

ESTUDO DOS EFEITOS DOS HARMÔNICOS DEVIDO AO AUMENTO DE CARGAS NÃO LINEARES NA REDE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

THIAGO FRANCHI, P.

Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP
Av. Albert Einstein, N° 400, 13083-852, Campinas, São Paulo
thiagoprinchi@gmail.com

CARLOS MURARI, A. F.

FEEC, DSE, UNICAMP
Av. Albert Einstein, N° 400, 13083-852, Campinas, São Paulo
murari@dsee.fee.unicamp.br

Abstract— This paper presents a study of the effect of the harmonics in the distribution network due to increased non-linear loads. The analysis is prepared by defining the losses in network devices and compliance to international and national standards. For the study of the harmonics generated by these nonlinear loads it was used a three-phase power flow at the traditional version (fundamental frequency) and harmonic, both based on the backward/forward sweep method of the ladder type. This paper also contemplates the mathematical modeling of the components of the electrical power distribution network, of the three-phase induction motor and the electric arc furnace. The developed algorithm contemplates three steps to establish the status of the net for the fundamental frequency and the harmonic components of interest. In the first step is determined the status of the net at the fundamental frequency; in the second step are obtained the initial harmonic voltages and the parameters of the net for the frequency of interest; in the last step is determined the status of the net for the harmonic components.

Keywords—Backward/forward sweep ladder, arc furnace, induction motor, harmonic flow, distribution network.

Resumo—Este artigo apresenta um estudo do efeito dos harmônicos na rede de distribuição devido ao aumento de cargas não lineares. A análise é elaborada através da definição das perdas nos dispositivos da rede e na conformidade segundo as normas internacionais e nacionais. Para o estudo dos harmônicos gerados por estas cargas não lineares utilizou-se um fluxo de potência trifásico nas versões tradicional (frequência fundamental) e harmônica, ambas baseadas no método *backward/forward sweep* do tipo *Ladder*. Este artigo contempla também a modelagem matemática dos componentes da rede de distribuição de energia elétrica, do motor de indução trifásico e do forno elétrico a arco. O algoritmo desenvolvido contempla três etapas para determinar o estado da rede para a frequência fundamental e para as componentes harmônicas de interesse. Na primeira etapa é determinado o estado da rede na frequência fundamental; na segunda são obtidas as tensões harmônicas iniciais e os parâmetros da rede para a frequência de interesse; e na última etapa determina-se o estado da rede para as componentes harmônicas.

Palavras-chave—Backward/forwardswepladder, forno a arco, motor de indução, fluxo harmônico, redes de distribuição.

1 Introdução

A qualidade de energia elétrica compreende as condições de tensão e corrente que permitem a operação sem perda de continuidade, perda de rendimento e degradação de equipamentos e instalações elétricas (Leão, 2014). O perfil de tensão deve seguir características como: forma de onda senoidal, frequência fixa e amplitude, atendendo às normas estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

De modo geral, as cargas existentes nas redes de distribuição de energia elétrica podem ser lineares e não lineares. Nas cargas lineares as correntes têm o mesmo comportamento senoidal da tensão, sem qualquer distorção na forma de onda e nas não lineares as correntes são senóides distorcidas, sendo responsáveis pelo aparecimento de harmônicos na rede elétrica (Leão, 2014). Uma maior inserção de cargas não lineares acarreta no aumento do conteúdo harmônico e na degradação da qualidade de energia elétrica.

As redes de distribuição de energia elétrica são predominantemente radiais com alta relação R/X e

com cargas e circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos. Por esta razão os métodos tradicionais de solução do fluxo de potência como Newton-Raphson (Yang, 2008) e Gauss-Seidel (Gilbert, 1998) não apresentam uma boa convergência. Para a solução do fluxo de potência trifásico (FPT) tradicional e harmônico utilizou-se o método baseado no *backward/forward sweep* do tipo *Ladder* (Kersting, 2002) e (Archundia, 2010).

Este artigo além de apresentar a formulação matemática dos componentes da rede e dos fluxos de potência trifásico (FPT) para a versão tradicional e harmônica também tem a finalidade de estudar os efeitos dos harmônicos devido ao aumento das cargas não lineares conectadas a rede elétrica. Estes efeitos compreendem as perdas nos dispositivos da rede devido ao aumento do conteúdo harmônico e a conformidade com as principais normas internacionais e nacionais.

2 Modelagem Matemática

Neste tópico são apresentadas as formulações matemáticas para as representações dos dispositivos da rede e o FPT para versão tradicional e harmônica.

2.1 FTP – Versão Tradicional

O método proposto para a solução do FPT para a frequência fundamental é baseado no método *backward/forward sweep* do tipo *Ladder* (Kersting, 2002). A iteração *backward sweep* parte das barras terminais da rede em direção à barra inicial (barra da subestação) calculando as tensões e correntes, através de (1) e (2). A iteração *forward sweep* parte da barra inicial em direção às barras finais atualizando os valores das tensões nas barras através de (3) (Kersting, 2002).

$$[V_{ABC}]_n = [a] \times [V_{abc}]_m + [b] \times [I_{abc}]_m \quad (1)$$

$$[I_{ABC}]_n = [c] \times [V_{abc}]_m + [d] \times [I_{abc}]_m \quad (2)$$

$$[V_{abc}]_m = [A] \times [V_{ABC}]_n - [B] \times [I_{ABC}]_n \quad (3)$$

n - índice da barra inicial m - índice da barra final

O estado da rede para a frequência fundamental é definido quando o critério de convergência é satisfeito.

