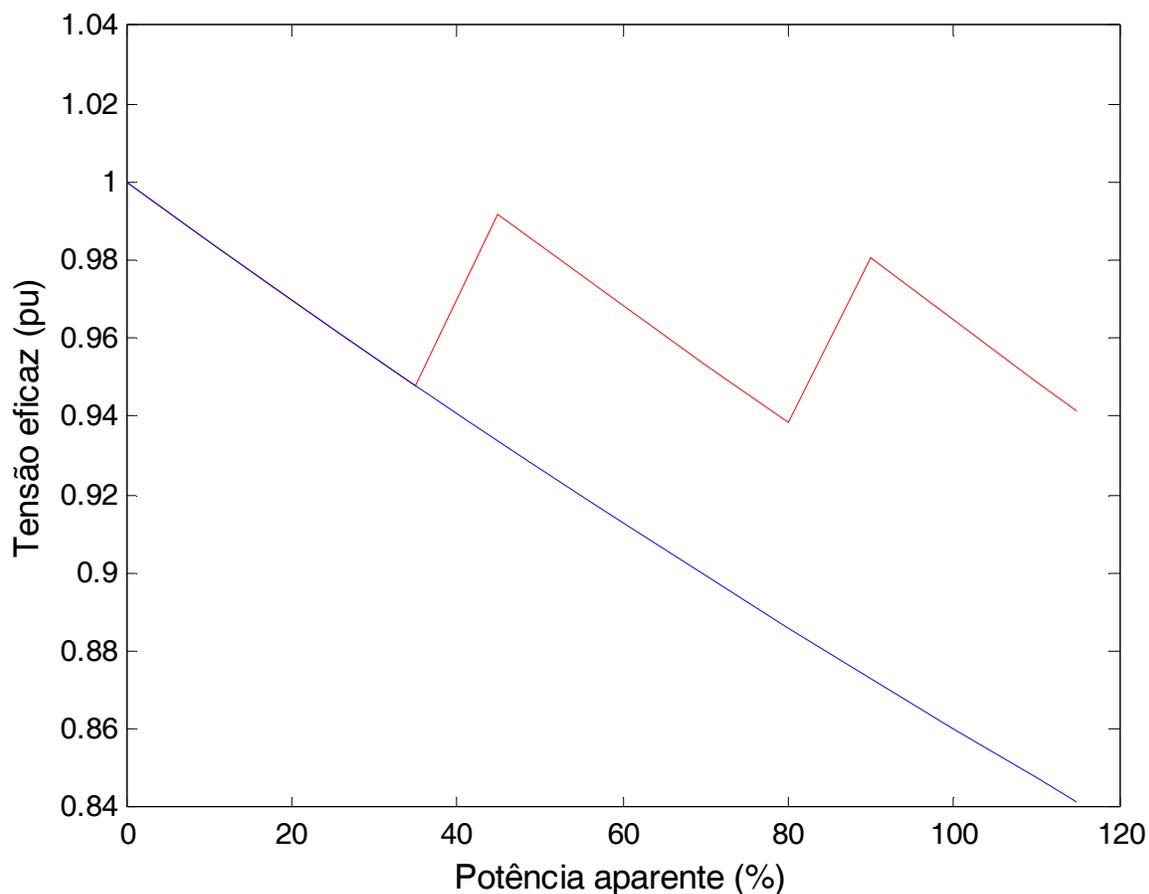


Figura 4.3 – Tensão eficaz no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores.

Analisando as figuras 4.1, 4.2 e 4.3, observa-se que a tensão eficaz sem correção diminui em função das cargas nos postes e da distância dos postes ao transformador, como esperado. Nestes gráficos os pontos de tensão eficaz mais críticos são no poste cinco, o de maior distância em relação ao transformador, e com o transformador operando com sobrecarga de 15 %.

No gráfico anterior, os pontos de menor tensão eficaz estão em torno de 0.84 pu que equivale a 106,7 volts, valor abaixo do mínimo permitido pela resolução 505 da ANEEL que é de 116 volts.

Para melhorar este nível de tensão eficaz são inseridos bancos de capacitores de acordo com o nível de tensão do último poste da rede de distribuição. Os gráficos mostram também que a tensão eficaz aumentou em toda a rede ao inserirmos os bancos de capacitores (curvas superiores). Após a inserção dos bancos de capacitores, os pontos de tensão mais baixa, localizados no poste cinco, variam em torno de 0,94 pu, que equivale a 119,4 volts, valor acima do mínimo permitido pela resolução 505 da ANEEL que é de 116 volts. Já os pontos de tensão eficaz mais alta, localizados no poste um, variam em torno de 0.98 pu, que equivale a 124,5 volts, valor abaixo do máximo permitido pela resolução 505 da ANEEL que é de 132 volt. O efeito é menor no poste 3, mas ainda assim dentro dos limites da resolução.

Além da potência, o fator de deslocamento também influencia na tensão eficaz. O gráfico da figura 4.4 mostra as variações de tensão eficaz no poste cinco com e sem banco de capacitores quando o fator de deslocamento varia de 0.77 a 0.99 (indutivo), com o transformador com a carga máxima.

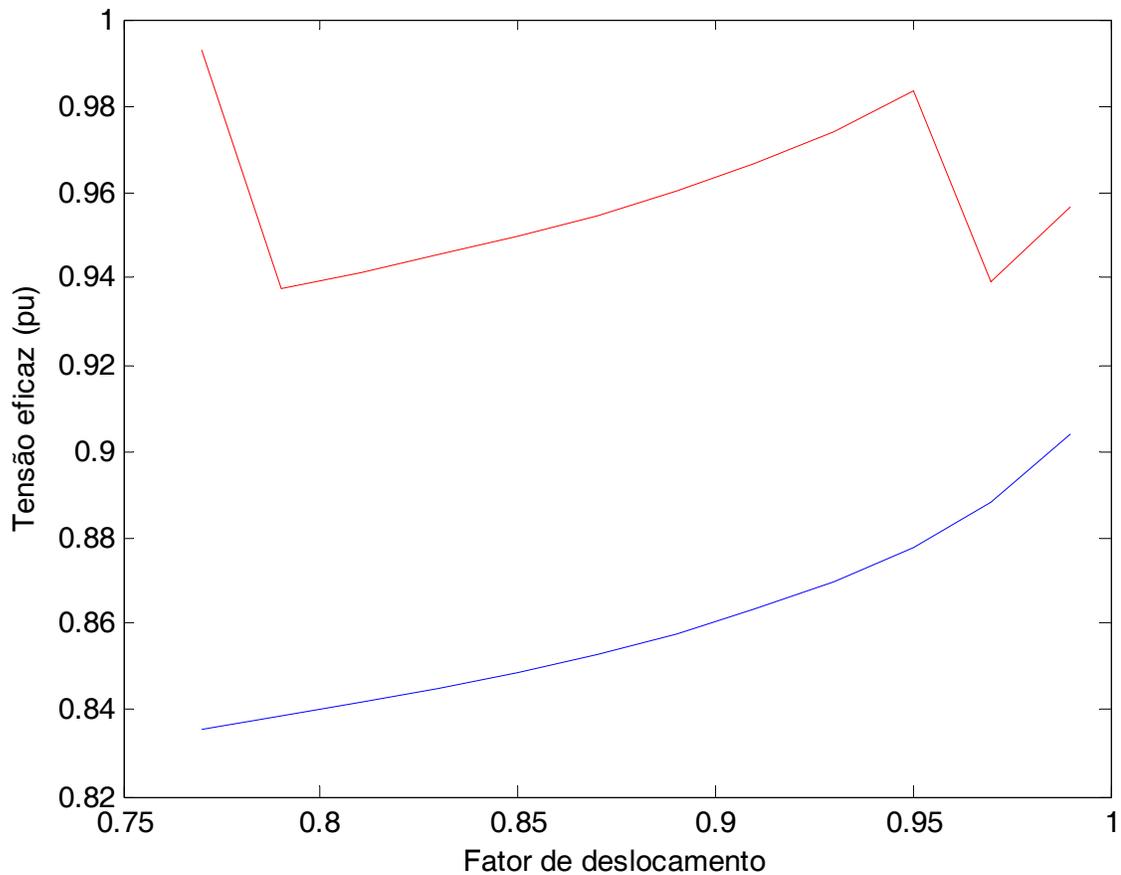


Figura 4.4 – Tensão eficaz no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores com variação do fator de deslocamento.

Analisando a figura 4.4, observa-se que a tensão eficaz aumenta em função do aumento do fator de deslocamento, para a mesma carga. A inserção do banco de capacitores aumenta o nível de tensão eficaz independente do fator de potência das cargas conectadas aos postes. Observa-se que à medida que o fator de deslocamento aumenta, bancos de capacitores podem ser retirados.

4.1.2 – Banco de capacitores

O procedimento adotado para a inserção do banco de capacitores é aquele apresentado na seção 3.1.2.3. Para o alimentador utilizado, considerando a impedância equivalente série da fonte, do transformador e da linha, e considerando que cada banco deve adicionar 0,03 pu de tensão no último poste em três níveis distintos, temos os bancos de capacitores da figura 4.5 inseridos (os capacitores são calculados de acordo com a correção prevista a ser feita na tensão eficaz do último poste, e inseridos em níveis distintos definidos, conforme a necessidade).

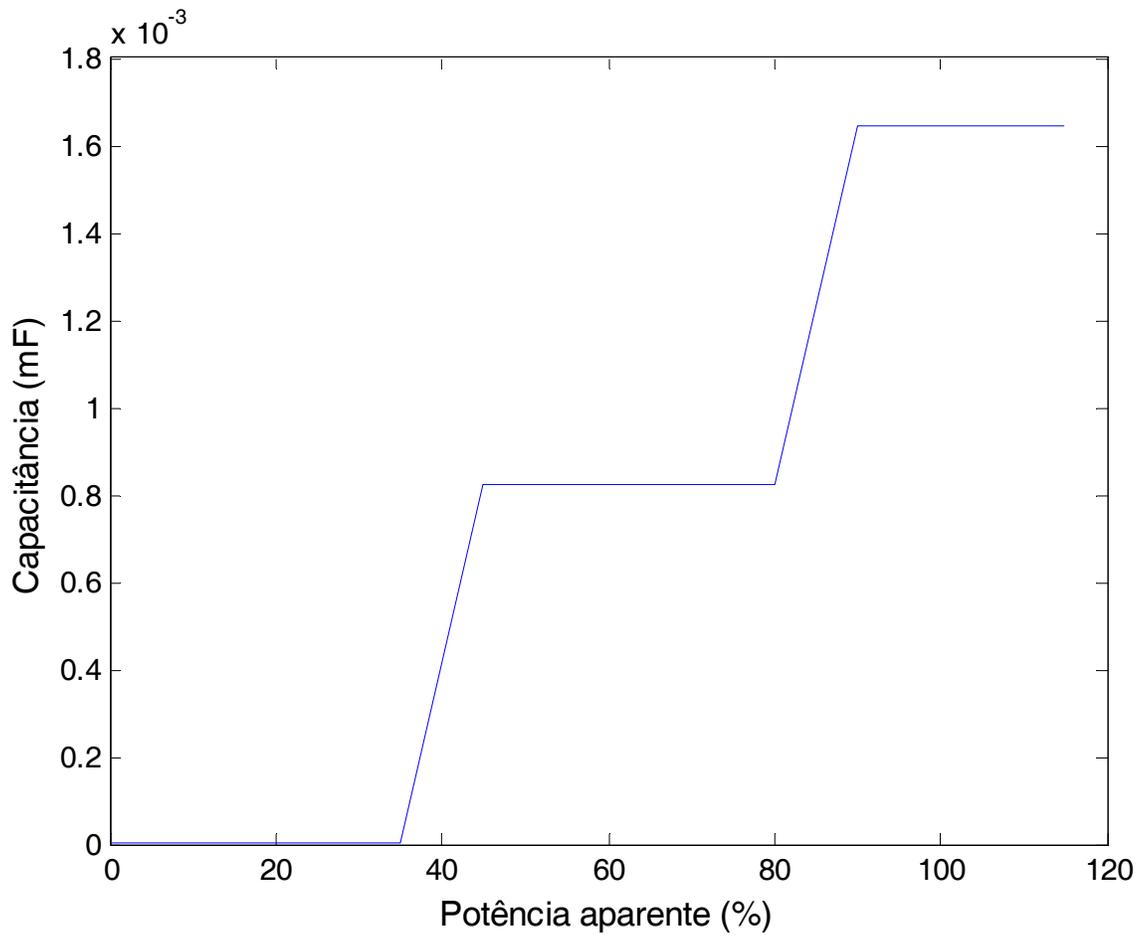


Figura 4.5 – Banco de capacitores a ser instalado no último poste para controle de tensão eficaz.

Os pontos no gráfico iniciam com a capacitância nula, para o transformador trabalhando a vazio, já que não são necessárias correções de tensão, e evoluem os pontos de maior capacitância, em torno de 1,6 mF, que são para o transformador trabalhando bem carregado, até o valor máximo de uma carga 15 % maior que a nominal.

4.1.3 – Harmônicos

Para a análise do comportamento harmônico da tensão da rede de distribuição foram feitas as seguintes considerações:

- A resistência, a indutância e a capacitância dos elementos do circuito foram consideradas constantes para as variações de frequência mostradas.
- Para análise dos harmônicos injetados na rede pela fonte de alimentação do sistema utiliza-se a tensão eficaz harmônica como parâmetro. Injeta-se pela fonte 1 pu de tensão no harmônico de interesse.

Os gráficos das figuras 4.6 e 4.7 mostram as tensões eficazes nos postes um e cinco, respectivamente, com e sem inserção de banco de capacitores em função de uma tensão de terceiro harmônico de 1,0 pu injetada pela fonte de alimentação do sistema para um conjunto de cargas nos postes 1, 2, 3, 4 e 5. Todos os cálculos efetuados no programa em Matlab levam em consideração as variações das impedâncias do sistema com a frequência.

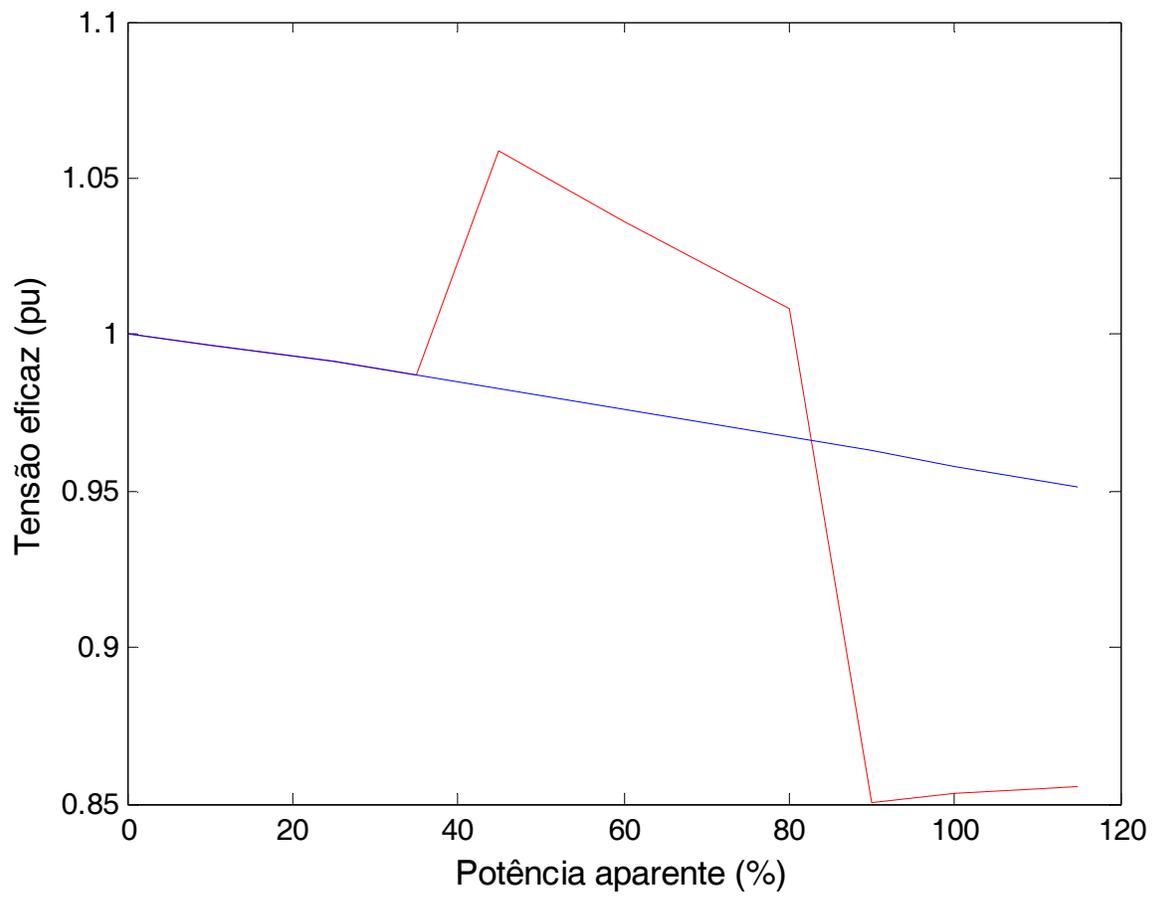


Figura 4.6 – Tensão eficaz de terceiro harmônico no poste um com e sem inserção de banco de capacitores.

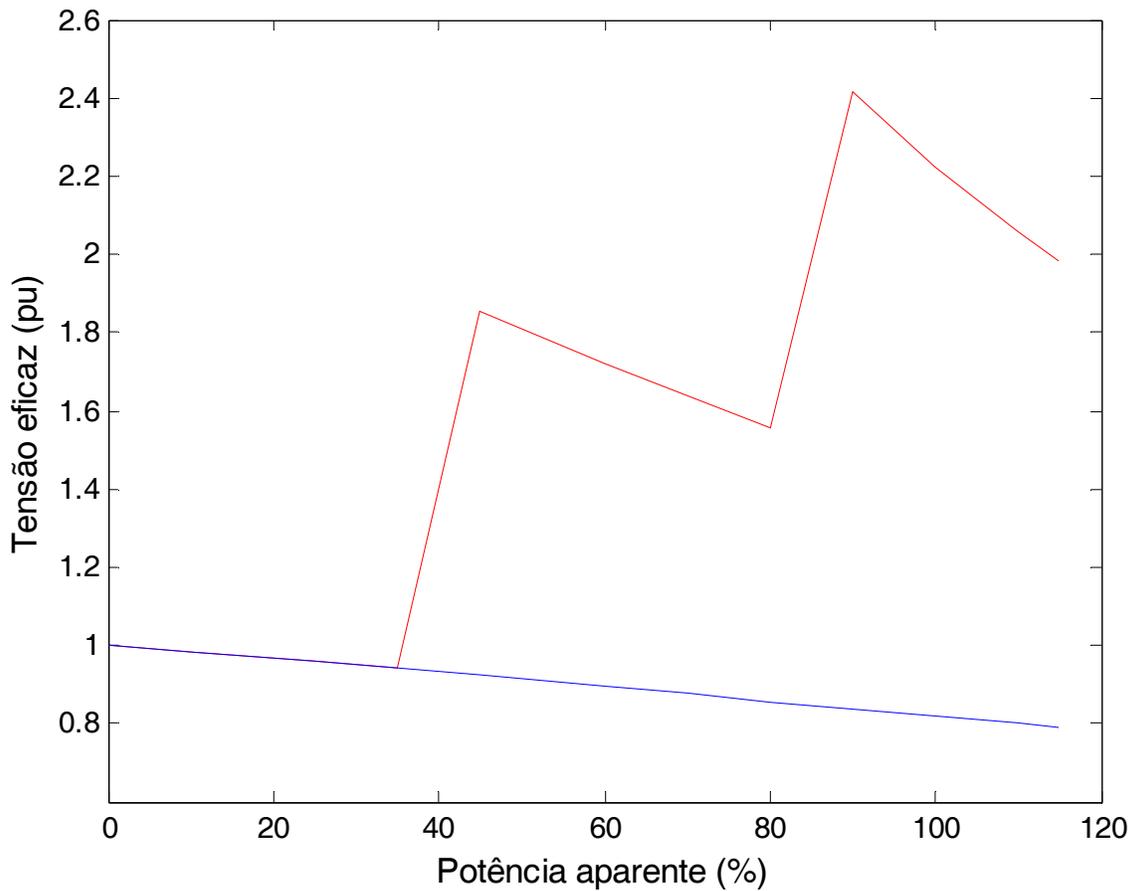


Figura 4.7 – Tensão eficaz de terceiro harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores.

Através destes gráficos pode-se observar que há uma amplificação significativa de tensão eficaz de terceiro harmônico no sistema ao inserirmos os bancos de capacitores.

As figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 mostram a razão entre a tensão eficaz com banco de capacitores inseridos e a tensão eficaz sem banco de capacitores inseridos nos postes 1 e 5 para os harmônicos de ordem 3 e 5, para que se possa fazer uma análise melhor destas amplificações.

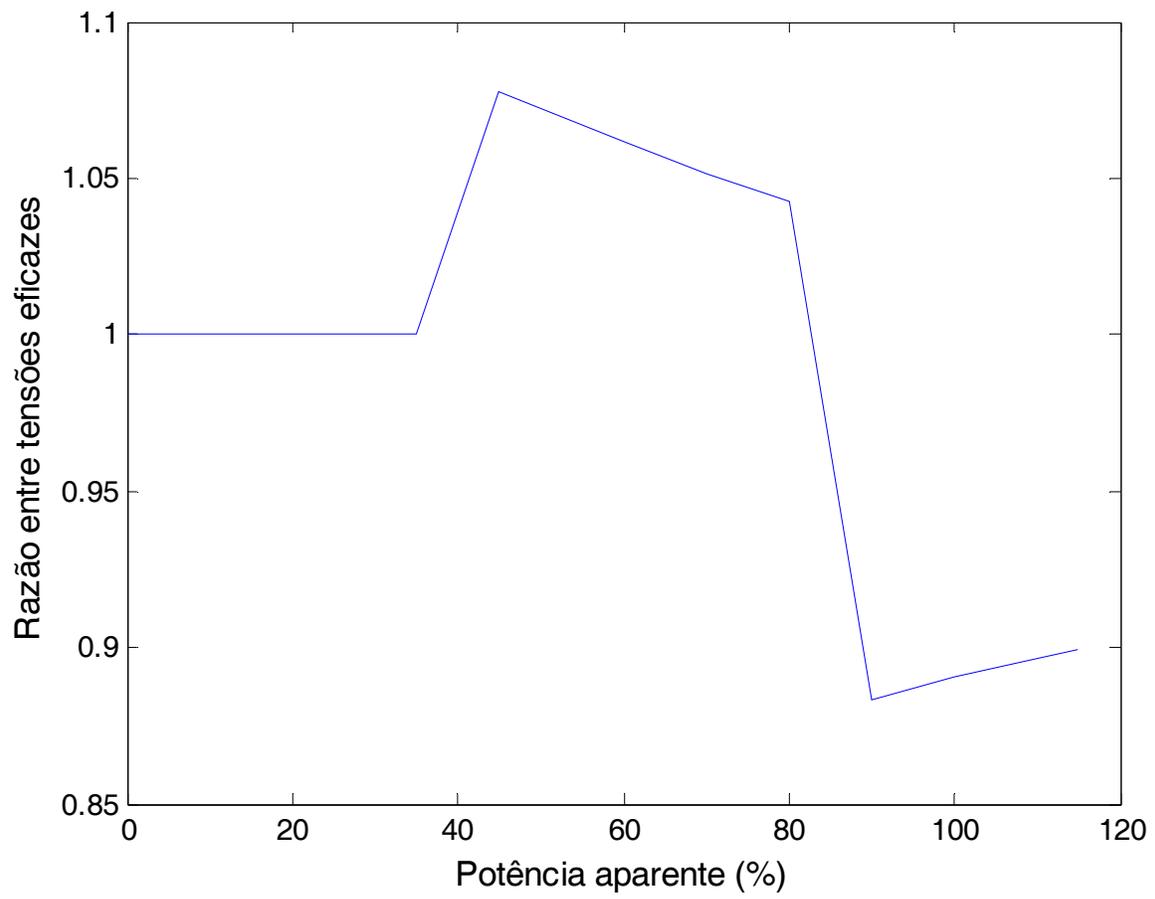


Figura 4.8 – Razão entre as tensões eficazes de terceiro harmônico no poste um com e sem inserção de banco de capacitores.

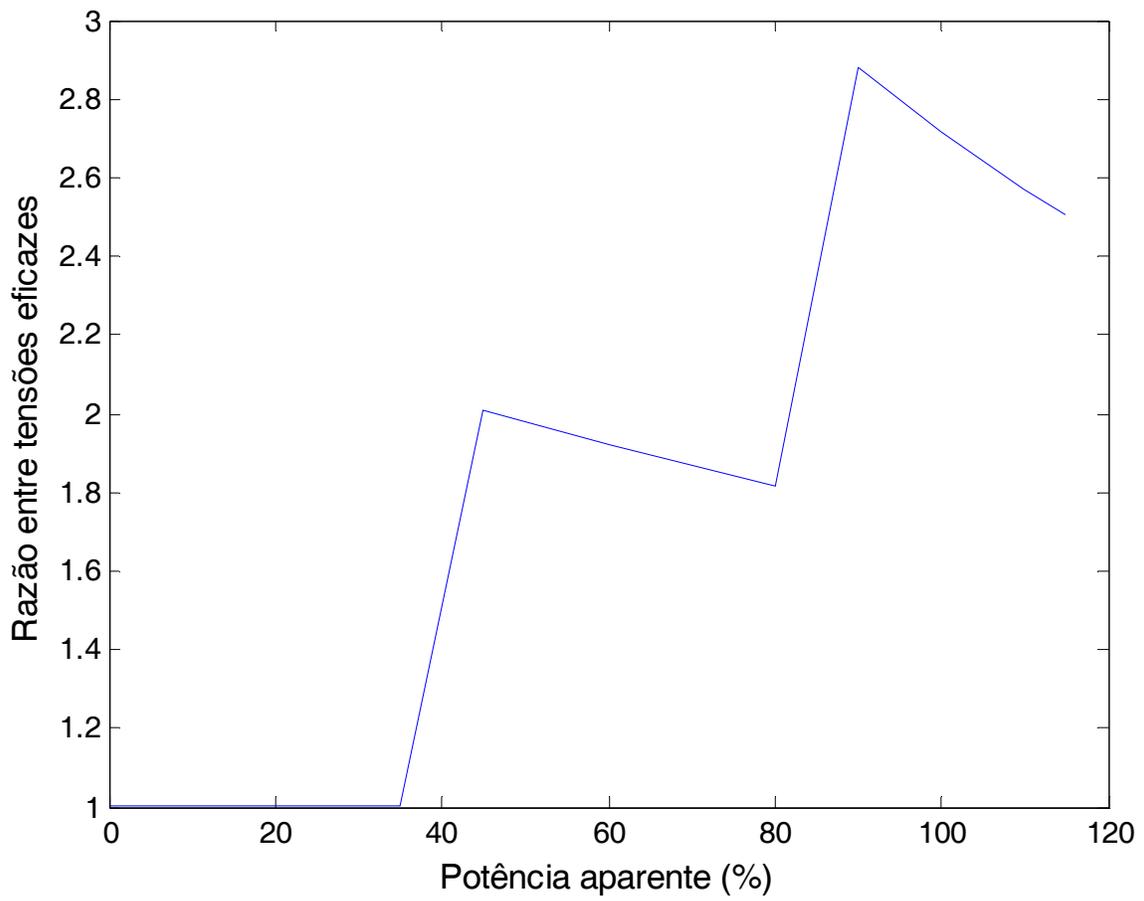


Figura 4.9 – Razão entre as tensões eficazes de terceiro harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores.

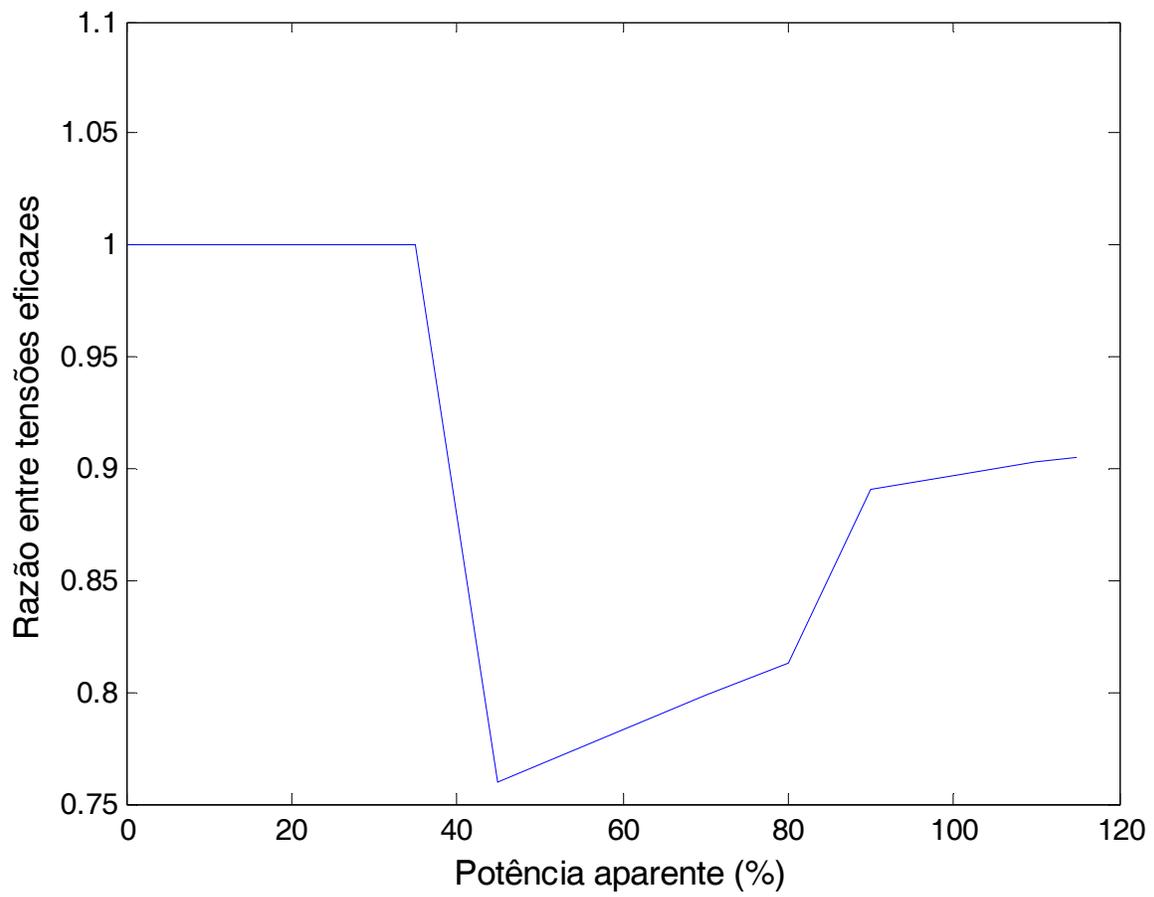


Figura 4.10 – Razão entre as tensões eficazes de quinto harmônico no poste um com e sem inserção de banco de capacitores.

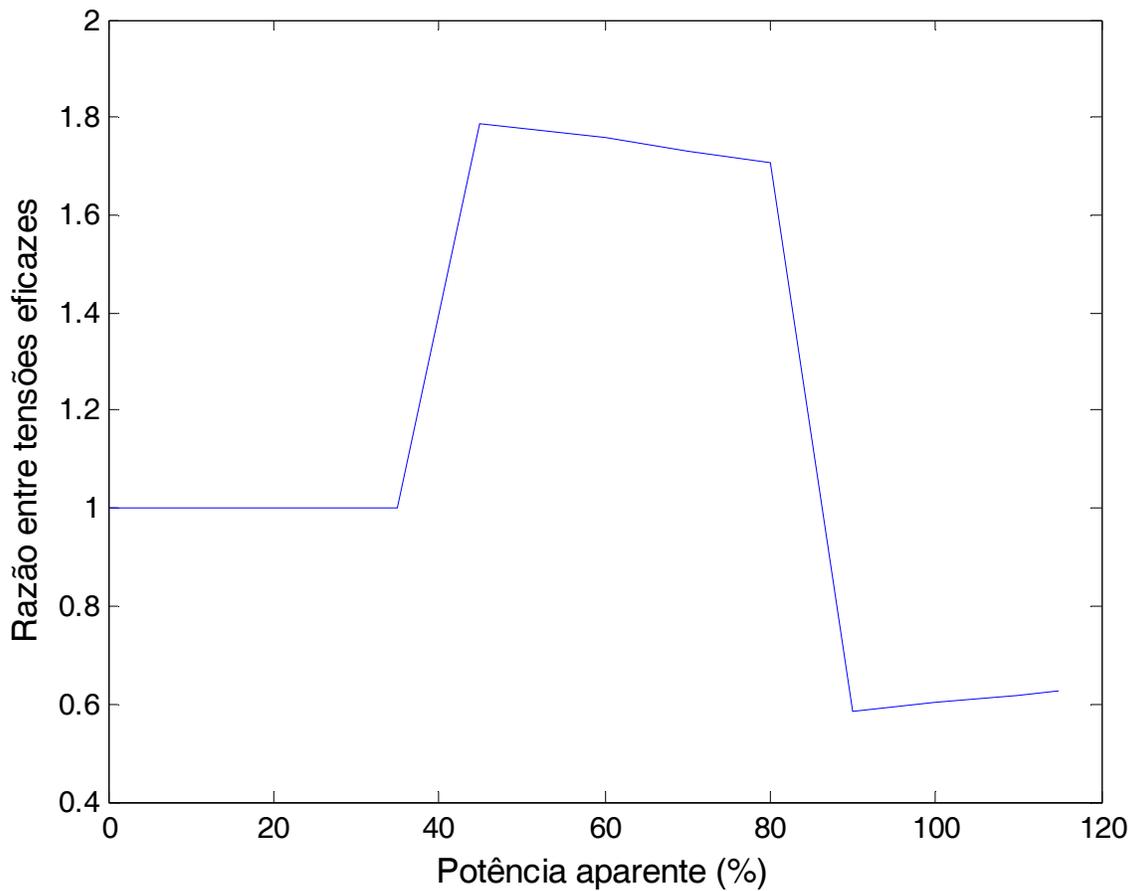


Figura 4.11 – Razão entre as tensões eficazes de quinto harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores.

Através destes gráficos observa-se que há realmente uma amplificação na tensão eficaz de terceiro e quinto harmônico. Estas amplificações ocorrem devido à ressonância entre o banco de capacitores e as indutâncias do circuito da rede secundária de distribuição. Portanto, se na fonte de alimentação da rede de distribuição houver alguma componente de terceiro ou quinto harmônico, isso pode fazer com que o nível de tensão eficaz nas cargas e o THD da rede fiquem fora dos padrões, prejudicando o controle de tensão proposto neste trabalho. Para evitar estes problemas de amplificações harmônicas na rede de distribuição pode-se inserir em série com o banco de capacitores uma impedância, como mostrado na figura 4.12 [7].

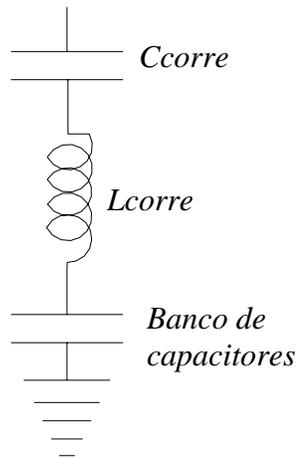


Figura 4.12 – Impedância de correção harmônica.

Esta impedância é usada para modificar a frequência de ressonância do circuito da rede secundária de distribuição, já que a indutância de correção L_{corre} é calculada para que na frequência de 60 Hz a impedância Z_{corre} (formada pela associação em série da indutância L_{corre} com a capacitância C_{corre}), dada pela equação 4.1, seja nula. Para qualquer outra frequência diferente da fundamental, a impedância Z_{corre} terá valor diferente de zero. Para as frequências onde há amplificação harmônica a impedância Z_{corre} faz com que haja uma mudança no valor da frequência de ressonância, eliminando as amplificações harmônicas observadas anteriormente.

$$Z_{corre} = j \cdot (2 \cdot \pi \cdot h \cdot f \cdot L_{corre} - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot f \cdot C_{elb}}) \quad (4.1)$$

Onde:

Z_{corre} – Impedância de correção harmônica.

C_{corre} – Capacitância de correção harmônica.

L_{corre} – Indutância de correção harmônica.

f – Frequência fundamental da rede elétrica.

h – Ordem do harmônico a ser analisado.

Nos estudos efetuados, considerou-se para C_{corre} o valor de $137 \mu\text{F}$, levando a adotar para L_{corre} o valor de $51,3 \text{ mH}$.

As figuras 4.13 e 4.14 mostram as mesmas relações das figuras 4.8 e 4.10 com a impedância de correção harmônica inserida em série com o banco de capacitores.

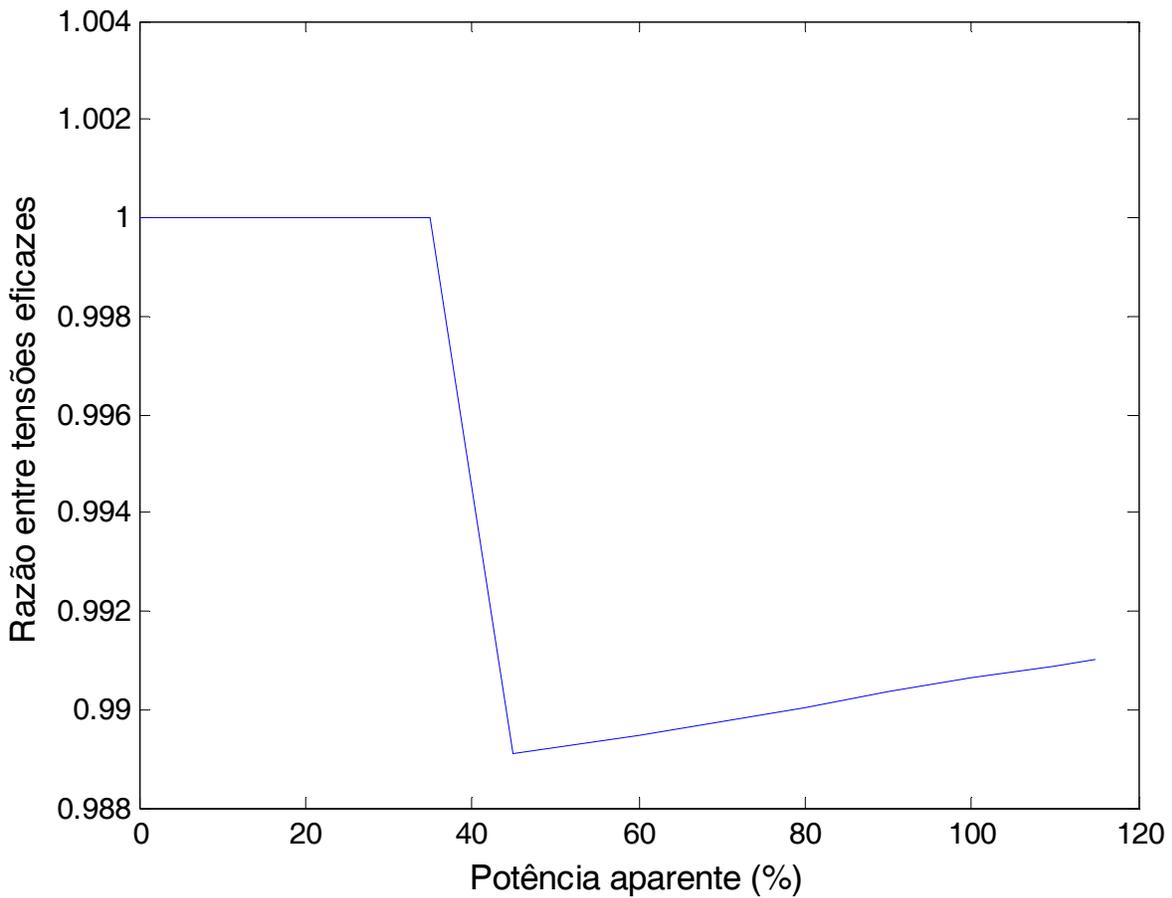


Figura 4.13 – Razão entre as tensões eficazes de terceiro harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores e com impedância de correção harmônica.

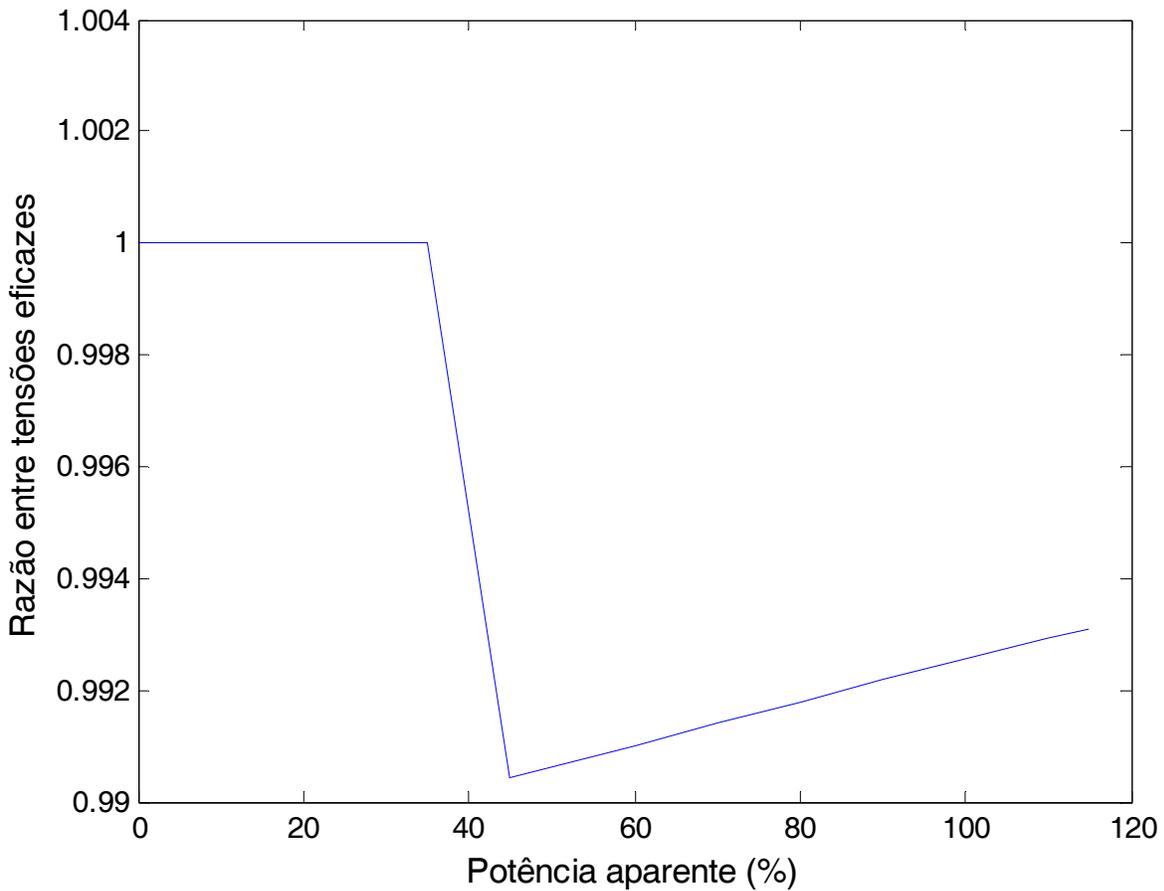


Figura 4.14 – Razão entre as tensões eficazes de quinto harmônico no poste cinco com e sem inserção de banco de capacitores e com impedância de correção harmônica.

Através dos gráficos acima é possível observar que não há mais ampliações consideráveis para componentes harmônicos inseridos no sistema através da fonte de alimentação da rede de distribuição secundária.

Outra situação que merece análise é a possibilidade de componentes harmônicos que não sejam injetados na rede através da fonte de alimentação e sim através de cargas não lineares.

Os gráficos das figuras 4.15, 4.16 e 4.17 mostram as razões entre as impedâncias com banco de capacitores inserido e as impedâncias sem banco de capacitores inserido para o terceiro, quinto e sétimo harmônicos, no poste 5, com o sistema sem impedância de correção harmônica inserida e com condições de carga em cada poste tal que a carga total não passe da nominal do transformador multiplicada pelo fator de serviço. No estudo a fonte harmônica foi concentrada no poste apresentado.

Nestes gráficos são calculadas as impedâncias para cada harmônico de frequência vistas do poste cinco.

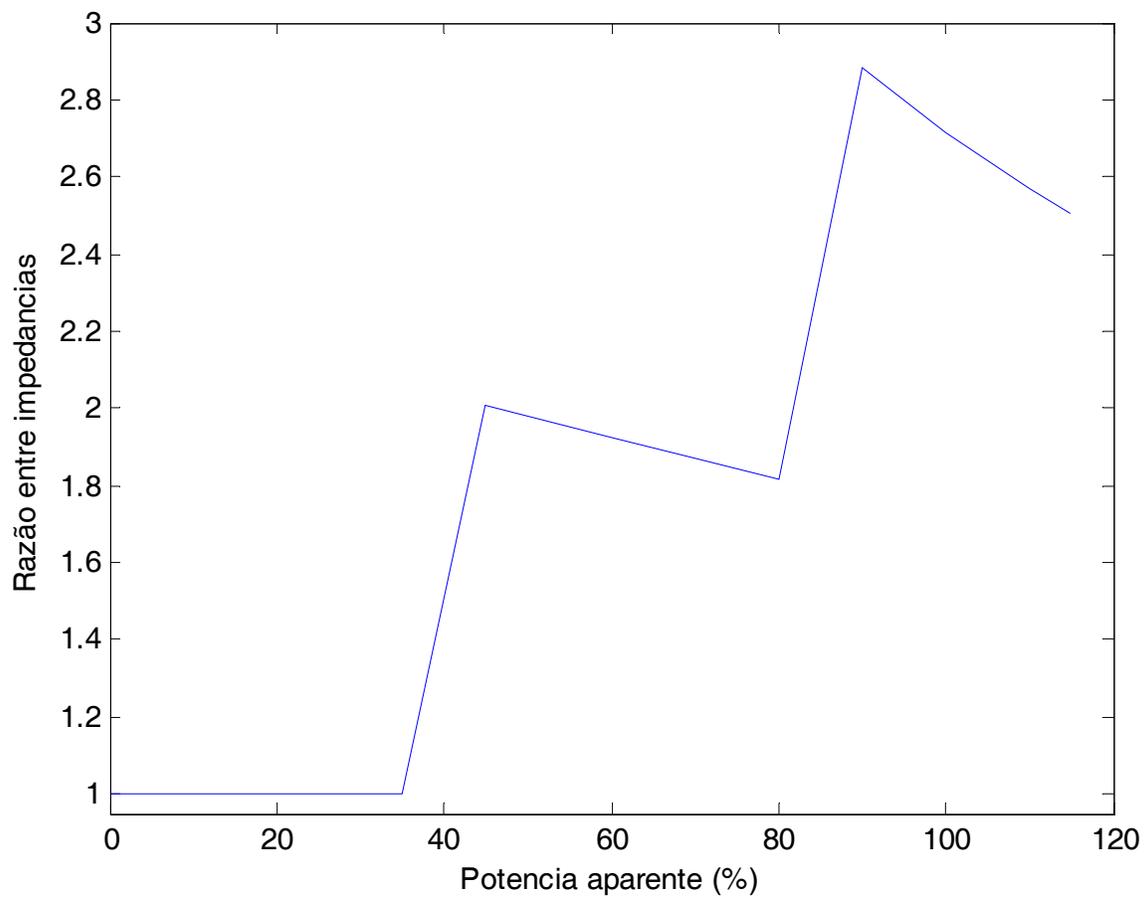


Figura 4.15 – Relação entre as impedâncias de terceiro harmônico com e sem banco de capacitores vistas do poste cinco.

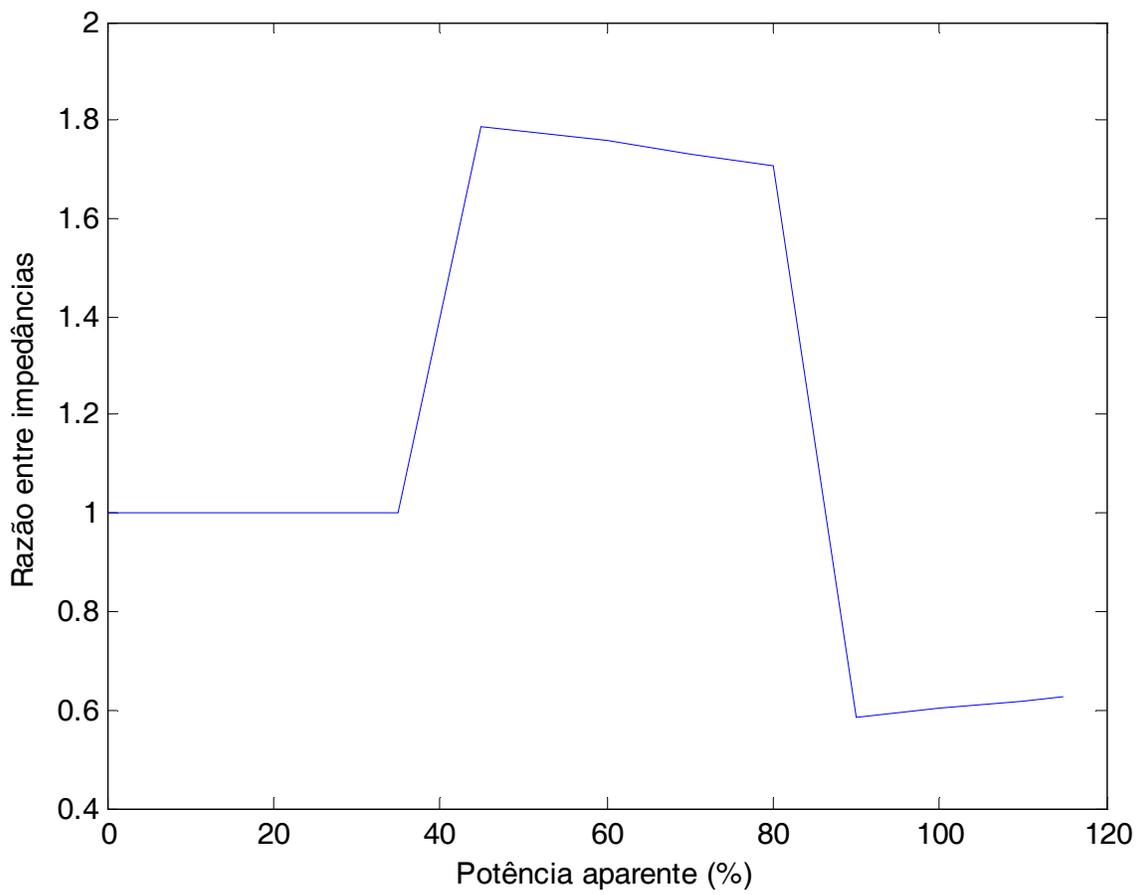


Figura 4.16 – Relação entre as impedâncias de quinto harmônico com e sem banco de capacitores vistas do poste cinco.

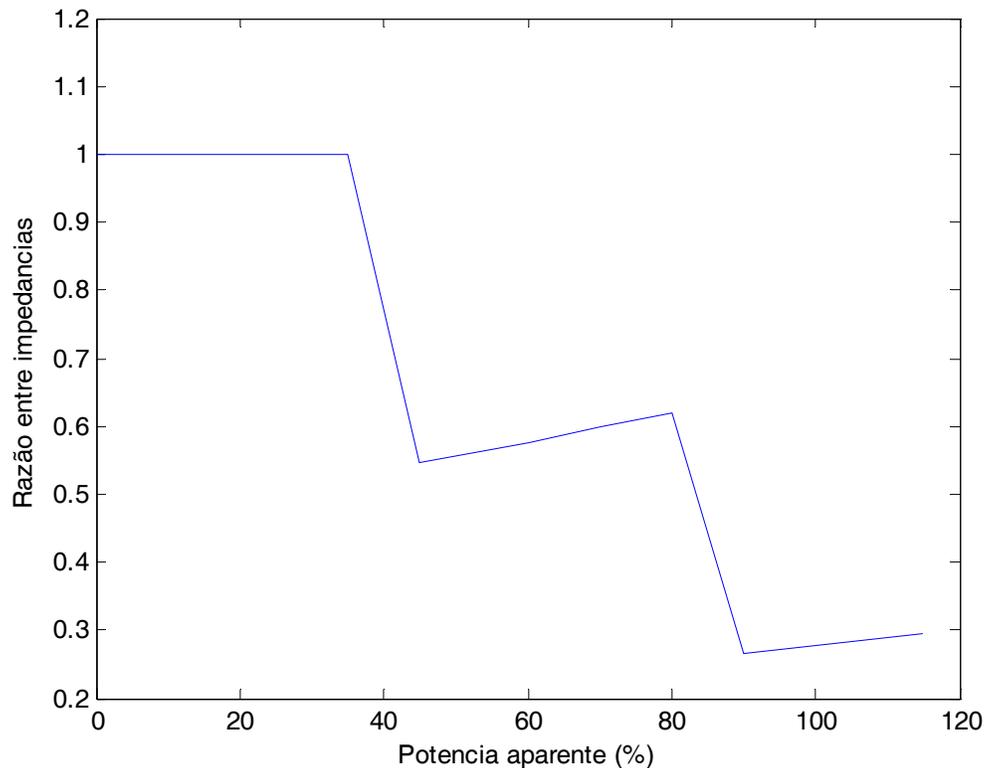


Figura 4.17 – Relação entre as impedâncias de sétimo harmônico com e sem banco de capacitores vistas do poste cinco.

Através destes gráficos verifica-se que a relação de impedâncias é maior que 1 para o terceiro harmônico para o transformador com carga acima de 35% de carga, ocorrendo também para o quinto harmônico em algumas situações de carga. Observa-se ainda, que o mesmo não ocorre para o sétimo harmônico. Isto indica que ao inserir-se o banco de capacitores para correção de tensão eficaz, e a rede de distribuição estiver alimentando cargas não lineares com conteúdo de terceiro e quinto harmônico consideráveis, pode-se ter uma amplificação harmônica de tensão no poste onde está localizada esta carga, causando também um aumento no THD na rede de distribuição. Observou-se nas simulações que quanto mais próximo do banco de capacitores (neste exemplo no poste cinco), maior a relação entre as impedâncias com e sem banco de capacitores para o terceiro harmônico, ou seja, a pior situação para a rede é a instalação de cargas não lineares no poste onde estiver instalado o banco de capacitores (neste exemplo no poste cinco).

A figura 4.18 mostra a mesma razão da figura 4.15, inserindo no sistema a impedância de correção harmônica da figura 4.12 em série com o banco de capacitores.

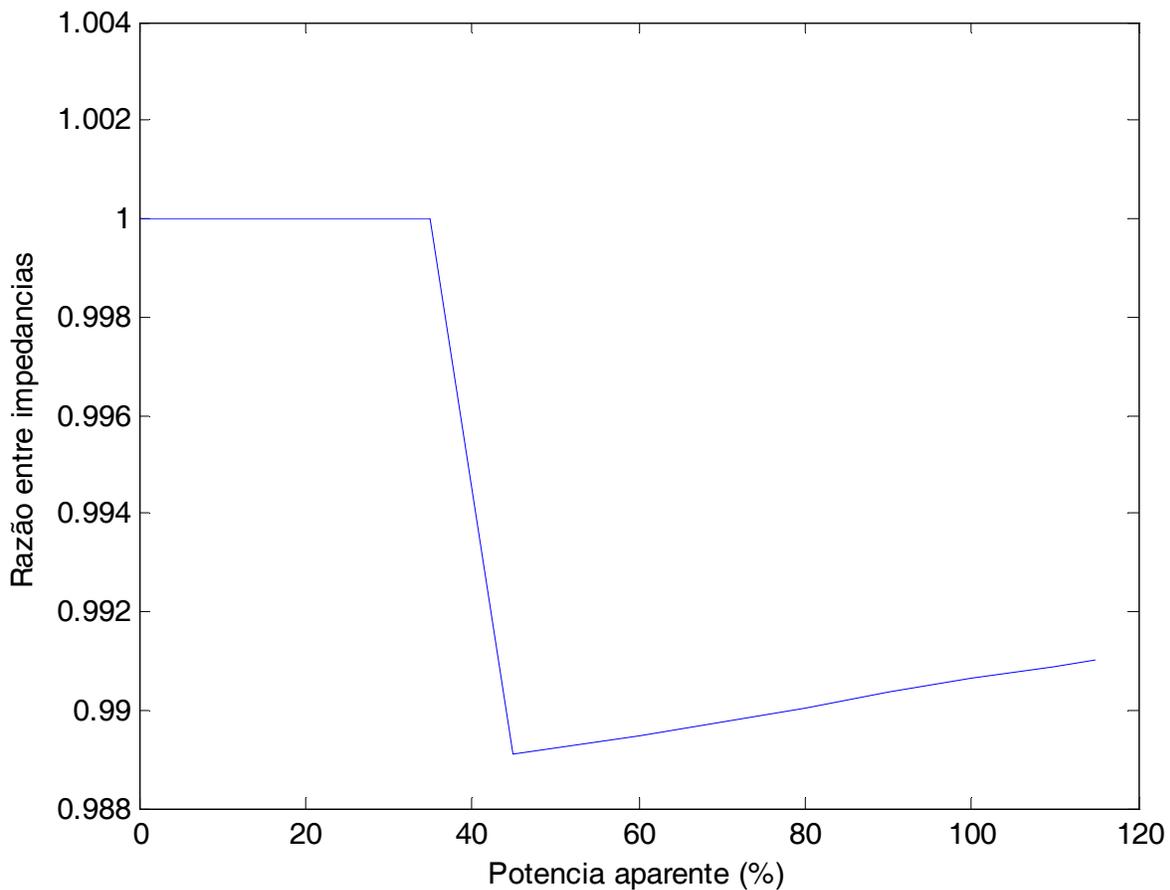


Figura 4.18 – Relação entre as impedâncias de terceiro harmônico com e sem banco de capacitores vistas do poste cinco com impedância de correção harmônica.

Através deste gráfico pode-se observar que a impedância de correção harmônica realmente evita a amplificação de tensão eficaz de terceiro e quinto harmônico, melhorando o nível de tensão eficaz e o THD no circuito da rede de distribuição secundária alimentando cargas não lineares.

4.2 – Modelo da rede de distribuição implementado em Simulink

A implementação do modelo da rede de distribuição em Simulink neste trabalho é utilizada para comprovação dos resultados obtidos na implementação em Matlab e para a análise da rede de distribuição alimentando cargas com comportamento não linear tipo fonte de tensão. Será usado o modelo da figura 3.1 com as mesmas características apresentadas na tabela 4.1.

Os resultados obtidos na implementação em Matlab mostrados anteriormente foram comprovados na implementação em Simulink.

4.2.1 – Rede de distribuição alimentando cargas lineares

Para a análise do comportamento linear da rede de distribuição na implementação em Simulink utiliza-se o circuito da figura 3.1, alimentando cargas indutivas e resistivas em cada poste. Para efetuar as simulações do circuito serão utilizados os componentes da rede de distribuição com os mesmos dados da tabela 4.1 e as cargas em cada poste representadas por suas potências ativa e reativa, conforme tabela 4.2.

Tabela 4.2
Dados das cargas conectadas em cada poste.

Potência ativa das cargas do poste 1	5250 W
Potência reativa das cargas do poste 1	5356 VAR
Potência ativa das cargas do poste 2	5938 W
Potência reativa das cargas do poste 2	1952 VAR
Potência ativa das cargas do poste 3	3750 W
Potência reativa das cargas do poste 3	3307 VAR
Potência ativa das cargas do poste 4	4000 W
Potência reativa das cargas do poste 4	3000 VAR
Potência ativa das cargas do poste 5	4000 W
Potência reativa das cargas do poste 5	3000 VAR
Potência aparente total alimentada pelo transformador	28323 VA

As figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 mostram as formas de onda de tensão e o espectro harmônico das tensões nos postes 1, 3 e 5 sem e com inserção de banco de capacitores para melhoria do nível de tensão eficaz.

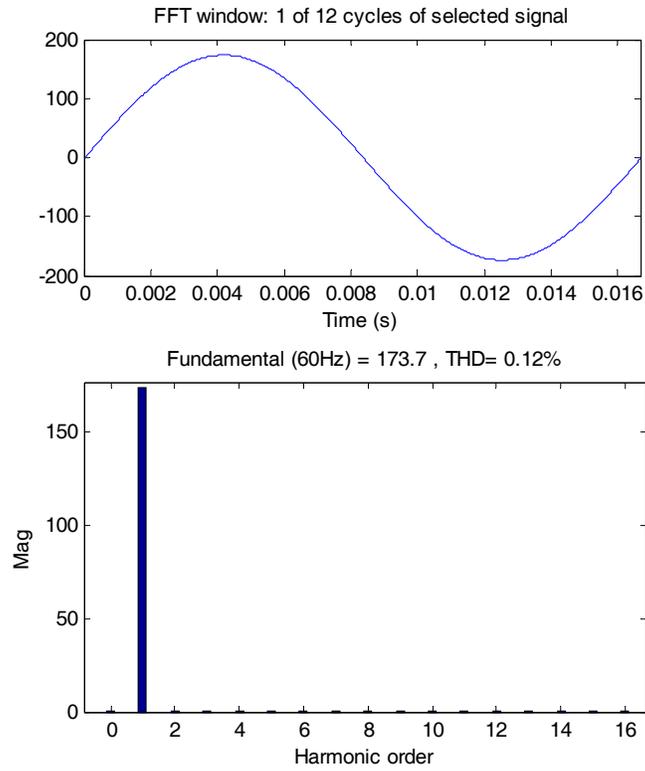


Figura 4.19 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um sem banco de capacitores.

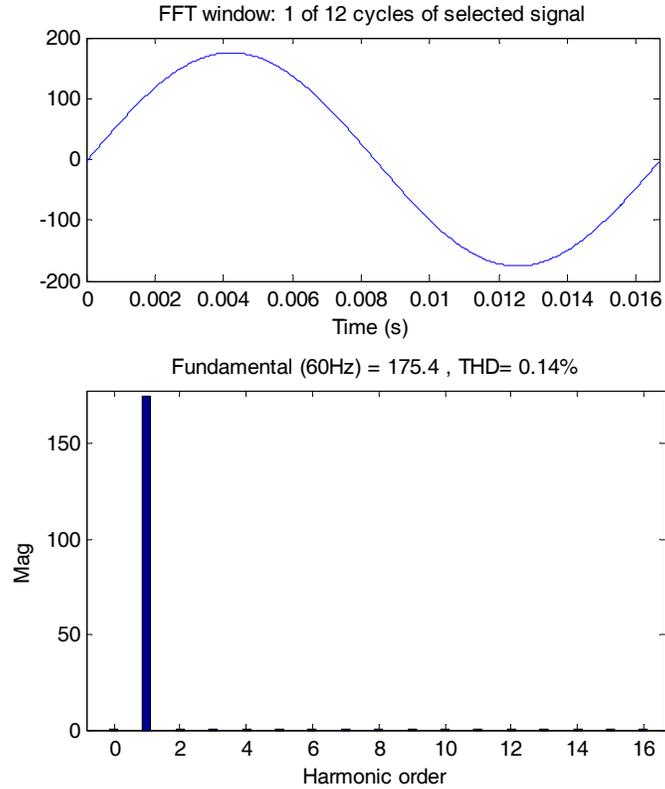


Figura 4.20 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um com banco de capacitores.

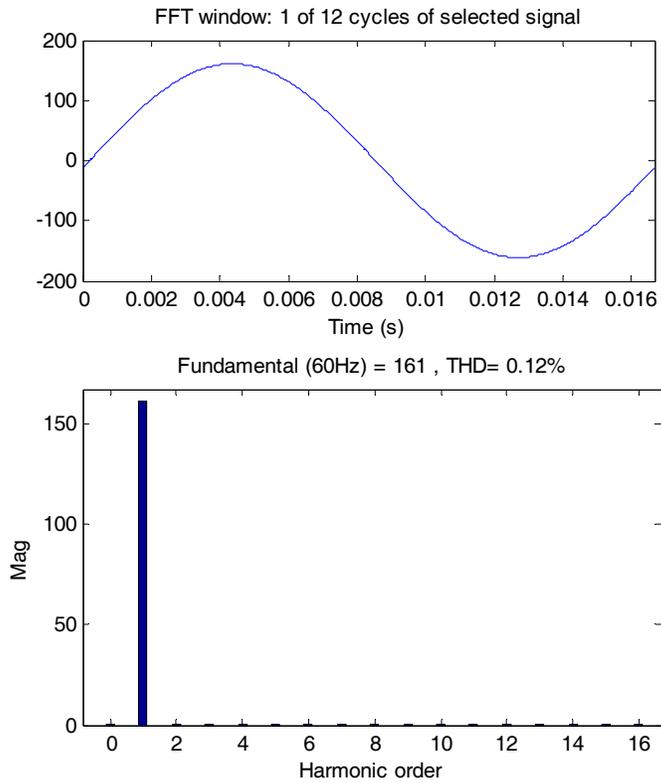


Figura 4.21 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três sem banco de capacitores

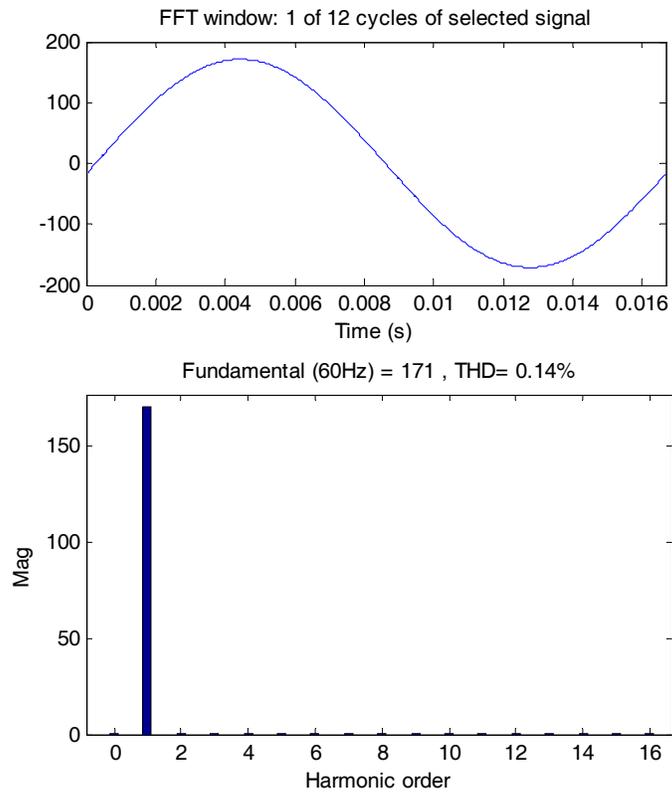


Figura 4.22 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três com banco de capacitores

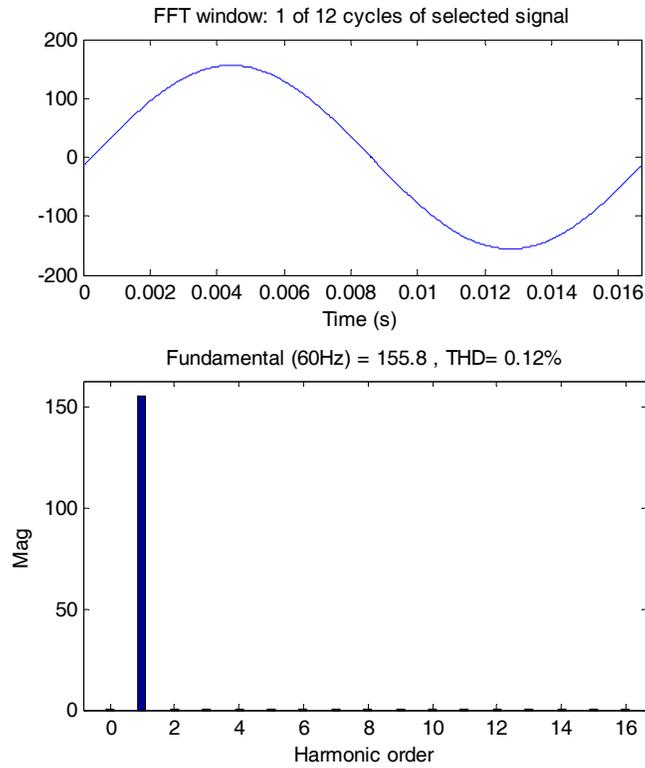


Figura 4.23 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco sem banco de capacitores

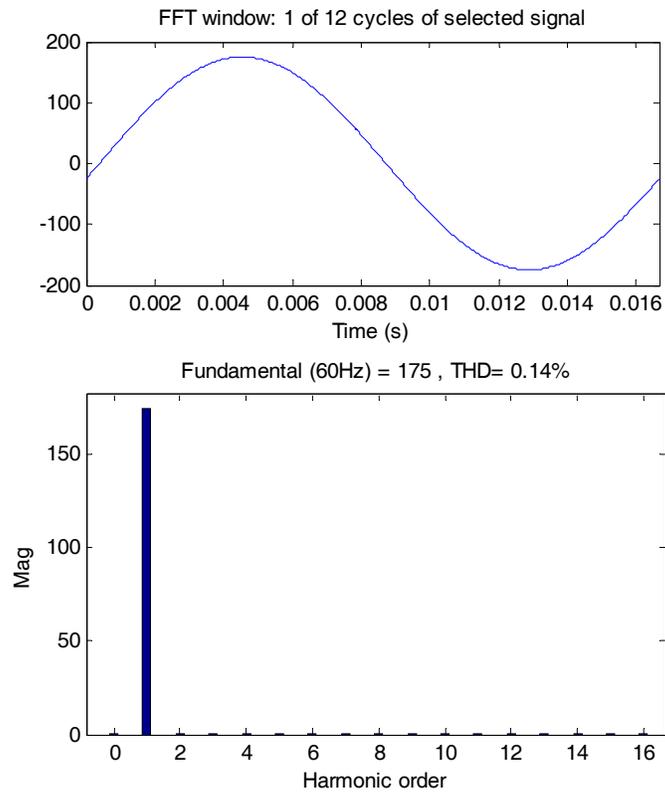


Figura 4.24 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores

Observa-se nos gráficos acima que os valores das tensões eficazes nos postes 1, 3 e 5 sem banco de capacitores, são respectivamente de 122,8; 113,8 e 110,1V. A tensão eficaz no postes 3 e no poste 5 está abaixo do mínimo recomendado pela norma da ANEEL, sendo necessária a inserção de banco de capacitores para melhorar o nível de tensão eficaz da rede de distribuição. Após a inserção do banco de capacitores, o nível de tensão eficaz aumentou nos postes 1, 3 e 5 respectivamente para 124,0 V, 120,9 V e 123,7 V, fazendo com que os níveis de tensão eficaz nos postes da rede de distribuição fiquem acima do nível mínimo recomendado pela norma da ANEEL.

4.2.2 – Rede de distribuição alimentando cargas não lineares

As simulações deste item foram feitas substituindo-se as cargas dos postes 1, 3 e 5 uma a uma por um conjunto de cargas com elementos lineares e não lineares, de maneira que a carga total nestes postes tenha a mesma potência aparente da tabela 4.2. A figura 4.25 mostra a carga não linear utilizada nas simulações dos itens a seguir, que é um retificador de onda completa com filtro capacitivo alimentando uma carga resistiva, representando os aparelhos eletroeletrônicos mais utilizados em uma rede de distribuição .

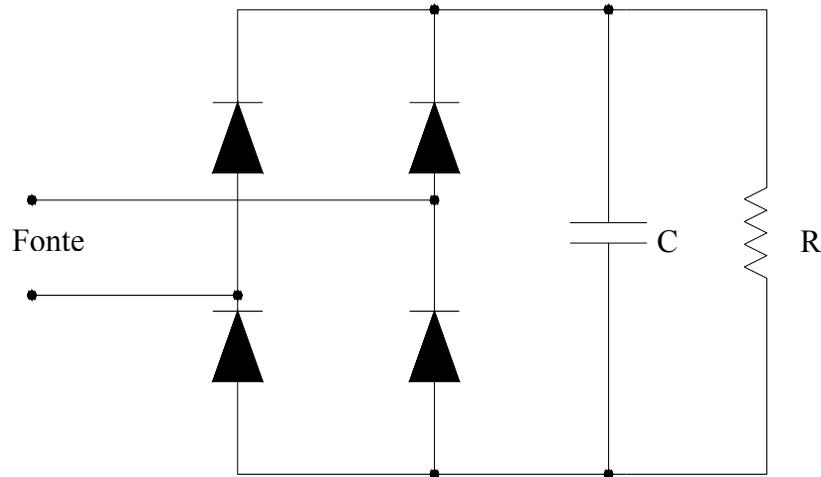


Figura 4.25 – Retificador de onda completa com filtro capacitivo e carga resistiva.

A figura 4.26 mostra a forma de onda típica e o respectivo espectro harmônico da corrente solicitada da rede pelo retificador da figura 4.25 ao ser alimentado por uma fonte de alimentação com tensão eficaz de 127 Volts e frequência de 60 Hertz.

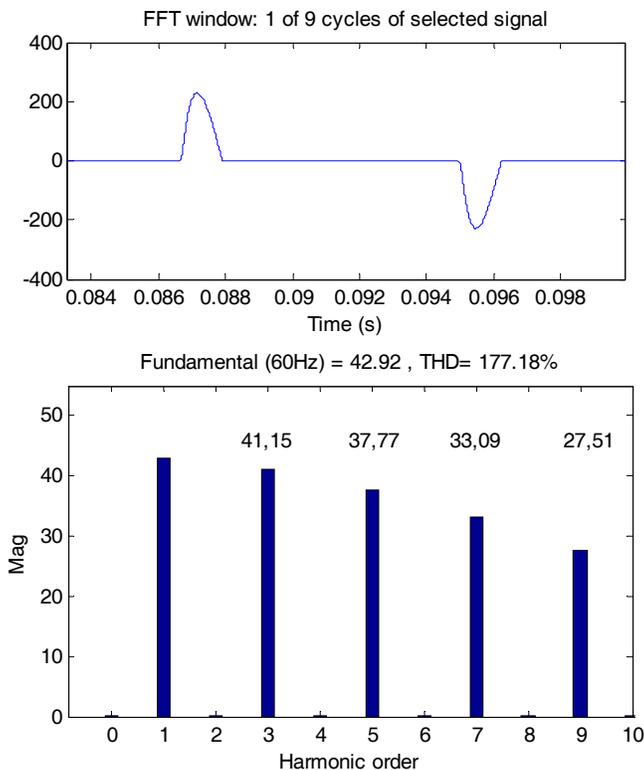


Figura 4.26 – Forma de onda e espectro harmônico da corrente elétrica solicitada por um retificador de onda completa.

A corrente solicitada pelo retificador de onda completa apresenta elevadas componentes de terceira, quinta, sétima e nona ordem, e outras com amplitude decrescendo monotonicamente. Portanto o retificador da figura 4.25 é um bom exemplo de carga não linear para ser usado no modelo da rede de distribuição.

4.2.2.1 – Carga não linear localizada no poste um

A carga não linear da figura 4.25 foi instalada inicialmente no poste um em paralelo com uma carga linear. A resistência de carga do retificador e a potência aparente da carga linear foram reguladas para que se tivesse no poste 1 a mesma potência aparente total do item 4.2.1.

As figuras 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 mostram as formas de onda e o espectro harmônico das tensões nos postes 1, 3 e 5 sem e com inserção de banco de capacitores para correção do nível de tensão eficaz.

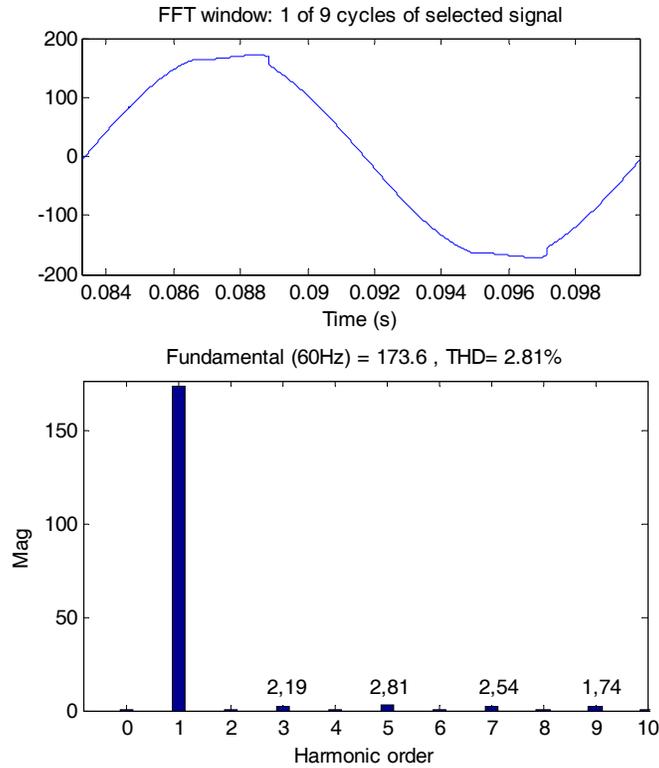


Figura 4.27 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um sem banco de capacitores.

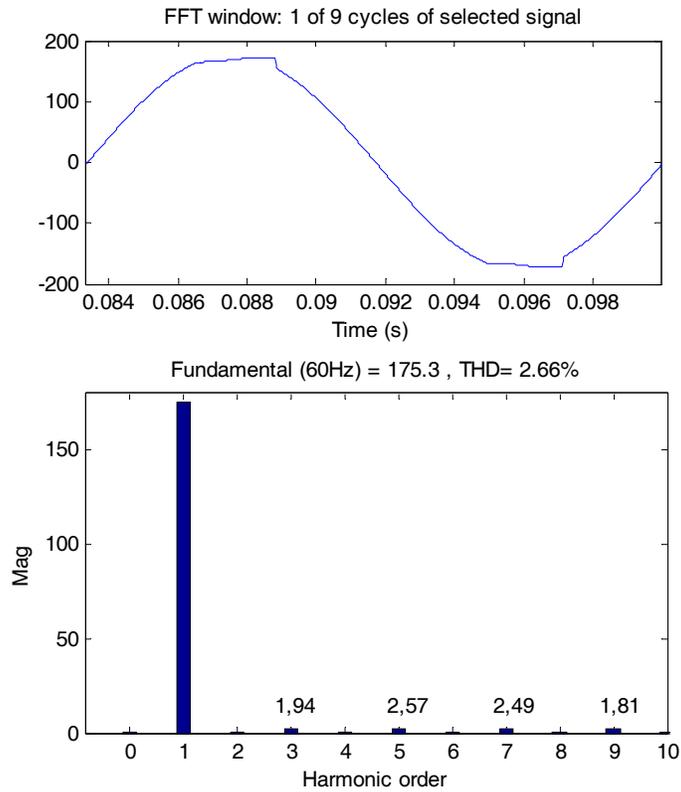


Figura 4.28 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um com banco de capacitores.

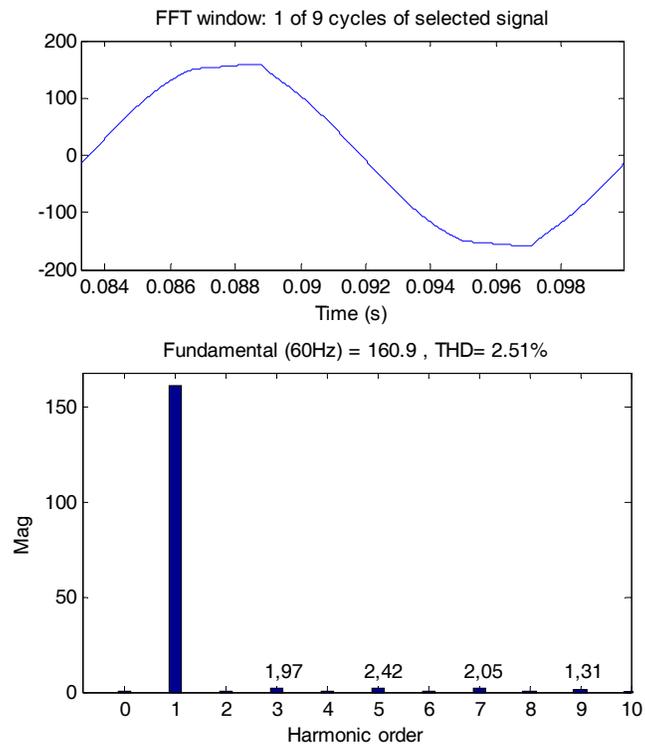


Figura 4.29 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três sem banco de capacitores.

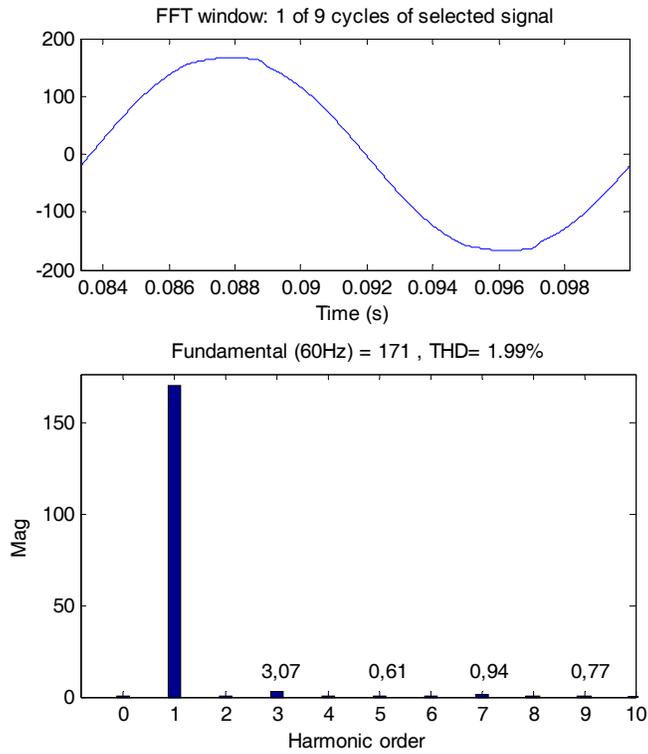


Figura 4.30 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três com banco de capacitores.

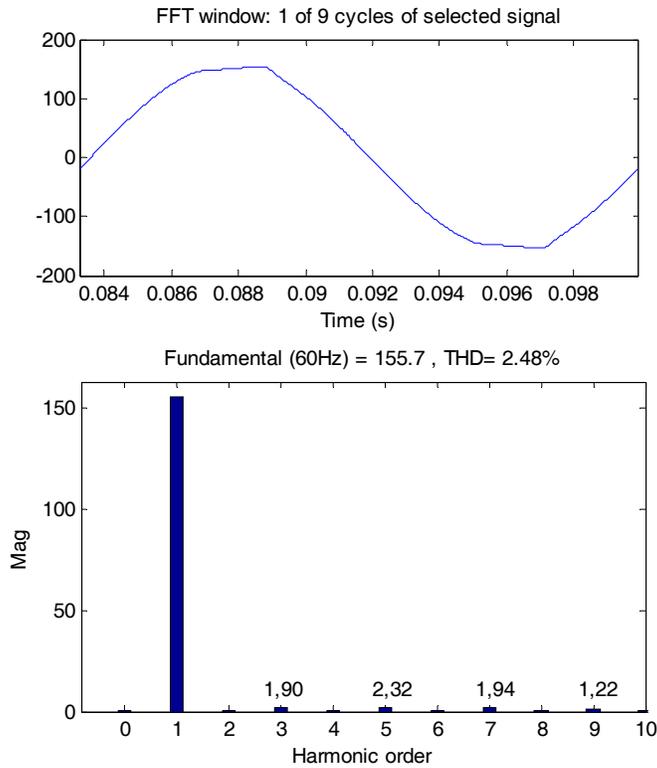


Figura 4.31 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco sem banco de capacitores.

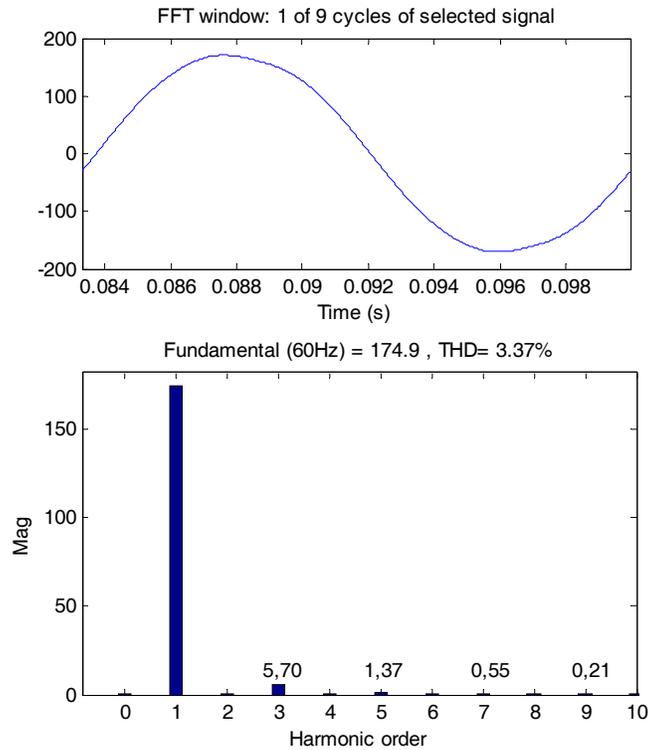


Figura 4.32 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores.

Com a rede de distribuição sem e com capacitores de correção do nível de tensão os valores de tensão fundamental e eficaz das tensões nos postes 1, 3 e 5 são aproximadamente iguais aos valores destas grandezas para cargas lineares (Figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24), isto ocorre porque os valores das cargas em cada poste são aproximadamente os mesmos para o caso de cargas lineares. Observa-se também, como no caso de cargas lineares, a necessidade da inserção de banco de capacitores para aumentar o nível de tensão eficaz para atender às especificações da resolução da ANEEL. Já o comportamento harmônico é totalmente diferente, pois as cargas não lineares inserem na rede de distribuição correntes harmônicas, que ao circularem no circuito provocam quedas de tensão que fazem com que a tensão em cada poste fique deformada, aumentando o THD de tensão.

Após a inserção do banco de capacitores observa-se um aumento nos valores da tensão fundamental e do valor eficaz das tensões nos postes 1, 3 e 5, e que os níveis de tensão eficaz da rede de distribuição, assim como no caso de cargas lineares, atendem às exigências da norma da ANEEL.

O comportamento harmônico da tensão da rede de distribuição muda ao inserirmos o banco de capacitores. Há uma amplificação da componente de terceiro harmônico e uma redução nas outras, alterando o THD de tensão, que no poste cinco chega a 3,37%. Este problema, como já mostrado anteriormente, pode ser atenuado inserindo a impedância de correção harmônica em série com o banco de capacitores.

A figura 4.33 mostra a forma de onda de tensão e o espectro harmônico de tensão no poste 5 com correção do nível de tensão eficaz através da inserção de banco de capacitores e impedância de correção harmônica.

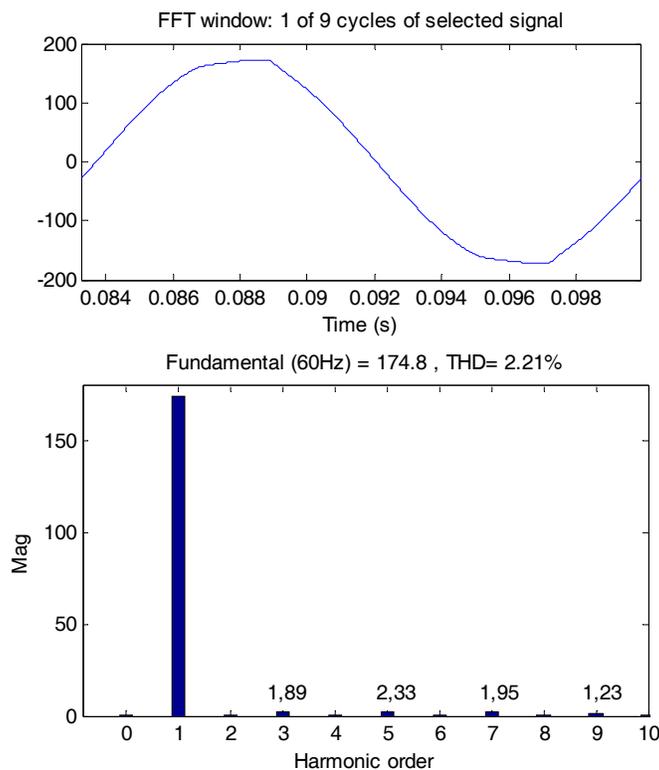


Figura 4.33 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores e impedância de correção harmônica.

4.2.2.2 – Carga não linear localizada no poste três

A carga não linear da figura 4.25, com os mesmos valores de resistência e capacitância de saída, foi transferida do poste um para o poste três e instalada em paralelo com uma carga linear de modo que a potência aparente total do conjunto seja igual à do item 4.2.2.1.

As figuras 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 e 4.39 mostram as formas de onda de tensão e o espectro harmônico de tensão nos postes 1, 3 e 5 sem e com inserção de banco de capacitores para melhoria do nível de tensão eficaz.

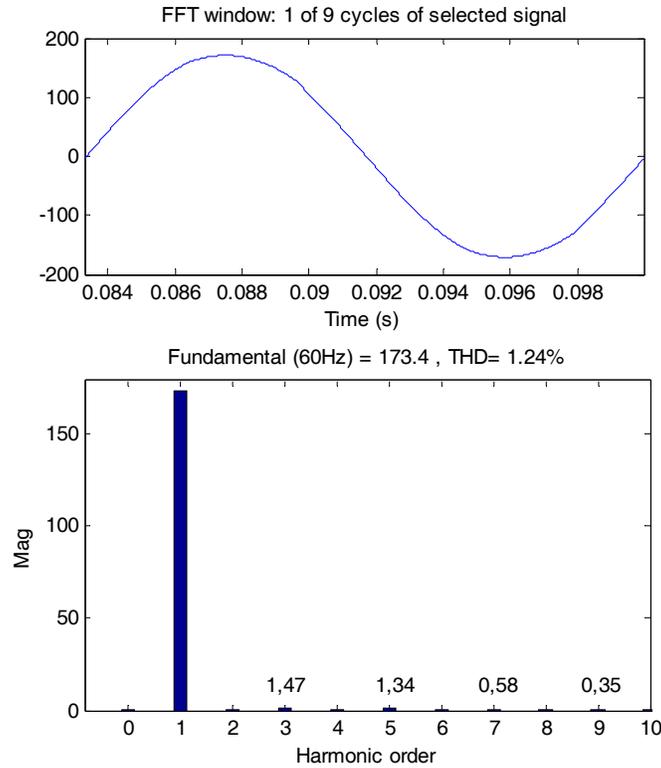


Figura 4.34 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um sem banco de capacitores.

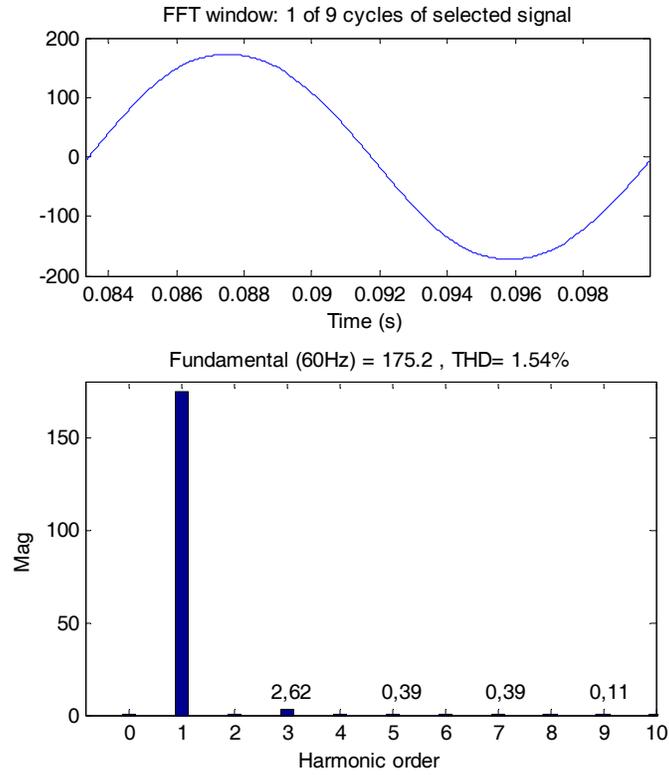


Figura 4.35 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um com banco de capacitores.

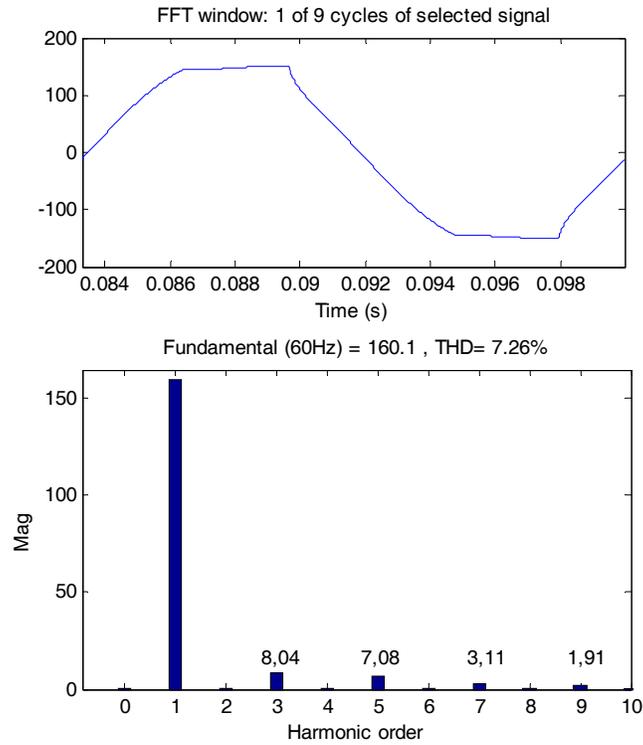


Figura 4.36 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três sem banco de capacitores.

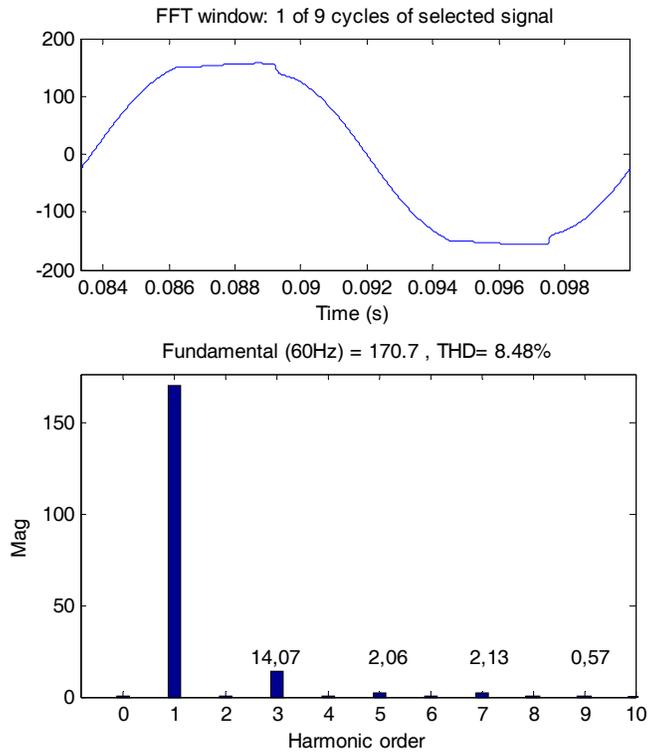


Figura 4.37 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três com banco de capacitores.

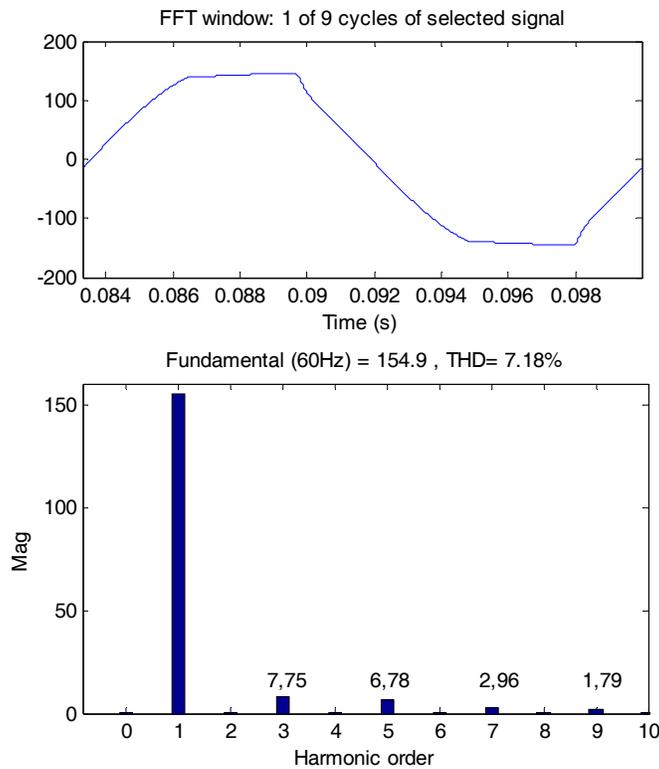


Figura 4.38 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco sem banco de capacitores.

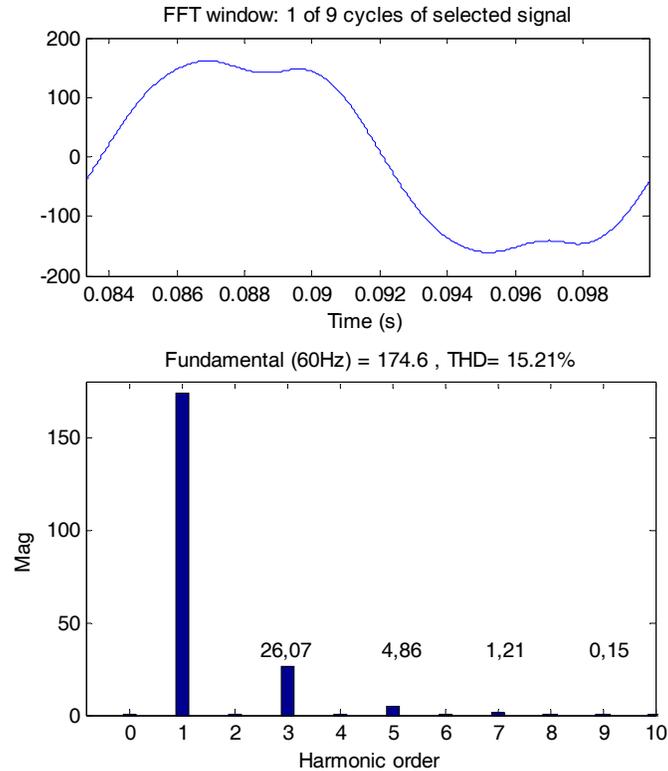


Figura 4.39 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores.

A mudança da carga não linear do poste um para o poste três não acarreta modificações significativas nos níveis de tensão eficaz sem e com banco de capacitores inseridos, já que as potências aparentes em cada poste são as mesmas. O espectro harmônico sofre alterações, pois a distância da fonte de alimentação até a carga não linear aumenta, aumentando a impedância do caminho a ser percorrido pelas correntes harmônicas. O pior caso de THD de tensão foi no poste cinco, que com a inserção do banco de capacitores sobe para 15,21 %. Para solucionar o problema usa-se a inserção de impedância de correção harmônica.

A figura 4.40 mostra a forma de onda de tensão e o espectro harmônico no poste 5 com correção do nível de tensão eficaz através da inserção de banco de capacitores e impedância de correção harmônica.

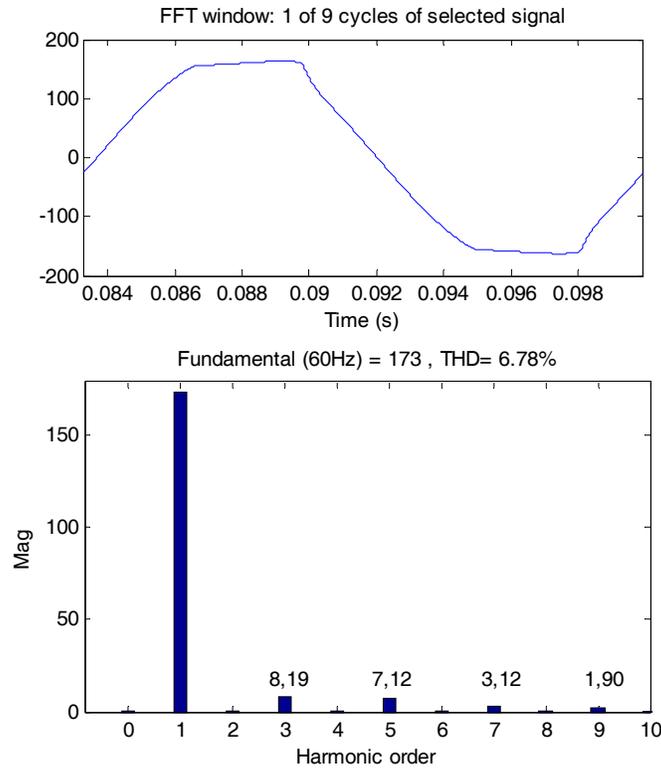


Figura 4.40 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores e impedância de correção harmônica

4.2.2.3 – Carga não linear localizada no poste cinco

A carga não linear da figura 4.25, com os mesmos valores de resistência e capacitância de saída, foi transferida do poste três para o poste cinco e instalada em paralelo com uma carga linear de modo que a potência aparente total do conjunto seja igual à do item 4.2.2.2.

As figuras 4.41, 4.42, 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46 mostram as formas de onda de tensão e os espectros harmônicos nos postes 1, 3 e 5 sem e com inserção de banco de capacitores para melhoria do nível de tensão eficaz.

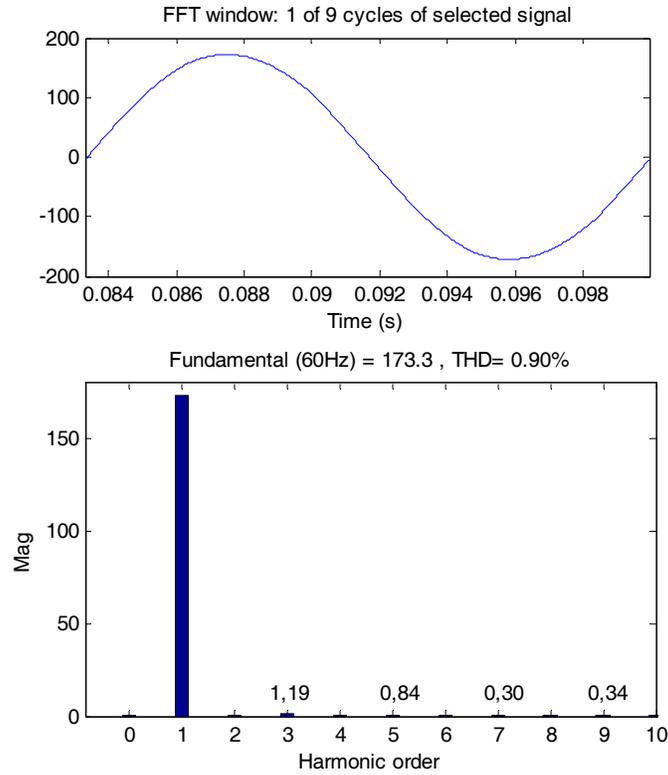


Figura 4.41 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um sem banco de capacitores.

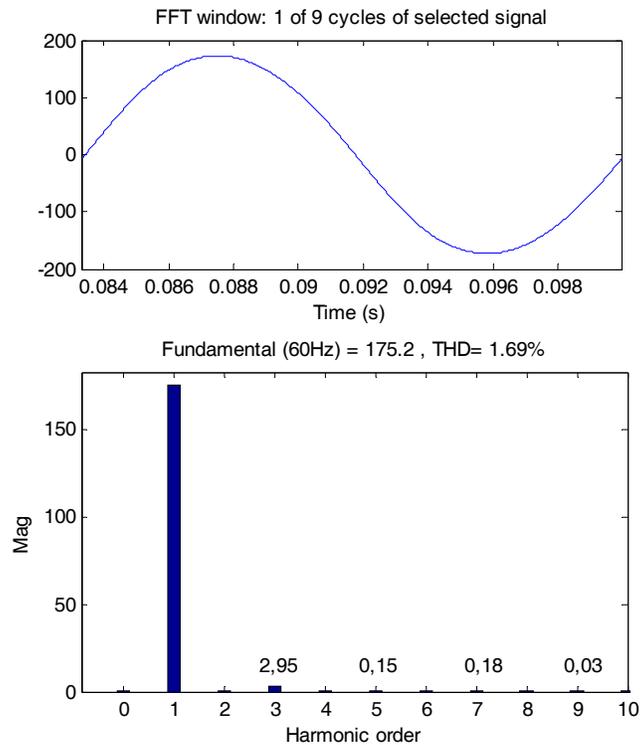


Figura 4.42 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste um com banco de capacitores.

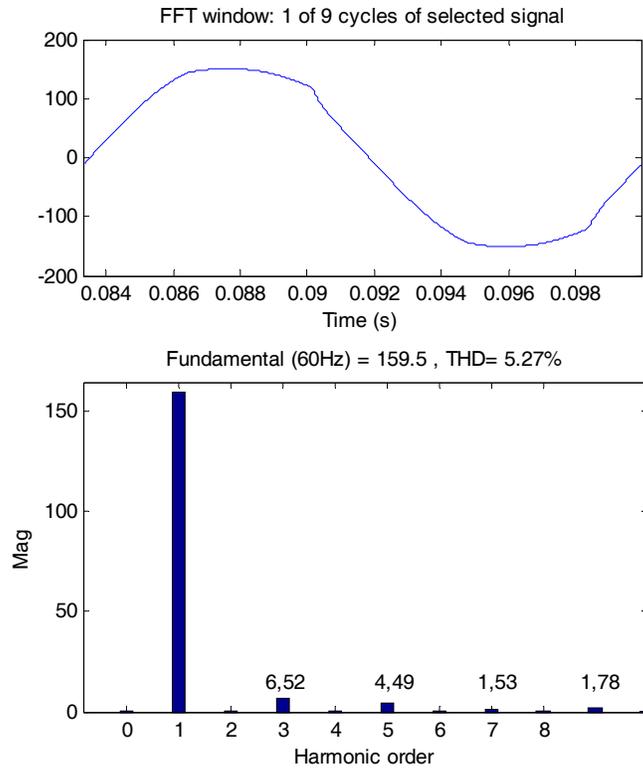


Figura 4.43 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três sem banco de capacitores.

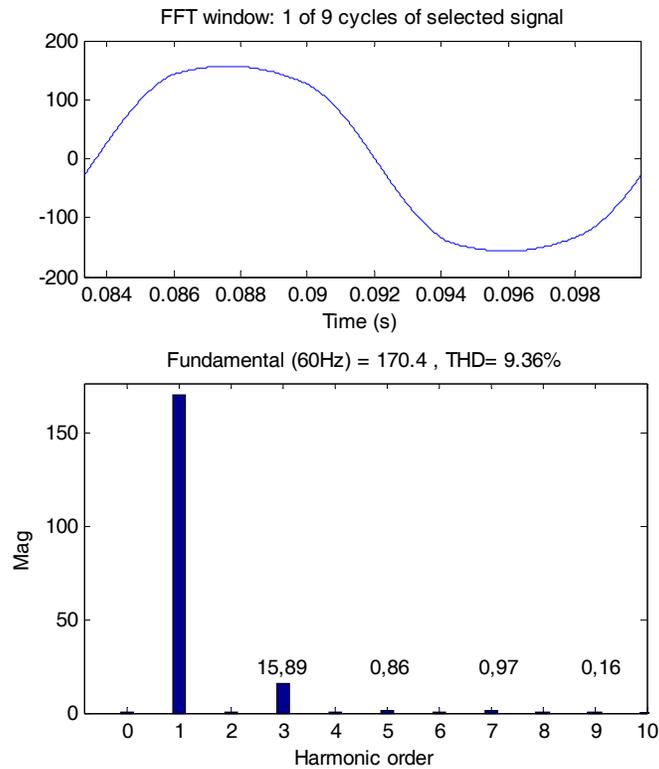


Figura 4.44 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste três com banco de capacitores.

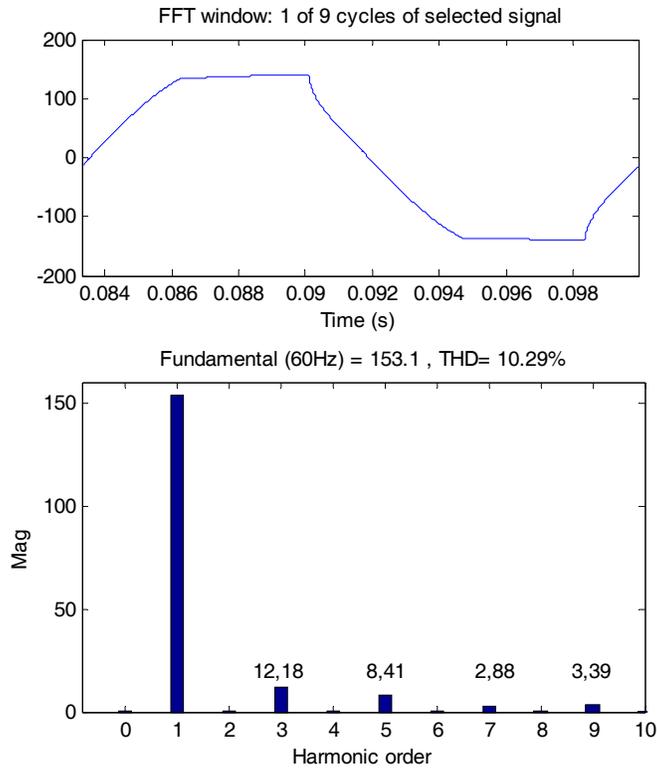


Figura 4.45 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco sem banco de capacitores.

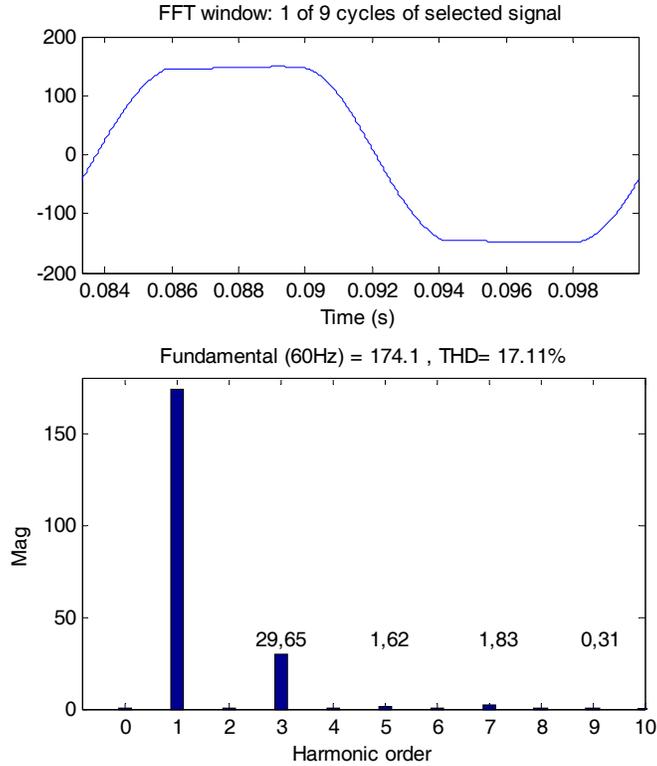


Figura 4.46 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores.

A figura 4.47 mostra a forma de onda de tensão e o espectro harmônico no poste 5 com correção do nível de tensão eficaz através da inserção de banco de capacitores e impedância de correção harmônica.

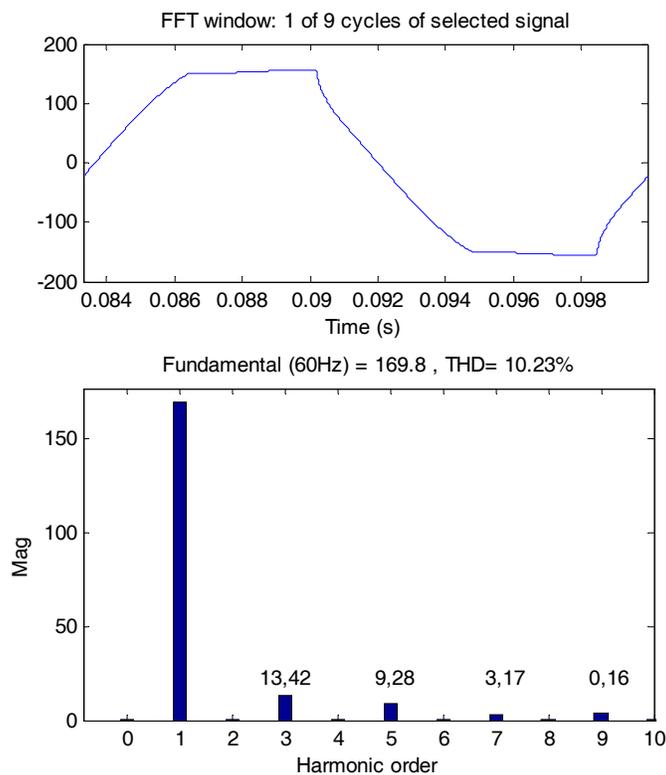


Figura 4.47 – Forma de onda e espectro harmônico da tensão elétrica do poste cinco com banco de capacitores e impedância de correção harmônica.

O nível de tensão eficaz e o valor da fundamental nos postes 1, 3 e 5 praticamente não variou nas simulações com a carga não linear em posições diferentes, seja sem ou com banco de capacitores inseridos. Como já comentado, os valores de potência aparente em cada poste são os mesmos em cada simulação. Já o comportamento harmônico da rede de distribuição muda ao mudarmos a carga não linear de posição. Quanto mais distante da fonte de alimentação estiver o conjunto de cargas não lineares pior fica o espectro harmônico de tensão da rede de distribuição. Isto acontece porque quanto maior a distância entre a carga não linear e a fonte de alimentação, maiores serão as quedas de tensões harmônicas, já que maior será a impedância percorrida pelas correntes harmônicas solicitadas da fonte pela carga não linear.

De maneira geral observa-se que a inserção do banco de capacitores amplifica o terceiro harmônico e diminui os demais. Entretanto há um aumento no THD de tensão da rede de distribuição, já que o terceiro harmônico é dominante. Observa-se também que a inserção de impedância de correção harmônica em série com o banco de capacitores evita esta amplificação, evitando o aumento do THD de tensão.

5 – CONCLUSÕES

A correção do nível de tensão eficaz em redes secundárias de distribuição através da inserção controlada de banco de capacitores foi analisada neste estudo, através de um programa em Matlab e simulações em simulink. No programa desenvolvido em Matlab o modelo da rede de distribuição foi representado por suas equações de circuito, aplicando as leis de Kirchoff de corrente e tensão, e a implementação em Simulink foi efetuada utilizando o modelo dos componentes da rede de distribuição.

Os resultados mostrados no capítulo 4 foram obtidos com simulações para uma fase da rede de distribuição. Não foram feitas análises do nível de tensão, nem do comportamento harmônico para as outras fases da rede e as interferências de cargas bifásicas.

A principal finalidade do estudo foi a comprovação da viabilidade técnica do uso de banco de capacitores para correção do nível de tensão eficaz e a análise do comportamento da rede de distribuição secundária ao alimentar cargas não lineares antes e após a inserção destes bancos.

Observou-se através das simulações dos programas implementados em Matlab e Simulink que o perfil da tensão eficaz nos postes de uma rede de distribuição secundária sofre influências dos seguintes fatores:

- Comprimento da rede de distribuição.
- Potência solicitada pelos consumidores.
- Distribuição da potência solicitada pelos consumidores.
- Tipo de carga instalada na rede.
- Presença de componentes harmônicas na tensão de alimentação.
- Instalação de banco de capacitores.

5.1 – Comprimento da rede de distribuição

Os níveis de tensão eficaz em cada poste de uma rede de distribuição secundária dependem da distância deste poste à fonte de alimentação, que é o transformador de distribuição.

A circulação da corrente elétrica pelos condutores da rede de distribuição ocasiona quedas de tensão nas impedâncias da linha, e quanto maior o comprimento desta, maior a impedância a ser percorrida pela corrente. Conseqüentemente, maior será a queda de tensão, fazendo com que a tensão eficaz em cada poste diminua com o aumento da distância dele ao transformador de distribuição.

Observou-se nas simulações em Matlab e Simulink, cujos resultados obtidos foram apresentados no capítulo 4, que os níveis de tensão eficaz mais críticos, chegando a estarem abaixo dos níveis exigidos pela resolução da ANEEL, foram observados no último poste da rede de distribuição, que no caso em estudo foi o poste cinco, e que os melhores níveis foram observados no poste 1.

5.2 – Potência solicitada pelos consumidores

A potência solicitada pelos consumidores em uma rede de distribuição varia muito e em pequenos intervalos de tempo, já que temos diversas cargas sendo ligadas e desligadas aleatoriamente. É impossível se fazer previsões de consumo em um determinado instante de tempo. Estas variações de carga na rede de distribuição proporcionam variações do comportamento da tensão eficaz da rede. O aumento da potência solicitada pelos consumidores faz com que a corrente do circuito aumente, aumentando as quedas de tensão ao longo da linha e conseqüentemente, diminuindo a tensão eficaz nos postes ao longo da rede de distribuição.

Observou-se pelas simulações em Matlab e Simulink, que os níveis de tensão eficaz mais críticos nos postes ao longo da rede de distribuição acontecem quando a potência solicitada pelos consumidores é máxima (para a rede de distribuição a vazia a tensão eficaz em cada poste é igual à tensão eficaz da fonte de alimentação, já que a corrente no circuito é zero e não há queda de tensão ao longo da linha).

5.3 – Distribuição da potência solicitada pelos consumidores

A distribuição da potência solicitada pelos consumidores ao longo dos postes da rede de distribuição influencia no comportamento da tensão eficaz da rede. Se a potência solicitada estiver mais concentrada nos postes do início da rede, as quedas de tensão ao longo da linha serão menores. Se a potência solicitada estiver mais concentrada nos postes do fim da rede de distribuição as quedas de tensão ao longo da linha serão maiores, portanto os níveis de tensão eficaz nos postes ao longo da linha variam com o modo com que as cargas estão distribuídas na rede de distribuição.

Observou-se pelas simulações e resultados que os níveis de tensão eficaz mais críticos nos postes ao longo da rede de distribuição acontecem quando a potência se encontra mais concentrada nos postes 4 e 5 e que os níveis de tensão eficaz melhoram quando concentramos a carga nos postes 1 e 2.

5.4 – Tipos de carga instalada na rede

Em uma rede de distribuição podemos ter diversos tipos de carga instalada:

- Resistivas.
- Capacitivas.
- Indutivas.
- Não lineares.

Estas cargas podem estar ligadas entre si em série ou paralelo, formando assim conjuntos mais complexos e variados.

Na implementação em Matlab foram usadas somente cargas lineares, já que não se tem ainda um modelo matemático definido que represente uma carga não linear tipo fonte de tensão. As análises harmônicas foram feitas através das impedâncias. Nas simulações em Simulink foram utilizadas cargas lineares e não lineares representadas por componentes de circuitos do toolbox SimPowerSystems.

Observou-se que os níveis de tensão eficaz variam de acordo com o tipo de carga instalada na rede de distribuição.

Os níveis de tensão eficaz melhoram quando colocamos cargas capacitivas na rede e os valores mais críticos acontecem para cargas resistivas e indutivas. As cargas não lineares solicitam componentes harmônicas de corrente, fazendo com que ocorram quedas de tensão harmônica na rede, distorcendo a forma de onda de tensão nos postes ao longo da rede de distribuição.

Os níveis mais críticos de THD foram observados quando a carga não linear estava localizada no poste cinco e com a inserção do banco de capacitores, pois quanto mais distante estiver a carga não linear da fonte de alimentação, maior a queda de tensão harmônica ao longo da rede de distribuição, e pior fica a forma de onda de tensão e conseqüentemente maior o THD.

A inserção do banco de capacitores, no caso em estudo, provoca amplificações harmônicas principalmente no de terceira ordem, devido à ressonâncias que podem ocorrer entre o banco de capacitores e as indutâncias da linha de distribuição, das cargas e do transformador de distribuição, aumentando o nível do THD, que pode chegar a níveis maiores que os permitidos por norma. Nas simulações foi utilizada uma impedância de correção harmônica para evitar estas amplificações em série com o banco de capacitores, e pelos resultados mostrados no capítulo 4, foi comprovada a eficácia deste método.

5.5 – Presença de componentes harmônicas na tensão de alimentação

Em uma rede de distribuição secundária podemos ter componentes harmônicas que não sejam inseridas no circuito por cargas não lineares e sim pela fonte de alimentação. Na implementação em Matlab foram feitas simulações considerando a tensão de entrada com valor de 1 pu e frequências variando de 180 a 780 Hz (da harmônica de terceira à de décima terceira ordem) para que o comportamento harmônico da rede pudesse ser analisado.

Observou-se pelas simulações e resultados do capítulo 4 que podem haver amplificações para os harmônicos de terceira e quinta ordem se houver cargas capacitivas ou inserção de banco de capacitores para correção do nível de tensão eficaz, sendo as amplificações de terceiro harmônico os mais críticas. O método da inserção de impedância de correção harmônica também atenua os problemas de amplificação dos harmônicos oriundos da fonte de alimentação.

5.6 – Instalação de banco de capacitores

A instalação de banco de capacitores em redes de distribuição aumenta o nível da tensão eficaz, pois o banco de capacitores fornece parte da potência reativa consumida pelas reatâncias indutivas do transformador, das cargas ligadas aos postes e da linha, diminuindo a circulação de corrente no circuito e diminuindo as quedas de tensão ao longo da linha de distribuição. Ao inserirmos um banco de capacitores no último poste de uma rede de distribuição, ele fornece a componente reativa da corrente fazendo com que as perdas na linha diminuam, além de melhorar o fator de deslocamento.

Observou-se pelas simulações em Matlab e Simulink, com resultados apresentados no capítulo 4, que os níveis de tensão eficaz ao longo da rede de distribuição aumentam após a inserção de banco de capacitores, com ou sem a presença de cargas não lineares instaladas na rede.

5.7 – Conclusões finais

De forma geral, conclui-se que a inserção e retirada controlada de capacitores no final do alimentador é uma solução confiável para correção de tensão eficaz em redes de distribuição secundária, apresentando as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens:

- Aumento do nível de tensão eficaz ao longo de toda a rede de distribuição, independentemente do tipo de cargas ligadas à rede.
- Diminuição das perdas na rede de distribuição.
- Melhoria do fator de deslocamento da rede de distribuição.
- A tecnologia já é bastante conhecida.
- O chaveamento do banco de capacitores em baixa tensão é mais simples e de menor custo do que em alta tensão.
- O custo de capacitores para baixa tensão é menor.

Desvantagens:

- Capacitância do banco de capacitores alta, implicando em grande número de elementos.
- Podem ocorrer transitórios de corrente ao inserir ou retirar o banco de capacitores.
- Podem ocorrer amplificações harmônicas (principalmente de terceira e quinta ordem).
- Aumento do THD de tensão da rede de distribuição.

Os transitórios de corrente durante a operação do banco de capacitores podem ser evitados usando-se um circuito de chaveamento com chaves eletrônicas com controle apropriado.

Os problemas de amplificação harmônica devido aos capacitores podem ser resolvidos dessintonizando a ressonância através da inserção de uma impedância de correção harmônica em série com o banco capacitivo, conforme verificado no estudo.

5.8 – Sugestões para estudos futuros a serem desenvolvidos nesta área

O controle de tensão eficaz em redes secundárias de baixa tensão através da inserção automática de banco de capacitores é relativamente novo, portanto ainda tem muito campo para estudo. A seguir são citadas algumas sugestões:

- Controle do fator de potência através de inserção de banco de capacitores e filtro de harmônico (controle de tensão eficaz, de fator de deslocamento e THD).
- Chaveamento de capacitores em baixa tensão.
- Controle de tensão eficaz através de capacitores variáveis com chaveamento a tiristores.
- Emprego de inversores PWM com análise de custo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA **Resolução número 505 de 26 de novembro de 2001**. ANEEL, Brasil, 2001.
- [2] CIPOLI, J.A. **Engenharia de Distribuição**. Ed. Qualitymark, Brasil, 1993.
- [3] SHORT, T.A. **Electric Power Distribution HandBook**. Ed. CRC Press, 2004.
- [4] JOSÉ RUBENS M. Jr; RESENDE J.W. SAMESINA M.I.; GOMES D.B. **Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários**. II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Brasil, 2003.
- [5] BOYLASTED, R.L.; **Introdução a análise de circuitos**. 10ª edição, Ed. Pearson Prentice Hall, Brasil, 2003.
- [6] DAVIS, R.M.; JEWELL, A.R. **Single Phase Supply Impedance: Its Measurement and Influence on Non-Linear (Rectifier) Loads**. EPE, Itália, 1991.
- [7] GONZALES D.A.; MCCALL J.C. **Design of Filters Harmonic Distortion in Industrial Power Systems**. IEEE, Trans. on Industry Applications, vol. 23, nº 3, mai/jun 1987, págs. 504 – 511.
- [8] ELETROBRAS **Coleção Distribuição de Energia Elétrica – Volume 1 – Planejamento de Sistemas de Distribuição**. Editora Campus, Brasil, 1982.
- [9] ELETROBRAS **Coleção Distribuição de Energia Elétrica – Volume 2 – Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição**. Editora Campus, Brasil, 1986.
- [10] ELETROBRAS **Coleção Distribuição de Energia Elétrica – Volume 3 –Desempenho de Sistemas de Distribuição**. Editora Campus, Brasil, 1982.
- [11] ELETROBRAS **Coleção Distribuição de Energia Elétrica – Volume 4 –Manutenção e Operação de Sistemas de Distribuição**. Editora Campus, Brasil, 1982.
- [12] ELETROBRAS **Coleção Distribuição de Energia Elétrica – Volume 5 – Controle de tensão de Sistemas de Distribuição**. Editora Campus, Brasil, 1985
- [13] ELETROBRAS **Coleção Distribuição de Energia Elétrica – Volume 6 – Manual de Construção de Redes**. Editora Campus, Brasil, 1988.
- [14] ELETROBRAS, UFF, EDUFF **Coleção Distribuição de Energia Elétrica – Volume 7 – Aterramento e proteção contra sobretensões em sistemas aéreos de distribuição**. Editora Universitária, Brasil, 1990

- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Transformadores para redes aéreas de distribuição – Padronização**. NBR 5440, Brasil, 1987.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Transformadores de Potência (Método de ensaio)**. NBR 5380, Brasil, 1988.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Transformadores de Potência (Especificação)**. NBR 5440, Brasil, 1988.
- [18] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA **Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica**. ANEEL, Brasil, 2000.
- [19] SIMONETTI, D.S.L. **Cargas Eletrônicas: Harmônicas e Qualidade de Energia**, tutorial COBEP, BRASIL, 1999.
- [20] SIMONETTI, D.S.L. **Qualidade de Energia**, Edição do autor, BRASIL, 2003.
- [21] TOSTES M.E.L.; MOURA C.C.M.; YOKOYAMA A. T.; LUZ A.L.; BEZERRA U.H.; GAMA P.S.J. **Impactos Harmônicos em Redes de Distribuição de Energia Oriundos da Iluminação Pública**. XV SENDI – Seminário Nacional de Energia Elétrica, Brasil, 2002.
- [22] OLIVEIRA J.T.; SILVA E.F.; BEZERRA Jr G. **Correção Ótima de Fator de Potência de Sistemas Elétricos Industriais com Harmônicas**. II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Brasil, 2003.
- [23] OLIVEIRA J.T.; MEDEIROS Jr M.F.; SILVA E.F.; BEZERRA Jr G. **Fluxo de Carga Harmônico Para Operação e Planejamento de Sistemas Radiais de Distribuição através dos Métodos Soma de Potências e Montagem da Matriz Impedância de Barras**. II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Brasil, 2003.
- [24] MANHÃES L.R.; CAVELLUCCI C.; LYRA FILHO C.; FERNANDES C.P. **Abordagem Unificada para a Instalação de Capacitores e Reconfigurações Com Objetivo de Redução de Perdas**. II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Brasil, 2003.
- [25] CASTRO PAIVA L.A.; VILAS BOAS G.J.; ANDRADE H.R. **Correção de Fator de Potência em Alimentadores na Baixa Tensão dos Transformadores e em Unidades Consumidoras - Extensão do Projeto Aumento da Eficiência Energética em Alimentadores**. II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Brasil, 2003.
- [26] DECKMAM S.M.; POMILIO J.A.; MERTENS E.A. DIAS L.F.S. **Uso de Filtro em Redes de Distribuição com Cargas Não -Lineares**, CBA, Brasil, 2004.

- [27] CHIH-JU CHOU; CHIH-WEN LIU; JUNE-YOWN LEE; KUNE-DA LEE **Optimal Planning of Large Passive – Harmonic – Filters Set at High Voltage Level.** IEE – Transactions on Power Systems, Vol. 15, NO 1, February 2000.
- [28] BEZERRA U.H.; TOSTES M.E.L.; ARAÚJO A.C.S.; GARCEZ J.N.; MESQUITA J.E.; TUPIASSÚ A. A. **Harmônicas Geradas por Consumidores em Baixa Tensão da Rede de Distribuição de Energia Elétrica de Belém (PA).** II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Brasil, 2003.
- [29] JOSÉ RUBENS M. Jr. **Desenvolvimento e Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários de Distribuição.** XVI SNPTEE – Seminário Especial de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasil, 2001.
- [30] DUGAN R.C.; MCGRANAGHAN M.F.; SANTOSO S.; BEATY H.W. **Electrical Power Systems Quality.** Editora McGraw Hill, EUA, 2003.
- [31] TORO V.D. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.,Brasil, 1994.
- [32] OLIVEIRA J.C.; COGO J.R.; ABREU J.P. **Transformadores: Teoria e Ensaio.** ELETROBRÁS, EFEI- Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Ed. Edgard Blücher LTDA, Brasil, 1984.
- [33] MATSUMOTO E. Y. **MATLAB 6 – Fundamentos de Programação,** Editora Érica, Brasil, 2001.
- [34] WEG – **Manual para Correção do Fator de Potência,** Brasil, 2005.

ANEXOS

ANEXO A – Programa implementado em Matlab

```
% Entrada dos dados do sistema de distribuição (rede de distribuição,  
% transformador e fonte)  
  
nposte=input('Entre com o numero de postes da rede de distribuição(5,6 ou 7) ');  
Lfiltro = input('Entre com a indutancia do filtro em Henry ou 1e+10 ');  
Cfiltro = input('Entre com a Capacitancia do filtro em Faraday ou 1e-10 ');  
Vf = input('Entre com a tensao eficaz de entrada em pu ');  
h = input('Entre com a ordem da frequencia da harmonica a ser analisada ');  
Cbanco = input('Entre com o valor da capacitancia de cada unidade do banco de  
capacitores ');  
S = input('Entre com a potencia aparente do transformador por fase em Va ');  
L1t = input('Entre com a indutancia do primario do transformador em pu ');  
R1t= input('Entre com a resistencia do primario do transformador em pu ');  
L2t = input('Entre com a indutancia do secundario do transformador em pu ');  
R2t= input('Entre com a resistencia do secundario do transformador em pu ');  
Rm= input('Entre com a resistencia de magnetizacao do transformador em pu ');  
Lm = input('Entre com a indutancia de magnetizacao do transformador em pu ');  
dep = input('Entre com a distancia entre postes em km ');  
Ll = input('Entre com a indutancia do cabo em henrys por Km ');  
Rl = input('Entre com a resistencia do cabo em ohms por km ');  
corre=input(' Se desejar fazer correção harmonica digite 1, se nao digite 0 ');  
if nposte==6  
  
%Preenchimento da matriz de potencias para linha de distribuição com 6 postes  
  
S1=[0.2*S 0.1*S 0.1*S 0.2*S 0.28*S 0.25*S 0.1*S 0.3*S 0.2*S  
0.4*S 1e-10 1e-10];  
S2=[0.2*S 0.1*S 0.3*S 1e-10 0.12*S 0.35*S 0.3*S 0.1*S 1e-10  
0.2*S 1e-10 1e-10];  
S3=[0.1*S 0.2*S 0.1*S 0.3*S 0.12*S 0.1*S 1e-10 0.25*S 0.1*S  
1e-10 0.3*S 1e-10];  
S4=[0.1*S 0.2*S 0.1*S 0.4*S 0.18*S 1e-10 0.3*S 1e-10 0.35*S  
0.1*S 1e-10 1e-10];  
S5=[0.2*S 0.2*S 0.1*S 1e-10 0.2*S 0.1*S 0.1*S 0.15*S 0.2*S  
1e-10 0.4*S 1e-10];  
S6=[0.2*S 0.2*S 0.3*S 0.1*S 0.1*S 0.2*S 0.2*S 0.2*S 0.15*S  
0.3*S 0.3*S 1e-10];  
S7=[1e-10 1e-10 1e-10 1e-10 1e-10 1e-10 1e-10 1e-10 1e-10  
1e-10 1e-10 1e-10];  
  
% Preenchimento da matriz de fatores de deslocamento para linha de  
distribuição com 6 postes  
  
FD1=[.70 .85 .90 .90 .75 .85 .75 .70 .85 .95 .80 .90];  
FD2=[.95 .70 .85 .75 .90 .70 .85 .95 .75 .95 .85 .70];  
FD3=[.75 .85 .95 .70 .75 .95 .70 .70 .85 .75 .80 .70];  
FD4=[.80 .85 .75 .75 .70 .70 .95 .85 .95 .75 .75 .90];  
FD5=[.80 .80 .70 .75 .75 .95 .75 .80 .85 .75 .90 .90];  
FD6=[.80 .80 .70 .75 .75 .95 .75 .80 .85 .75 .90 .90];  
FD7=[.99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99];  
elseif nposte==5
```

```

    % Preenchimento da matriz de potencias para linha de distribuição com 5
    postes

```

```

    S1=[0.3*S    0.2*S    0.15*S    0.1*S    0.38*S    0.25*S    0.4*S    0.2*S    0.25*S
0.25*S    0.33*S    1e-10];
    S2=[0.25*S    0.1*S    0.3*S    0.2*S    0.22*S    0.35*S    0.25*S    0.4*S    0.25*S
0.22*S    1e-10    1e-10];
    S3=[0.2*S    0.3*S    0.15*S    0.3*S    0.12*S    0.2*S    0.15*S    0.35*S    0.15*S
0.18*S    0.27*S    1e-10];
    S4=[0.2*S    0.15*S    0.3*S    0.4*S    0.18*S    1e-10    0.15*S    1e-10    0.2*S
0.37*S    0.22*S    1e-10];
    S5=[0.2*S    0.4*S    0.25*S    1e-10    0.25*S    0.35*S    0.2*S    0.2*S    0.15*S
0.13*S    0.33*S    1e-10];
    S6=[1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10
1e-10    1e-10    1e-10];
    S7=[1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10    1e-10
1e-10    1e-10    1e-10];

```

```

    % Preenchimento da matriz de fatores de deslocamento para linha de
    distribuição com 5 postes

```

```

    FD1=[.70 .85 .90 .90 .75 .85 .85 .70 .75 .95 .80 .90];
    FD2=[.95 .70 .85 .75 .90 .80 .85 .95 .85 .85 .75 .60];
    FD3=[.75 .95 .95 .80 .85 .95 .90 .70 .85 .75 .70 .70];
    FD4=[.80 .75 .75 .85 .70 .70 .75 .85 .95 .75 .75 .70];
    FD5=[.80 .80 .70 .95 .85 .95 .75 .80 .85 .75 .90 .90];
    FD6=[.99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99];
    FD7=[.99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99 .99];

```

```

else

```

```

    % Preenchimento da matriz de potencias para linha de distribuição com 7
    postes

```

```

    S1=[0.2*S    0.1*S    0.1*S    0.1*S    0.28*S    0.25*S    0.1*S    0.2*S    0.3*S
0.05*S    0.1*S    1e-10];
    S2=[0.2*S    0.1*S    0.3*S    1e-10    0.12*S    0.35*S    0.1*S    0.1*S    1e-10
0.05*S    0.2*S    1e-10];
    S3=[0.1*S    0.2*S    0.1*S    0.3*S    0.12*S    0.1*S    0.1*S    0.18*S    0.2*S
0.12*S    0.3*S    1e-10];
    S4=[0.1*S    0.1*S    0.1*S    0.4*S    0.08*S    1e-10    0.13*S    0.12*S    0.2*S
0.18*S    0.05*S    1e-10];
    S5=[0.2*S    0.2*S    0.1*S    1e-10    0.2*S    0.3*S    0.17*S    0.2*S    0.15*S
0.3*S    0.1*S    1e-10];
    S6=[0.1*S    0.2*S    0.1*S    0.1*S    0.1*S    1e-10    0.15*S    0.1*S    1e-10
0.1*S    0.1*S    1e-10];
    S7=[0.1*S    0.1*S    0.2*S    0.1*S    0.2*S    1e-10    0.25*S    0.1*S    0.15*S
0.2*S    0.05*S    1e-10];

```

```

    % Preenchimento da matriz de fatores de deslocamento para linha de
    distribuição com 7 postes

```

```

    FD2=[.95 .70 .85 .75 .90 .70 .85 .95 .85 .75 .75 .90];
    FD3=[.75 .75 .95 .80 .85 .95 .90 .70 .85 .75 .70 .70];
    FD4=[.70 .75 .85 .85 .70 .70 .95 .85 .95 .85 .75 .70];
    FD5=[.80 .80 .70 .75 .85 .95 .75 .80 .85 .75 .90 .90];

```

```

        FD6=[.80 .80 .70 .75 .85 .95 .75 .80 .85 .75 .90 .90];
        FD7=[.80 .80 .70 .75 .75 .95 .75 .80 .85 .75 .90 .90];
    end
for m=1:12;
    for n=1:12;

        % Preenchimento das matrizes de potencias ativa e reativa por poste

        P1(m,n)=S1(m)*FD1(n);
        Q1(m,n)=S1(m)*sin(acos(FD1(n)));
        P2(m,n)=S2(m)*FD2(n);
        Q2(m,n)=S2(m)*sin(acos(FD2(n)));
        P3(m,n)=S3(m)*FD3(n);
        Q3(m,n)=S3(m)*sin(acos(FD3(n)));
        P4(m,n)=S4(m)*FD4(n);
        Q4(m,n)=S4(m)*sin(acos(FD4(n)));
        P5(m,n)=S5(m)*FD5(n);
        Q5(m,n)=S5(m)*sin(acos(FD5(n)));
        P6(m,n)=S6(m)*FD6(n);
        Q6(m,n)=S6(m)*sin(acos(FD6(n)));
        P7(m,n)=S7(m)*FD7(n);
        Q7(m,n)=S7(m)*sin(acos(FD7(n)));
    end
end

% Calculo das impedancias do sistema de distribuicao sem insercao de
% capacitores

f=60;
Rf=1e-6;
Lf=1e-6;
Rli=Rl*dep;
Lli=Ll*dep;
Zb=(127^2)/S;
Zm=(Rm*j*2*pi*f*Lm)/((Rm+j*2*pi*f*Lm)*(Zb));
Zf=(Rf+j*(2*pi*f*Lf))/Zb;
Z1t=R1t+j*(L1t);
Z2t=R2t+j*(L2t);
ZFT=Zf+Z1t+Z2t;
Zli=(Rli+j*(2*pi*f*Lli))/Zb;
Xlfhar=(2*pi*f*Lfiltro)/Zb;
Xcfhar=(1/(2*pi*f*Cfiltro))/Zb;
Xfhar=j*(Xlfhar-Xcfhar);
for k=1:12;
    for l=1:12;
        Z1(l,k)=(((127^2/(P1(l,k)*Zb))*j*(127^2/(Q1(l,k)*Zb)))/(((127^2/(P1(l,k)*Zb))+j*(127^2/(Q1(l,k)*Zb)))));
        Z1fhar(l,k)=(Z1(l,k)*Xfhar)/(Z1(l,k)+Xfhar);
        Z2(l,k)=(((127^2/(P2(l,k)*Zb))*j*(127^2/(Q2(l,k)*Zb)))/(((127^2/(P2(l,k)*Zb))+j*(127^2/(Q2(l,k)*Zb)))));
        Z3(l,k)=(((127^2/(P3(l,k)*Zb))*j*(127^2/(Q3(l,k)*Zb)))/(((127^2/(P3(l,k)*Zb))+j*(127^2/(Q3(l,k)*Zb)))));
        Z4(l,k)=(((127^2/(P4(l,k)*Zb))*j*(127^2/(Q4(l,k)*Zb)))/(((127^2/(P4(l,k)*Zb))+j*(127^2/(Q4(l,k)*Zb)))));
        Z5(l,k)=(((127^2/(P5(l,k)*Zb))*j*(127^2/(Q5(l,k)*Zb)))/(((127^2/(P5(l,k)*Zb))+j*(127^2/(Q5(l,k)*Zb)))));
    end
end

```

```

Z6(1,k)=(((127^2/(P6(1,k)*Zb))*j*(127^2/(Q6(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P6(1,k)*Zb))+j*(
(127^2/(Q6(1,k)*Zb)))));
Z7(1,k)=(((127^2/(P7(1,k)*Zb))*j*(127^2/(Q7(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P7(1,k)*Zb))+j*(
(127^2/(Q7(1,k)*Zb)))));
if nposte==6
    Z7(1,k)=1e+10;
else
    if nposte==5
        Z6(1,k)=1e+10;
        Z7(1,k)=1e+10;
    end
end
ZA=((Zf+Z1t)*Zm)/(Zf+Z1t+Zm);
ZB(1,k)=((ZA+Z2t)*Z1fhar(1,k))/(ZA+Z2t+Z1fhar(1,k));
ZC(1,k)=((ZB(1,k)+Zli)*Z2(1,k))/(ZB(1,k)+Zli+Z2(1,k));
ZD(1,k)=((ZC(1,k)+Zli)*Z3(1,k))/(ZC(1,k)+Zli+Z3(1,k));
ZE(1,k)=((ZD(1,k)+Zli)*Z4(1,k))/(ZD(1,k)+Zli+Z4(1,k));
ZF(1,k)=((ZE(1,k)+Zli)*Z5(1,k))/(ZE(1,k)+Zli+Z5(1,k));
ZG(1,k)=((ZF(1,k)+Zli)*Z6(1,k))/(ZF(1,k)+Zli+Z6(1,k));
ZH(1,k)=((Z7(1,k)+Zli)*Z6(1,k))/(Z7(1,k)+Zli+Z6(1,k));
ZI(1,k)=((ZH(1,k)+Zli)*Z5(1,k))/(ZH(1,k)+Zli+Z5(1,k));
ZJ(1,k)=((ZI(1,k)+Zli)*Z4(1,k))/(ZI(1,k)+Zli+Z4(1,k));
ZK(1,k)=((ZJ(1,k)+Zli)*Z3(1,k))/(ZJ(1,k)+Zli+Z3(1,k));
ZL(1,k)=((ZK(1,k)+Zli)*Z2(1,k))/(ZK(1,k)+Zli+Z2(1,k));
ZM(1,k)=((ZL(1,k)+Zli)*Z1fhar(1,k))/(ZL(1,k)+Zli+Z1fhar(1,k));
ZT(1,k)=ZM(1,k)+ZFT;

% Calculo das tensoes e correntes em cada poste sem inserção de capacitores

IT(1,k)=Vf/ZT(1,k);
ITef(1,k)=abs(IT(1,k));
FI(1,k)=angle(IT(1,k))*180/pi;
V1(1,k)=ZM(1,k)*IT(1,k);
V1ef(1,k)=abs(V1(1,k));
I1(1,k)=V1(1,k)/Z1fhar(1,k);
IL(1,k)=IT(1,k)-I1(1,k);
ILef(1,k)=abs(IL(1,k));
V2(1,k)=ZL(1,k)*IL(1,k);
V2ef(1,k)=abs(V2(1,k));
I2(1,k)=V2(1,k)/Z2(1,k);
IK(1,k)=IL(1,k)-I2(1,k);
V3(1,k)=ZK(1,k)*IK(1,k);
V3ef(1,k)=abs(V3(1,k));
I3(1,k)=V3(1,k)/Z3(1,k);
IJ(1,k)=IK(1,k)-I3(1,k);
V4(1,k)=ZJ(1,k)*IJ(1,k);
V4ef(1,k)=abs(V4(1,k));
I4(1,k)=V4(1,k)/Z4(1,k);
II(1,k)=IJ(1,k)-I4(1,k);
V5(1,k)=ZI(1,k)*II(1,k);
V5ef(1,k)=abs(V5(1,k));
I5(1,k)=V5(1,k)/Z5(1,k);
IH(1,k)=II(1,k)-I5(1,k);
V6(1,k)=ZH(1,k)*IH(1,k);
V6ef(1,k)=abs(V6(1,k));
I6(1,k)=V6(1,k)/Z6(1,k);
I7(1,k)=IH(1,k)-I6(1,k);

```

```

V7(1,k)=Z7(1,k)*I7(1,k);
V7ef(1,k)=abs(V7(1,k));

% Calculo do banco de capacitores para corrigir a tensao eficaz

ncap=1370e-6/Cbanco;
Lcorre=1/(4*pi*pi*f*f*Cbanco);
if corre==1
    Xcorre=(2*pi*f*Lcorre/Zb)-(1/(2*pi*f*Cbanco))/Zb;
else
    Xcorre=0;
end
V5efcap(1,k)=V5ef(1,k);
V6efcap(1,k)=V6ef(1,k);
V7efcap(1,k)=V7ef(1,k);
Cap(1,k)=1e-10;
for kcl=1:10:30;
    if nposte==5
        Z6cap(1,k)=Z6(1,k);
        Z7cap(1,k)=Z7(1,k);
        if V5efcap(1,k)<0.935
            Cap(1,k)=Cap(1,k)+(ncap*Cbanco);
            Xcap(1,k)=-(1/(2*pi*f*Cap(1,k)))/Zb;
            Zcap(1,k)=j*(Xcap(1,k)+Xcorre);
            Z5cap(1,k)=Z5(1,k)*Zcap(1,k)/(Z5(1,k)+Zcap(1,k));
        else
            Cap(1,k)=Cap(1,k);
            Xcap(1,k)=-(1/(2*pi*f*Cap(1,k)))/Zb;
            Zcap(1,k)=j*Xcap(1,k);
            Z5cap(1,k)=Z5(1,k)*Zcap(1,k)/(Z5(1,k)+Zcap(1,k));
        end
    elseif nposte==6
        Z5cap(1,k)=Z5(1,k);
        Z7cap(1,k)=Z7(1,k);
        if V6efcap(1,k)<0.935
            Cap(1,k)=Cap(1,k)+(ncap*Cbanco);
            Xcap(1,k)=-(1/(2*pi*f*Cap(1,k)))/Zb;
            Zcap(1,k)=j*(Xcap(1,k)+Xcorre);
            Z6cap(1,k)=Z6(1,k)*Zcap(1,k)/(Z6(1,k)+Zcap(1,k));
        else
            Cap(1,k)=Cap(1,k);
            Xcap(1,k)=-(1/(2*pi*f*Cap(1,k)))/Zb;
            Zcap(1,k)=j*Xcap(1,k);
            Z6cap(1,k)=Z6(1,k)*Zcap(1,k)/(Z6(1,k)+Zcap(1,k));
        end
    else
        Z5cap(1,k)=Z5(1,k);
        Z6cap(1,k)=Z6(1,k);
        if V7efcap(1,k)<0.935
            Cap(1,k)=Cap(1,k)+(ncap*Cbanco);
            Xcap(1,k)=-(1/(2*pi*f*Cap(1,k)))/Zb;
            Zcap(1,k)=j*(Xcap(1,k)+Xcorre);
            Z7cap(1,k)=Z7(1,k)*Zcap(1,k)/(Z7(1,k)+Zcap(1,k));
        else
            Cap(1,k)=Cap(1,k);
            Xcap(1,k)=-(1/(2*pi*f*Cap(1,k)))/Zb;
        end
    end
end

```

```

                                Zcap(1,k)=j*Xcap(1,k);
                                Z7cap(1,k)=Z7(1,k)*Zcap(1,k)/(Z7(1,k)+Zcap(1,k));
                                end
                                end

% Calculo das impedancias do sistema de distribuicao com insercao de
% capacitores

ZFcap(1,k)=((ZE(1,k)+Zli)*Z5cap(1,k))/(ZE(1,k)+Zli+Z5cap(1,k));
ZGcap(1,k)=((ZFcap(1,k)+Zli)*Z6cap(1,k))/(ZFcap(1,k)+Zli+Z6cap(1,k));
ZHcap(1,k)=((Z7cap(1,k)+Zli)*Z6cap(1,k))/(Z7cap(1,k)+Zli+Z6cap(1,k));
ZIcap(1,k)=((ZHcap(1,k)+Zli)*Z5cap(1,k))/(ZHcap(1,k)+Zli+Z5cap(1,k));
ZJcap(1,k)=((ZIcap(1,k)+Zli)*Z4(1,k))/(ZIcap(1,k)+Zli+Z4(1,k));
ZKcap(1,k)=((ZJcap(1,k)+Zli)*Z3(1,k))/(ZJcap(1,k)+Zli+Z3(1,k));
ZLcap(1,k)=((ZKcap(1,k)+Zli)*Z2(1,k))/(ZKcap(1,k)+Zli+Z2(1,k));
ZMcap(1,k)=((ZLcap(1,k)+Zli)*Z1fhar(1,k))/(ZLcap(1,k)+Zli+Z1fhar(1,k));
ZTcap(1,k)=ZMcap(1,k)+ZFT;

% Calculo das tensoes e correntes em cada poste com insercao de capacitores

ITcap(1,k)=Vf/ZTcap(1,k);
ITefcap(1,k)=abs(ITcap(1,k));
FIcap(1,k)=angle(ITcap(1,k))*180/pi;
V1cap(1,k)=ZMcap(1,k)*ITcap(1,k);
V1efcap(1,k)=abs(V1cap(1,k));
I1cap(1,k)=V1cap(1,k)/Z1fhar(1,k);
ILcap(1,k)=ITcap(1,k)-I1cap(1,k);
I1efcap(1,k)=abs(ILcap(1,k));
V2cap(1,k)=ZLcap(1,k)*ILcap(1,k);
V2efcap(1,k)=abs(V2cap(1,k));
I2cap(1,k)=V2cap(1,k)/Z2(1,k);
IKcap(1,k)=ILcap(1,k)-I2cap(1,k);
V3cap(1,k)=ZKcap(1,k)*IKcap(1,k);
V3efcap(1,k)=abs(V3cap(1,k));
I3cap(1,k)=V3cap(1,k)/Z3(1,k);
IJcap(1,k)=IKcap(1,k)-I3cap(1,k);
V4cap(1,k)=ZJcap(1,k)*IJcap(1,k);
V4efcap(1,k)=abs(V4cap(1,k));
I4cap(1,k)=V4cap(1,k)/Z4(1,k);
IIcap(1,k)=IJcap(1,k)-I4cap(1,k);
V5cap(1,k)=ZIcap(1,k)*IIcap(1,k);
V5efcap(1,k)=abs(V5cap(1,k));
I5cap(1,k)=V5cap(1,k)/Z5cap(1,k);
IHcap(1,k)=IIcap(1,k)-I5cap(1,k);
V6cap(1,k)=ZHcap(1,k)*IHcap(1,k);
V6efcap(1,k)=abs(V6cap(1,k));
I6cap(1,k)=V6cap(1,k)/Z6cap(1,k);
I7cap(1,k)=IHcap(1,k)-I6cap(1,k);
V7cap(1,k)=Z7cap(1,k)*I7cap(1,k);
V7efcap(1,k)=abs(V7cap(1,k));

% Calculo das impedancias do sistema de distribuicao sem insercao de
% capacitores para a harmonica de ordem h

Zmhh=(Rm*j*2*pi*h*f*Lm)/((Rm+j*2*pi*h*f*Lm)*(Zb));
Zfhh=(Rf+j*(2*pi*h*f*Lf))/Zb;
Z1thh=R1t+j*(L1t*h);

```

```

Z2tthh=R2t+j*(L2t*h);
ZFThh=Zfhh+Z1tthh+Z2tthh;
Zlihh=(Rli+j*(2*pi*h*f*Lli))/Zb;
Xlfharhh=(2*pi*h*f*Lfiltro)/Zb;
Xcfharhh=(1/(2*pi*h*f*Cfiltro))/Zb;
Xfharhh=j*(Xlfharhh-Xcfharhh);
Z1hh(1,k)=(((127^2/(P1(1,k)*Zb))*j*h*(127^2/(Q1(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P1(1,k)*Zb)
)+j*h*(127^2/(Q1(1,k)*Zb)))));
Z1fharhh(1,k)=(Z1hh(1,k)*Xfharhh)/(Z1hh(1,k)+Xfharhh);
Z2hh(1,k)=(((127^2/(P2(1,k)*Zb))*j*h*(127^2/(Q2(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P2(1,k)*Zb)
)+j*h*(127^2/(Q2(1,k)*Zb)))));
Z3hh(1,k)=(((127^2/(P3(1,k)*Zb))*j*h*(127^2/(Q3(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P3(1,k)*Zb)
)+j*h*(127^2/(Q3(1,k)*Zb)))));
Z4hh(1,k)=(((127^2/(P4(1,k)*Zb))*j*h*(127^2/(Q4(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P4(1,k)*Zb)
)+j*h*(127^2/(Q4(1,k)*Zb)))));
Z5hh(1,k)=(((127^2/(P5(1,k)*Zb))*j*h*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P5(1,k)*Zb)
)+j*h*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))));
Z6hh(1,k)=(((127^2/(P6(1,k)*Zb))*j*h*(127^2/(Q6(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P6(1,k)*Zb)
)+j*h*(127^2/(Q6(1,k)*Zb)))));
Z7hh(1,k)=(((127^2/(P7(1,k)*Zb))*j*h*(127^2/(Q7(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P7(1,k)*Zb)
)+j*h*(127^2/(Q7(1,k)*Zb)))));
if nposte==6
    Z7hh(1,k)=1e+10;
elseif nposte==5
    Z6hh(1,k)=1e+10;
    Z7hh(1,k)=1e+10;
end
ZAhh=((Zfhh+Z1tthh)*Zmhh)/(Zfhh+Z1tthh+Zmhh);
ZBhh(1,k)=((ZAhh+Z2tthh)*Z1fharhh(1,k))/(ZAhh+Z2tthh+Z1fharhh(1,k));
ZChh(1,k)=((ZBhh(1,k)+Zlihh)*Z2hh(1,k))/(ZBhh(1,k)+Zlihh+Z2hh(1,k));
ZDhh(1,k)=((ZChh(1,k)+Zlihh)*Z3hh(1,k))/(ZChh(1,k)+Zlihh+Z3hh(1,k));
ZEhh(1,k)=((ZDhh(1,k)+Zlihh)*Z4hh(1,k))/(ZDhh(1,k)+Zlihh+Z4hh(1,k));
ZFhh(1,k)=((ZEhh(1,k)+Zlihh)*Z5hh(1,k))/(ZEhh(1,k)+Zlihh+Z5hh(1,k));
ZGhh(1,k)=((ZFhh(1,k)+Zlihh)*Z6hh(1,k))/(ZFhh(1,k)+Zlihh+Z6hh(1,k));
ZHhh(1,k)=((Z7hh(1,k)+Zlihh)*Z6hh(1,k))/(Z7hh(1,k)+Zlihh+Z6hh(1,k));
ZIhh(1,k)=((ZHhh(1,k)+Zlihh)*Z5hh(1,k))/(ZHhh(1,k)+Zlihh+Z5hh(1,k));
ZJhh(1,k)=((ZIhh(1,k)+Zlihh)*Z4hh(1,k))/(ZIhh(1,k)+Zlihh+Z4hh(1,k));
ZKhh(1,k)=((ZJhh(1,k)+Zlihh)*Z3hh(1,k))/(ZJhh(1,k)+Zlihh+Z3hh(1,k));
ZLhh(1,k)=((ZKhh(1,k)+Zlihh)*Z2hh(1,k))/(ZKhh(1,k)+Zlihh+Z2hh(1,k));
ZMhh(1,k)=((ZLhh(1,k)+Zlihh)*Z1fharhh(1,k))/(ZLhh(1,k)+Zlihh+Z1fharhh(1,k));
ZThh(1,k)=ZMhh(1,k)+ZFThh;

% Calculo das tensoes e correntes em cada poste sem insercao de capacitores

IThh(1,k)=Vf/ZThh(1,k);
ITefhh(1,k)=abs(IThh(1,k));
V1hh(1,k)=ZMhh(1,k)*IThh(1,k);
V1efhh(1,k)=abs(V1hh(1,k));
I1hh(1,k)=V1hh(1,k)/Z1fharhh(1,k);
ILhh(1,k)=IThh(1,k)-I1hh(1,k);
ILefhh(1,k)=abs(ILhh(1,k));
V2hh(1,k)=ZLhh(1,k)*ILhh(1,k);
V2efhh(1,k)=abs(V2hh(1,k));
I2hh(1,k)=V2hh(1,k)/Z2hh(1,k);
IKhh(1,k)=ILhh(1,k)-I2hh(1,k);
V3hh(1,k)=ZKhh(1,k)*IKhh(1,k);
V3efhh(1,k)=abs(V3hh(1,k));

```

```

I3hh(1,k)=V3hh(1,k)/Z3hh(1,k);
IJhh(1,k)=IKhh(1,k)-I3hh(1,k);
V4hh(1,k)=ZJhh(1,k)*IJhh(1,k);
V4efhh(1,k)=abs(V4hh(1,k));
I4hh(1,k)=V4hh(1,k)/Z4hh(1,k);
IIhh(1,k)=IJhh(1,k)-I4hh(1,k);
V5hh(1,k)=ZIIhh(1,k)*IIhh(1,k);
V5efhh(1,k)=abs(V5hh(1,k));
I5hh(1,k)=V5hh(1,k)/Z5hh(1,k);
IHhh(1,k)=IIhh(1,k)-I5hh(1,k);
V6hh(1,k)=ZHhh(1,k)*IHhh(1,k);
V6efhh(1,k)=abs(V6hh(1,k));
I6hh(1,k)=V6hh(1,k)/Z6hh(1,k);
I7hh(1,k)=IHhh(1,k)-I6hh(1,k);
V7hh(1,k)=Z7hh(1,k)*I7hh(1,k);
V7efhh(1,k)=abs(V7hh(1,k));

% Calculo da impedancia harmonica do banco de capacitores para corrigir a tensao
eficaz

if corre==1
    Xcorrehh=(2*pi*h*f*Lcorre/Zb)-(1/(2*pi*h*f*Cbanco))/Zb;
else
    Xcorrehh=0;
end

    if nposte==5
        Z6caphh(1,k)=Z6hh(1,k);
        Z7caphh(1,k)=Z7hh(1,k);
        Xcaphh(1,k)=-(1/(2*pi*h*f*Cap(1,k)))/Zb;
        Zcaphh(1,k)=j*(Xcaphh(1,k)+Xcorrehh);
        Z5caphh(1,k)=Z5hh(1,k)*Zcaphh(1,k)/(Z5hh(1,k)+Zcaphh(1,k));
    elseif nposte==6
        Z5caphh(1,k)=Z5hh(1,k);
        Z7caphh(1,k)=Z7hh(1,k);
        Xcaphh(1,k)=-(1/(2*pi*h*f*Cap(1,k)))/Zb;
        Zcaphh(1,k)=j*(Xcaphh(1,k)+Xcorrehh);
        Z6caphh(1,k)=Z6hh(1,k)*Zcaphh(1,k)/(Z6hh(1,k)+Zcaphh(1,k));
    else
        Z5caphh(1,k)=Z5hh(1,k);
        Z6caphh(1,k)=Z6hh(1,k);
        Xcaphh(1,k)=-(1/(2*pi*h*f*Cap(1,k)))/Zb;
        Zcaphh(1,k)=j*(Xcaphh(1,k)+Xcorrehh);
        Z7caphh(1,k)=Z7hh(1,k)*Zcaphh(1,k)/(Z7hh(1,k)+Zcaphh(1,k));
    end

End

% Calculo das impedancias do sistema de distribuicao com insercao de
% capacitores e harmonica de ordem h

ZFcaphh(1,k)=((ZEhh(1,k)+Zlihh)*Z5caphh(1,k))/(ZEhh(1,k)+Zlihh+Z5caphh(1,k));
ZGcaphh(1,k)=((ZFcaphh(1,k)+Zlihh)*Z6caphh(1,k))/(ZFcaphh(1,k)+Zlihh+Z6caphh(1,k));
ZHcaphh(1,k)=((Z7caphh(1,k)+Zlihh)*Z6caphh(1,k))/(Z7caphh(1,k)+Zlihh+Z6caphh(1,k));
ZIcaphh(1,k)=((ZHcaphh(1,k)+Zlihh)*Z5caphh(1,k))/(ZHcaphh(1,k)+Zlihh+Z5caphh(1,k));
ZJcaphh(1,k)=((ZIcaphh(1,k)+Zlihh)*Z4hh(1,k))/(ZIcaphh(1,k)+Zlihh+Z4hh(1,k));

```

```

ZKcaphh(1,k)=((ZJcaphh(1,k)+Zlihh)*Z3hh(1,k))/(ZJcaphh(1,k)+Zlihh+Z3hh(1,k));
ZLcaphh(1,k)=((ZKcaphh(1,k)+Zlihh)*Z2hh(1,k))/(ZKcaphh(1,k)+Zlihh+Z2hh(1,k));
ZMcaphh(1,k)=((ZLcaphh(1,k)+Zlihh)*Z1fharhh(1,k))/(ZLcaphh(1,k)+Zlihh+Z1fharhh(1
,k));
ZTcaphh(1,k)=ZMcaphh(1,k)+ZFThh;

% Calculo das tensoes e correntes em cada poste com inserção de capacitores
% e harmonica de ordem h

ITcaphh(1,k)=Vf/ZTcaphh(1,k);
ITefcaphh(1,k)=abs(ITcaphh(1,k));
V1caphh(1,k)=ZMcaphh(1,k)*ITcaphh(1,k);
V1efcaphh(1,k)=abs(V1caphh(1,k));
I1caphh(1,k)=V1caphh(1,k)/Z1fharhh(1,k);
ILcaphh(1,k)=ITcaphh(1,k)-I1caphh(1,k);
ILefcaphh(1,k)=abs(ILcaphh(1,k));
V2caphh(1,k)=ZLcaphh(1,k)*ILcaphh(1,k);
V2efcaphh(1,k)=abs(V2caphh(1,k));
I2caphh(1,k)=V2caphh(1,k)/Z2hh(1,k);
IKcaphh(1,k)=ILcaphh(1,k)-I2caphh(1,k);
V3caphh(1,k)=ZKcaphh(1,k)*IKcaphh(1,k);
V3efcaphh(1,k)=abs(V3caphh(1,k));
I3caphh(1,k)=V3caphh(1,k)/Z3hh(1,k);
IJcaphh(1,k)=IKcaphh(1,k)-I3caphh(1,k);
V4caphh(1,k)=ZJcaphh(1,k)*IJcaphh(1,k);
V4efcaphh(1,k)=abs(V4caphh(1,k));
I4caphh(1,k)=V4caphh(1,k)/Z4hh(1,k);
IIcaphh(1,k)=IJcaphh(1,k)-I4caphh(1,k);
V5caphh(1,k)=ZIcaphh(1,k)*IIcaphh(1,k);
V5efcaphh(1,k)=abs(V5caphh(1,k));
I5caphh(1,k)=V5caphh(1,k)/Z5caphh(1,k);
IHcaphh(1,k)=IIcaphh(1,k)-I5caphh(1,k);
V6caphh(1,k)=ZHcaphh(1,k)*IHcaphh(1,k);
V6efcaphh(1,k)=abs(V6caphh(1,k));
I6caphh(1,k)=V6caphh(1,k)/Z6caphh(1,k);
I7caphh(1,k)=IHcaphh(1,k)-I6caphh(1,k);
V7caphh(1,k)=Z7caphh(1,k)*I7caphh(1,k);
V7efcaphh(1,k)=abs(V7caphh(1,k));
end
end
end

% Analise da variaçao das impedancias de 60 a 480 Hz

n=3;
F=n*f;
for x=0:12:72;
for l=1:12;
for k=1:12;

% Calculo das impedancias harmonicas dos postes 1 a 4 de uma rede de
% distribuição com 5 ou 6 ou 7 postes

Xlfharh(1,x+k)=Xlfhar*(F/f);
Xcfharh(1,x+k)=Xcfhar*(f/F);
Xfharh(1,x+k)=j*(Xlfharh(1,x+k)-Xcfharh(1,x+k));
Zmh=(Rm*j*Lm*F/60)/(Rm+j*Lm*F/60);

```

```

Zfh=(Rf+j*(2*pi*F*Lf))/Zb;
Z1th=R1t+j*(L1t*F/60);
Z2th=R2t+j*(L2t*F/60);
Zlih=(Rli+j*(2*pi*F*Lli))/Zb;
Z1h(1,x+k)=(((127^2/(P1(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q1(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P1(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q1(1,k)*Zb)))));
Z1fharh(1,x+k)=(Z1h(1,x+k)*Xfharh(1,x+k))/(Z1h(1,x+k)+Xfharh(1,x+k));
Z2h(1,x+k)=(((127^2/(P2(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q2(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P2(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q2(1,k)*Zb)))));
Z3h(1,x+k)=(((127^2/(P3(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q3(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P3(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q3(1,k)*Zb)))));
Z4h(1,x+k)=(((127^2/(P4(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q4(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P4(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q4(1,k)*Zb)))));
ZAh(1,x+k)=((Zfh+Z1th)*Zmh)/(Zfh+Z1th+Zmh);
ZBh(1,x+k)=((ZAh(1,x+k)+Z2th)*Z1fharh(1,x+k))/(ZAh(1,x+k)+Z2th+Z1fharh(1,x+k));
ZCh(1,x+k)=((ZBh(1,x+k)+Zlih)*Z2h(1,x+k))/(ZBh(1,x+k)+Zlih+Z2h(1,x+k));
ZDh(1,x+k)=((ZCh(1,x+k)+Zlih)*Z3h(1,x+k))/(ZCh(1,x+k)+Zlih+Z3h(1,x+k));
ZEh(1,x+k)=((ZDh(1,x+k)+Zlih)*Z4h(1,x+k))/(ZDh(1,x+k)+Zlih+Z4h(1,x+k));

% Calculo das impedancias harmonicas dos postes 5 e 6 para uma rede de
% distribuicao de 6 postes com e sem insercao de capacitores

if corre==1
    Xcorrehh=(2*pi*F*Lcorre/Zb)-(1/(2*pi*F*Cbanco))/Zb;
else
    Xcorrehh=0;
end
if nposte==6

Z5h(1,x+k)=(((127^2/(P5(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P5(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))));
    ZFh(1,x+k)=((ZEh(1,x+k)+Zlih)*Z5h(1,x+k))/(ZEh(1,x+k)+Zlih+Z5h(1,x+k));

Z5h(1,x+k)=(((127^2/(P5(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P5(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))));

Z6h(1,x+k)=(((127^2/(P6(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q6(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P6(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q6(1,k)*Zb)))));
    Zcaph(1,x+k)=j*((60/F)*Xcap(1,k)+Xcorrehh);
    Z6caph(1,x+k)=Z6h(1,x+k)*Zcaph(1,x+k)/(Z6h(1,x+k)+Zcaph(1,x+k));
    ZHh(1,x+k)=Z6h(1,x+k);
    ZIh(1,x+k)=((ZHh(1,x+k)+Zlih)*Z5h(1,x+k))/(ZHh(1,x+k)+Zlih+Z5h(1,x+k));
    ZJh(1,x+k)=((ZIh(1,x+k)+Zlih)*Z4h(1,x+k))/(ZIh(1,x+k)+Zlih+Z4h(1,x+k));
    ZKh(1,x+k)=((ZJh(1,x+k)+Zlih)*Z3h(1,x+k))/(ZJh(1,x+k)+Zlih+Z3h(1,x+k));
    ZLh(1,x+k)=((ZKh(1,x+k)+Zlih)*Z2h(1,x+k))/(ZKh(1,x+k)+Zlih+Z2h(1,x+k));

ZMh(1,x+k)=((ZLh(1,x+k)+Zlih)*Z1fharh(1,x+k))/(ZLh(1,x+k)+Zlih+Z1fharh(1,x+k));
    ZHcaph(1,x+k)=Z6caph(1,x+k);

ZIcaph(1,x+k)=((ZHcaph(1,x+k)+Zlih)*Z5h(1,x+k))/(ZHcaph(1,x+k)+Zlih+Z5h(1,x+k));
ZJcaph(1,x+k)=((ZIcaph(1,x+k)+Zlih)*Z4h(1,x+k))/(ZIcaph(1,x+k)+Zlih+Z4h(1,x+k));
ZKcaph(1,x+k)=((ZJcaph(1,x+k)+Zlih)*Z3h(1,x+k))/(ZJcaph(1,x+k)+Zlih+Z3h(1,x+k));
ZLcaph(1,x+k)=((ZKcaph(1,x+k)+Zlih)*Z2h(1,x+k))/(ZKcaph(1,x+k)+Zlih+Z2h(1,x+k));

```

```
ZMcaph(1,x+k)=((ZLcaph(1,x+k)+Zlih)*Zlfharh(1,x+k))/(ZLcaph(1,x+k)+Zlih+Zlfharh(1,x+k));
```

```
% Impedancias vistas por cada poste sem insercao de capacitores
```

```
    % Impedancias vistas do poste 1
```

```
Zin1(1,x+k)=ZAh(1,x+k)+Z2th;
Zloc1(1,x+k)=Zlfharh(1,x+k);
Zout1(1,x+k)=ZLh(1,x+k)+Zlih;
Zp1(1,x+k)=abs(1/((1/Zin1(1,x+k))+(1/Zloc1(1,x+k))+(1/Zout1(1,x+k))));
```

```
    % Impedancias vistas do poste 2
```

```
Zin2(1,x+k)=ZBh(1,x+k)+Zlih;
Zloc2(1,x+k)=Z2h(1,x+k);
Zout2(1,x+k)=ZKh(1,x+k)+Zlih;
Zp2(1,x+k)=abs(1/((1/Zin2(1,x+k))+(1/Zloc2(1,x+k))+(1/Zout2(1,x+k))));
```

```
    % Impedancias vistas do poste 3
```

```
Zin3(1,x+k)=ZCh(1,x+k)+Zlih;
Zloc3(1,x+k)=Z3h(1,x+k);
Zout3(1,x+k)=ZJh(1,x+k)+Zlih;
Zp3(1,x+k)=abs(1/((1/Zin3(1,x+k))+(1/Zloc3(1,x+k))+(1/Zout3(1,x+k))));
```

```
    % Impedancias vistas do poste 4
```

```
Zin4(1,x+k)=ZDh(1,x+k)+Zlih;
Zloc4(1,x+k)=Z4h(1,x+k);
Zout4(1,x+k)=ZIh(1,x+k)+Zlih;
Zp4(1,x+k)=abs(1/((1/Zin4(1,x+k))+(1/Zloc4(1,x+k))+(1/Zout4(1,x+k))));
```

```
    % Impedancias vistas do poste 5
```

```
Zin5(1,x+k)=ZEh(1,x+k)+Zlih;
Zloc5(1,x+k)=Z5h(1,x+k);
Zout5(1,x+k)=ZHh(1,x+k)+Zlih;
Zp5(1,x+k)=abs(1/((1/Zin5(1,x+k))+(1/Zloc5(1,x+k))+(1/Zout5(1,x+k))));
```

```
    % Impedancias vistas do poste 6
```

```
Zin6(1,x+k)=ZFh(1,x+k)+Zlih;
Zloc6(1,x+k)=Z6h(1,x+k);
Zp6(1,x+k)=abs(1/((1/Zin6(1,x+k))+(1/Zloc6(1,x+k))));
```

```
% Impedancias vistas por cada poste com insercao de capacitores
```

```
    % Impedancias vistas do poste 1
```

```
Zin1cap(1,x+k)=ZAh(1,x+k)+Z2th;
Zloc1cap(1,x+k)=Zlfharh(1,x+k);
```

```

        Zout1cap(1,x+k)=ZLcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp1cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin1cap(1,x+k))+(1/Zloc1cap(1,x+k))+(1/Zout1cap(1,x+k))))
);
        %      Impedancias vistas do poste 2

        Zin2cap(1,x+k)=ZBh(1,x+k)+Zlih;
Zloc2cap(1,x+k)=Z2h(1,x+k);
Zout2cap(1,x+k)=ZKcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp2cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin2cap(1,x+k))+(1/Zloc2cap(1,x+k))+(1/Zout2cap(1,x+k))))
);
        %      Impedancias vistas do poste 3

        Zin3cap(1,x+k)=ZCh(1,x+k)+Zlih;
Zloc3cap(1,x+k)=Z3h(1,x+k);
Zout3cap(1,x+k)=ZJcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp3cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin3cap(1,x+k))+(1/Zloc3cap(1,x+k))+(1/Zout3cap(1,x+k))))
);
        %      Impedancias vistas do poste 4

        Zin4cap(1,x+k)=ZDh(1,x+k)+Zlih;
Zloc4cap(1,x+k)=Z4h(1,x+k);
Zout4cap(1,x+k)=ZIcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp4cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin4cap(1,x+k))+(1/Zloc4cap(1,x+k))+(1/Zout4cap(1,x+k))))
);
        %      Impedancias vistas do poste 5

        Zin5cap(1,x+k)=ZEh(1,x+k)+Zlih;
Zloc5cap(1,x+k)=Z5h(1,x+k);
Zout5cap(1,x+k)=ZHCaph(1,x+k)+Zlih;
Zp5cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin5cap(1,x+k))+(1/Zloc5cap(1,x+k))+(1/Zout5cap(1,x+k))))
);
        %      Impedancias vistas do poste 6

        Zin6cap(1,x+k)=ZFh(1,x+k)+Zlih;
Zloc6cap(1,x+k)=Z6caph(1,x+k);
Zp6cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin6cap(1,x+k))+(1/Zloc6cap(1,x+k)))));

        % Calculo da amplificacao de impedancia com e sem insercao de
        % capacitor

        relZp1(1,x+k)=Zp1cap(1,x+k)/Zp1(1,x+k);
relZp2(1,x+k)=Zp2cap(1,x+k)/Zp2(1,x+k);
relZp3(1,x+k)=Zp3cap(1,x+k)/Zp3(1,x+k);
relZp4(1,x+k)=Zp4cap(1,x+k)/Zp4(1,x+k);
relZp5(1,x+k)=Zp5cap(1,x+k)/Zp5(1,x+k);
relZp6(1,x+k)=Zp6cap(1,x+k)/Zp6(1,x+k);

        % Calculo das impedancias harmonicas do poste 5 para uma rede de
        % distribuicao de 5 postes com e sem insercao de capacitores

        elseif nposte==5
Z5h(1,x+k)=(((127^2/(P5(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P5(1,
k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))));
        Zcaph(1,x+k)=j*((60/F)*Xcap(1,k)+Xcorrehh);
        Z5caph(1,x+k)=Z5h(1,x+k)*Zcaph(1,x+k)/(Z5h(1,x+k)+Zcaph(1,x+k));
        ZIh(1,x+k)=Z5h(1,x+k);
ZJh(1,x+k)=((ZIh(1,x+k)+Zlih)*Z4h(1,x+k))/(ZIh(1,x+k)+Zlih+Z4h(1,x+k));

```

```

ZKh(1,x+k)=((ZJh(1,x+k)+Zlih)*Z3h(1,x+k))/(ZJh(1,x+k)+Zlih+Z3h(1,x+k));
ZLh(1,x+k)=((ZKh(1,x+k)+Zlih)*Z2h(1,x+k))/(ZKh(1,x+k)+Zlih+Z2h(1,x+k));

ZMh(1,x+k)=((ZLh(1,x+k)+Zlih)*Z1fharh(1,x+k))/(ZLh(1,x+k)+Zlih+Z1fharh(1,x+k));
ZIcaph(1,x+k)=Z5caph(1,x+k);
ZJcaph(1,x+k)=((ZIcaph(1,x+k)+Zlih)*Z4h(1,x+k))/(ZIcaph(1,x+k)+Zlih+Z4h(1,x+k));
ZKcaph(1,x+k)=((ZJcaph(1,x+k)+Zlih)*Z3h(1,x+k))/(ZJcaph(1,x+k)+Zlih+Z3h(1,x+k));
ZLcaph(1,x+k)=((ZKcaph(1,x+k)+Zlih)*Z2h(1,x+k))/(ZKcaph(1,x+k)+Zlih+Z2h(1,x+k));
ZMcaph(1,x+k)=((ZLcaph(1,x+k)+Zlih)*Z1fharh(1,x+k))/(ZLcaph(1,x+k)+Zlih+Z1fharh(
1,x+k));

% Impedancias vistas por cada poste sem insercao de capacitores

%   Impedancias vistas do poste 1

Zin1(1,x+k)=ZAh(1,x+k)+Z2th;
Zloc1(1,x+k)=Z1fharh(1,x+k);
Zout1(1,x+k)=ZLh(1,x+k)+Zlih;
Zp1(1,x+k)=abs(1/((1/Zin1(1,x+k))+(1/Zloc1(1,x+k))+(1/Zout1(1,x+k))));

%   Impedancias vistas do poste 2

Zin2(1,x+k)=ZBh(1,x+k)+Zlih;
Zloc2(1,x+k)=Z2h(1,x+k);
Zout2(1,x+k)=ZKh(1,x+k)+Zlih;
Zp2(1,x+k)=abs(1/((1/Zin2(1,x+k))+(1/Zloc2(1,x+k))+(1/Zout2(1,x+k))));

%   Impedancias vistas do poste 3

Zin3(1,x+k)=ZCh(1,x+k)+Zlih;
Zloc3(1,x+k)=Z3h(1,x+k);
Zout3(1,x+k)=ZJh(1,x+k)+Zlih;
Zp3(1,x+k)=abs(1/((1/Zin3(1,x+k))+(1/Zloc3(1,x+k))+(1/Zout3(1,x+k))));

%   Impedancias vistas do poste 4

Zin4(1,x+k)=ZDh(1,x+k)+Zlih;
Zloc4(1,x+k)=Z4h(1,x+k);
Zout4(1,x+k)=ZIh(1,x+k)+Zlih;
Zp4(1,x+k)=abs(1/((1/Zin4(1,x+k))+(1/Zloc4(1,x+k))+(1/Zout4(1,x+k))));

%   Impedancias vistas do poste 5

Zin5(1,x+k)=ZEh(1,x+k)+Zlih;
Zloc5(1,x+k)=Z5h(1,x+k);
Zp5(1,x+k)=abs(1/((1/Zin5(1,x+k))+(1/Zloc5(1,x+k))));

% Impedancias vistas por cada poste com insercao de capacitores

%   Impedancias vistas do poste 1

Zin1cap(1,x+k)=ZAh(1,x+k)+Z2th;
Zloc1cap(1,x+k)=Z1fharh(1,x+k);
Zout1cap(1,x+k)=ZLcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp1cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin1cap(1,x+k))+(1/Zloc1cap(1,x+k))+(1/Zout1cap(1,x+k))
));

```

```

% Impedancias vistas do poste 2

Zin2cap(1,x+k)=ZBh(1,x+k)+Zlih;
Zloc2cap(1,x+k)=Z2h(1,x+k);
Zout2cap(1,x+k)=ZKcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp2cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin2cap(1,x+k))+(1/Zloc2cap(1,x+k))+(1/Zout2cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 3

Zin3cap(1,x+k)=ZCh(1,x+k)+Zlih;
Zloc3cap(1,x+k)=Z3h(1,x+k);
Zout3cap(1,x+k)=ZJcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp3cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin3cap(1,x+k))+(1/Zloc3cap(1,x+k))+(1/Zout3cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 4

Zin4cap(1,x+k)=ZDh(1,x+k)+Zlih;
Zloc4cap(1,x+k)=Z4h(1,x+k);
Zout4cap(1,x+k)=ZIcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp4cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin4cap(1,x+k))+(1/Zloc4cap(1,x+k))+(1/Zout4cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 5

Zin5cap(1,x+k)=ZEh(1,x+k)+Zlih;
Zloc5cap(1,x+k)=Z5caph(1,x+k);
Zp5cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin5cap(1,x+k))+(1/Zloc5cap(1,x+k)))));

% Calculo da amplificacao de impedancia com e sem insercao de
% capacitor

relZp1(1,x+k)=Zp1cap(1,x+k)/Zp1(1,x+k);
relZp2(1,x+k)=Zp2cap(1,x+k)/Zp2(1,x+k);
relZp3(1,x+k)=Zp3cap(1,x+k)/Zp3(1,x+k);
relZp4(1,x+k)=Zp4cap(1,x+k)/Zp4(1,x+k);
relZp5(1,x+k)=Zp5cap(1,x+k)/Zp5(1,x+k);

% Calculo das impedancias harmonicas do poste 5, 6 e 7 para uma rede de
% distribuicao de 7 postes com e sem insercao de capacitores

else
Z7h(1,x+k)=(((127^2/(P7(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q7(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P7(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q7(1,k)*Zb)))));
Zcaph(1,x+k)=j*((60/F)*Xcap(1,k)+Xcorrehh);
Z5h(1,x+k)=(((127^2/(P5(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P5(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q5(1,k)*Zb)))));
Z6h(1,x+k)=(((127^2/(P6(1,k)*Zb))*j*(F/60)*(127^2/(Q6(1,k)*Zb)))/(((127^2/(P6(1,k)*Zb))+j*(F/60)*(127^2/(Q6(1,k)*Zb)))));
Z7caph(1,x+k)=Z7h(1,x+k)*Zcaph(1,x+k)/(Z7h(1,x+k)+Zcaph(1,x+k));
ZFh(1,x+k)=((ZEh(1,x+k)+Zlih)*Z5h(1,x+k))/(ZEh(1,x+k)+Zlih+Z5h(1,x+k));
ZGh(1,x+k)=((ZFh(1,x+k)+Zlih)*Z6h(1,x+k))/(ZFh(1,x+k)+Zlih+Z6h(1,x+k));
ZHH(1,x+k)=((Z7h(1,x+k)+Zlih)*Z6h(1,x+k))/(Z7h(1,x+k)+Zlih+Z6h(1,x+k));
ZIH(1,x+k)=((ZHH(1,x+k)+Zlih)*Z5h(1,x+k))/(ZHH(1,x+k)+Zlih+Z5h(1,x+k));
ZJh(1,x+k)=((ZIH(1,x+k)+Zlih)*Z4h(1,x+k))/(ZIH(1,x+k)+Zlih+Z4h(1,x+k));
ZKh(1,x+k)=((ZJh(1,x+k)+Zlih)*Z3h(1,x+k))/(ZJh(1,x+k)+Zlih+Z3h(1,x+k));
ZLh(1,x+k)=((ZKh(1,x+k)+Zlih)*Z2h(1,x+k))/(ZKh(1,x+k)+Zlih+Z2h(1,x+k));
ZMh(1,x+k)=((ZLh(1,x+k)+Zlih)*Z1fharh(1,x+k))/(ZLh(1,x+k)+Zlih+Z1fharh(1,x+k));
ZHCaph(1,x+k)=((Z7caph(1,x+k)+Zlih)*Z6h(1,x+k))/(Z7caph(1,x+k)+Zlih+Z6h(1,x+k));

```

```

ZIcaph(1,x+k)=((ZHCaph(1,x+k)+Zlih)*Z5h(1,x+k))/(ZHCaph(1,x+k)+Zlih+Z5h(1,x+k));
ZJcaph(1,x+k)=((ZIcaph(1,x+k)+Zlih)*Z4h(1,x+k))/(ZIcaph(1,x+k)+Zlih+Z4h(1,x+k));
ZKcaph(1,x+k)=((ZJcaph(1,x+k)+Zlih)*Z3h(1,x+k))/(ZJcaph(1,x+k)+Zlih+Z3h(1,x+k));
ZLcaph(1,x+k)=((ZKcaph(1,x+k)+Zlih)*Z2h(1,x+k))/(ZKcaph(1,x+k)+Zlih+Z2h(1,x+k));
ZMcaph(1,x+k)=((ZLcaph(1,x+k)+Zlih)*Z1fharh(1,x+k))/(ZLcaph(1,x+k)+Zlih+Z1fharh(
1,x+k));
    % Impedancias vistas por cada poste sem inserção de capacitores

    % Impedancias vistas do poste 1

Zin1(1,x+k)=ZAh(1,x+k)+Z2th;
Zloc1(1,x+k)=Z1fharh(1,x+k);
Zout1(1,x+k)=ZLh(1,x+k)+Zlih;
Zp1(1,x+k)=abs(1/((1/Zin1(1,x+k))+(1/Zloc1(1,x+k))+(1/Zout1(1,x+k))));

    % Impedancias vistas do poste 2

Zin2(1,x+k)=ZBh(1,x+k)+Zlih;
Zloc2(1,x+k)=Z2h(1,x+k);
Zout2(1,x+k)=ZKh(1,x+k)+Zlih;
Zp2(1,x+k)=abs(1/((1/Zin2(1,x+k))+(1/Zloc2(1,x+k))+(1/Zout2(1,x+k))));

    % Impedancias vistas do poste 3

Zin3(1,x+k)=ZCh(1,x+k)+Zlih;
Zloc3(1,x+k)=Z3h(1,x+k);
Zout3(1,x+k)=ZJh(1,x+k)+Zlih;
Zp3(1,x+k)=abs(1/((1/Zin3(1,x+k))+(1/Zloc3(1,x+k))+(1/Zout3(1,x+k))));

    % Impedancias vistas do poste 4

Zin4(1,x+k)=ZDh(1,x+k)+Zlih;
Zloc4(1,x+k)=Z4h(1,x+k);
Zout4(1,x+k)=ZIh(1,x+k)+Zlih;
Zp4(1,x+k)=abs(1/((1/Zin4(1,x+k))+(1/Zloc4(1,x+k))+(1/Zout4(1,x+k))));

    % Impedancias vistas do poste 5

Zin5(1,x+k)=ZEh(1,x+k)+Zlih;
Zloc5(1,x+k)=Z5h(1,x+k);
Zout5(1,x+k)=ZKh(1,x+k)+Zlih;
Zp5(1,x+k)=abs(1/((1/Zin5(1,x+k))+(1/Zloc5(1,x+k))+(1/Zout5(1,x+k))));

    % Impedancias vistas do poste 6

Zin6(1,x+k)=ZFh(1,x+k)+Zlih;
Zloc6(1,x+k)=Z6h(1,x+k);
Zout6(1,x+k)=ZJh(1,x+k);
Zp6(1,x+k)=abs(1/((1/Zin6(1,x+k))+(1/Zloc6(1,x+k))+(1/Zout6(1,x+k))));

    % Impedancias vistas do poste 7

Zin7(1,x+k)=ZGh(1,x+k)+Zlih;
Zloc7(1,x+k)=Z7h(1,x+k);
Zp7(1,x+k)=abs(1/((1/Zin7(1,x+k))+(1/Zloc7(1,x+k))));

    % Impedancias vistas por cada poste com inserção de capacitores

```

```

% Impedancias vistas do poste 1

Zin1cap(1,x+k)=ZAh(1,x+k)+Z2th;
Zloc1cap(1,x+k)=Z1fharh(1,x+k);
Zout1cap(1,x+k)=ZLcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp1cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin1cap(1,x+k))+(1/Zloc1cap(1,x+k))+(1/Zout1cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 2

Zin2cap(1,x+k)=ZBh(1,x+k)+Zlih;
Zloc2cap(1,x+k)=Z2h(1,x+k);
Zout2cap(1,x+k)=ZKcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp2cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin2cap(1,x+k))+(1/Zloc2cap(1,x+k))+(1/Zout2cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 3

Zin3cap(1,x+k)=ZCh(1,x+k)+Zlih;
Zloc3cap(1,x+k)=Z3h(1,x+k);
Zout3cap(1,x+k)=ZJcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp3cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin3cap(1,x+k))+(1/Zloc3cap(1,x+k))+(1/Zout3cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 4

Zin4cap(1,x+k)=ZDh(1,x+k)+Zlih;
Zloc4cap(1,x+k)=Z4h(1,x+k);
Zout4cap(1,x+k)=ZIcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp4cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin4cap(1,x+k))+(1/Zloc4cap(1,x+k))+(1/Zout4cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 5

Zin5cap(1,x+k)=ZEh(1,x+k)+Zlih;
Zloc5cap(1,x+k)=Z5h(1,x+k);
Zout5cap(1,x+k)=ZHcaph(1,x+k)+Zlih;
Zp5cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin5cap(1,x+k))+(1/Zloc5cap(1,x+k))+(1/Zout5cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 6

Zin6cap(1,x+k)=ZFh(1,x+k)+Zlih;
Zloc6cap(1,x+k)=Z6h(1,x+k);
Zout6cap(1,x+k)=ZHcaph(1,x+k);
Zp6cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin6cap(1,x+k))+(1/Zloc6cap(1,x+k))+(1/Zout6cap(1,x+k)))));

% Impedancias vistas do poste 7

Zin7cap(1,x+k)=ZFh(1,x+k)+Zlih;
Zloc7cap(1,x+k)=Z7caph(1,x+k);
Zp7cap(1,x+k)=abs(1/((1/Zin7cap(1,x+k))+(1/Zloc7cap(1,x+k))));

% Calculo da amplificacao de impedancia com e sem insercao de
% capacitor
relZp1(1,x+k)=Zp1cap(1,x+k)/Zp1(1,x+k);
relZp2(1,x+k)=Zp2cap(1,x+k)/Zp2(1,x+k);
relZp3(1,x+k)=Zp3cap(1,x+k)/Zp3(1,x+k);
relZp4(1,x+k)=Zp4cap(1,x+k)/Zp4(1,x+k);
relZp5(1,x+k)=Zp5cap(1,x+k)/Zp5(1,x+k);
relZp6(1,x+k)=Zp6cap(1,x+k)/Zp6(1,x+k);

```

```
relZp7(1,x+k)=Zp7cap(1,x+k)/Zp7(1,x+k);
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
n=n+2;
```

```
F=n*f;
```

```
end
```

```
end
```

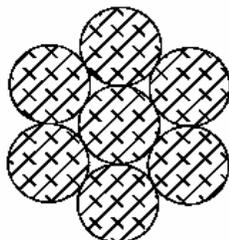
ANEXO B – Dados técnicos de cabos de alumínio usados em redes de distribuição



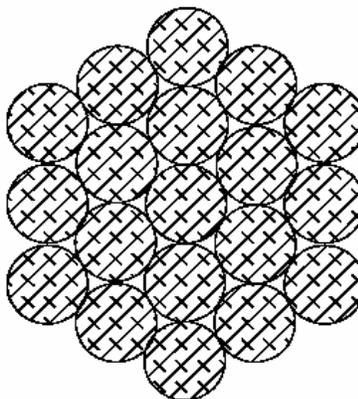
COPEL

CABO DE ALUMÍNIO
Tipo CA

NTC810552/58



7 FIOS



19 FIOS

TABELA 1

NTC	Código COPEL	Escala AWG/M CM	Referência Comercial (Código)	Seção Nominal (mm ²)	Formação		CONDUTOR COMPLETO					
					Nº de fios	Diâmetro nominal dos fios (mm)	Diâmetro nominal "D" (mm)	Massa nominal (kg/km)	Carga de ruptura mínima (daN)	Raio médio geométrico a 60 Hz (*) "G"	Resistência a 20°C 60 Hz máxima (Ω/km)	(*) (A)
0552	301221-2	4	ROSE	21,12	7	1,96	5,88	57,8	369	2,13	1,356	114
0553	301222-0	2	IRIS	33,54		2,47	7,41	91,8	564	2,69	0,8535	152
0555	301224-7	2/0	ASTER	67,35		3,50	10,50	184,4	1049	3,81	0,4251	235
0556	301225-5	4/0	OXLIP	107,41		4,42	13,26	294,1	1622	4,81	0,2665	314
0558	301227-1	336,4	TULIP	170,48	19	3,38	16,90	469,1	2656	6,40	0,1687	419
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

(*) - Capacidade aproximada de condução de corrente (A) - condutor a 75°C - 60Hz
- temperatura ambiente 40°C - vento 2.2km/h.

- OBS.:** 1. Os valores das colunas 11 e 13 são para as condições da NBR 7271/82.
2. Os valores de reatância do cabo são determinados pelas seguintes expressões:

2.1 Reatância indutiva (X_L) em Ω/km.

$$X_L = 0.1736 \log_{10} (Deq/G)$$

2.2 Reatância capacitiva (X_C) em MΩ/km.

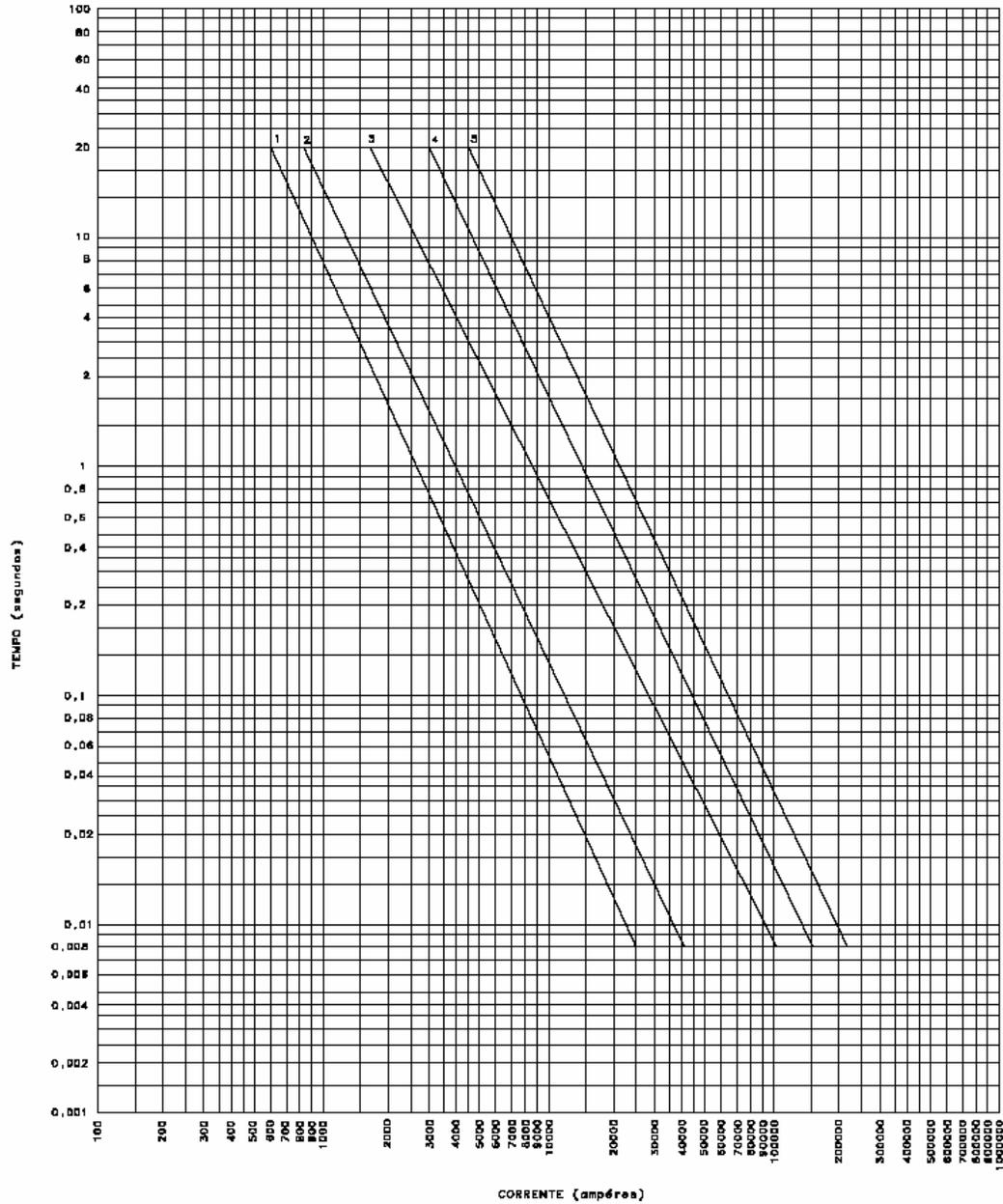
$$X_C = 0.0424 \log_{10} (2.Deq/D)$$

onde: Deq = $d_{12} \times d_{23} \times d_{31}$ distância equivalente entre os condutores, em milímetros.

G = coluna 11

D = coluna 8

d_{12} , d_{23} e d_{31} são as distâncias entre fases (3φ)

GRÁFICO - CURVAS LIMITES DE OPERAÇÃO EM CURTO-CIRCUITO


CONVENÇÃO					
CURVAS	1	2	3	4	5
AWG ou MCM	4	2	2/0	4/0	336,4
1	2	3	4	5	6

OBS.: 3. Fonte Alcoa

1. OBJETIVO

Esta NTC padroniza as dimensões e estabelece as condições gerais e específicas do cabo de alumínio tipo CA, a ser instalado nas Redes Aéreas de Distribuição.

2. NORMAS E/OU DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

Conforme a norma de Materiais de Distribuição - Especificação, NTC 810006 (Cabo de Alumínio nu tipo CA).

3. DEFINIÇÕES

Conforme a norma de Materiais de Distribuição - Especificação, NTC 810006 (Cabo de Alumínio nu tipo CA).

4. CONDIÇÕES GERAIS
4.1 Identificação:

Os cabos de alumínio tipo CA devem ser acondicionados em bobinas, e estas devem apresentar marcação externa indelével e facilmente legível, através de pintura, em ambas as faces, com o seguinte conteúdo mínimo:

- nome e endereço do Fornecedor;
- o nome COPEL;
- número e item da Ordem de Compra, ODC _____, item _____;
- número de série da bobina;
- código de material da COPEL;
- tipo e referência comercial do cabo;
- lance nominal;
- número de lances;
- massa líquida;
- massa bruta;
- número de romaneio (relação de material para embarque feita pelo Fornecedor);
- seta indicativa e a frase " DESENROLE NESTE SENTIDO ".

4.2 Condições de utilização:

Os cabos de alumínio tipo CA objeto desta padronização são próprios para serem instalados em redes aéreas de alta e baixa tensão, nas Redes de Distribuição Urbana e Rural da Copel, conforme previsto nas Normas de Montagens.

4.3 Acabamento:

Os cabos de alumínio tipo CA devem apresentar diâmetro uniforme e ser isentos de fissuras, rebarbas, estrias, inclusões, falhas de encordoamento e outros defeitos que comprometam o desempenho do produto.

4.4 Demais condições:

4.4.1 Encordoamento: Os cabos devem ser encordoados uniformemente em toda a sua extensão, devendo o sentido do encordoamento ser alternado entre as coroas sucessivas e ser para à direita na coroa externa (sentido horário). A relação de encordoamento nas diferentes coroas devem estar de acordo com a NTC 810006 de Materiais de Distribuição - Especificação (Cabo de Alumínio nu tipo CA).

4.4.2 Tolerâncias:
TABELA 2

FIO/CABO		CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	TOLERÂNCIAS	
			+	-
FIO	ALUMÍNIO	$\Phi \leq 3,00 \text{ mm}$	0,03mm	0,03mm
		$\Phi > 3,00 \text{ mm}$	1 %	1 %
CABO	CA	Diâmetro nominal do cabo	1 %	1 %
		Seção transversal nominal	2 %	2 %
		Massa linear nominal	1 %	1 %
1	2	3	4	5

5. CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

5.1 Material:

Dos fios formadores do cabo: Fios de alumínio de pureza mínima de 99,5%, com têmpera H-19 (extra-dura, sem recozimento complementar), com condutividade mínima de 61% IACS a 20°C.

5.2 Características técnicas:

5.2.1 Características mecânicas:

5.2.1.1 Carga de ruptura: Os cabos devem apresentar cargas de ruptura mínima conforme os valores padronizados na Tabela 1 desta NTC.

5.2.1.2 Módulos de elasticidade médios: O cabo CA deve atender os seguintes valores de módulos de elasticidade médios a 20°C.

Módulo inicial:

7 fios : 53000 MPa ± 10%
19 fios : 50000 MPa ± 10%

Módulo final:

7 fios : 60000 MPa ± 3000 MPa
19 fios : 57000 MPa ± 3000 MPa

5.2.1.3 Coeficiente de dilatação linear: O cabo CA deve atender os seguintes valores de coeficientes de dilatação linear a 20°C.

Coeficiente inicial ou final:

7 fios : $23,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \pm 5\%$
19 fios : $23,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \pm 5\%$

5.2.1.4 Demais condições: Conforme Tabelas 1 e 2 desta NTC.

5.2.2 Características elétricas: Os cabos devem satisfazer as curvas tempo-corrente apresentadas no Gráfico desta NTC - Curvas limites de operação em curto-circuito e demais características indicadas na Tabela 1 desta NTC.

5.3 Embalagem e acondicionamento:

Conforme a NTC 810006.

6. INSPEÇÃO

Os ensaios e métodos de ensaios, amostragem e critérios de aceitação ou rejeição devem estar de acordo com a norma de Materiais de Distribuição, NTC 810006 (Cabo de Alumínio Nu tipo CA).