Para a solução do FPT nas versões tradicional e harmônica devem ser obtidas as matrizes $[a]$, $[b]$, $[c]$, $[d]$, $[A]$ e $[B]$ que representam os elementos série da rede (Kersting, 2002).

Elaboradas as matrizes da rede, a versão tradicional é executada para se determinar o estado da rede para a frequência fundamental. Em seguida tem-se o processo de inicialização das tensões harmônicas com o objetivo de atribuir à rede valores preliminares das tensões para cada frequência de interesse através de uma iteração *backward sweep* e outra *forward sweep* para, posteriormente, determinar o estado da rede através da versão harmônica do FPT (Archundia, 2010).

A Figura 1 apresenta o fluxograma do método.

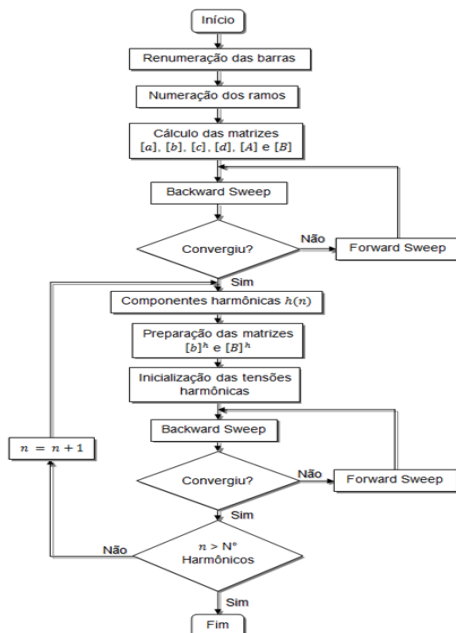


Figura 1. Representação do fluxograma

A preparação das matrizes consiste no processo de multiplicação do termo $\sqrt{h}$ para a componente real (efeito pelicular) e da ordem harmônica h para a componente imaginária da matriz impedância, portanto $[b]$ e $[B]$ dos dispositivos da rede devem ser alteradas.

2.2 Linhas de Distribuição de Energia Elétrica

Considerando-se que nas redes de distribuição as admitâncias *shunt* são negligenciadas devido a seus baixos valores, a Figura 2 representa as linhas de distribuição de energia elétrica (Kersting, 2002).

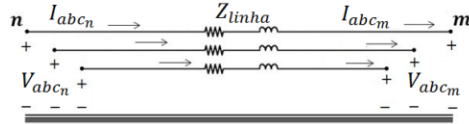


Figura 2. Representação das linhas de distribuição

Com base neste modelo e nos parâmetros dos cabos obtêm-se a matriz impedância $[Z_{abc}]$ e as demais matrizes expressas em (4) a serem inseridas no FPT.

$$[a] = [d] = [A] = [U][b] = [B] = [Z_{abc}][c] = [0] \quad (4)$$

$[U]$ - matriz identidade 3x3

2.3 Transformador Ligado em Y-Y

A Figura 3 representa o transformador ligado em estrela-estrela.

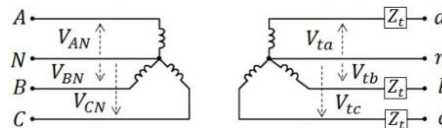


Figura 3. Representação do transformador Y-Y

As matrizes que representam o transformador no FPT estão determinadas em (5).

$$[a] = n_t \times [U][b] = n_t \times [Z_{tabc}][c] = [0] \quad (5)$$

$$[d] = [A] = \frac{1}{n_t} \times [U][B] = [Z_{tabc}]$$

Em (5), n_t corresponde à relação de espiras e $[Z_{tabc}]$ é a matriz de impedância do transformador.

A perda no transformador é calculada através da multiplicação da resistência do transformador pelo termo $\sqrt{h}$ (efeito pelicular) e pela corrente harmônica ao quadrado.

2.4 Banco de Capacitores em Y

O banco de capacitor ligado em estrela está representado na Figura 4.

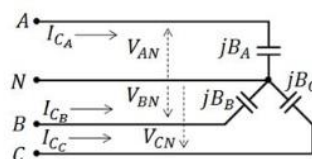


Figura 4. Representação do banco de capacitor conectado em Y

Para calcular a susceptância de cada fase do banco de capacitores (B) utiliza-se (6) (Kersting, 2002).

$$B = \frac{Q}{V_n^2} \quad (6)$$

Em (6), Q corresponde à potência reativa e V_n é a tensão de fase. A perda no banco de capacitor (P_{cap}) devido aos harmônicos é definida por (7) (Arrilaga, 2007).

$$P_{cap} = \sum_{n=1}^{\infty} C \times tg(\delta) \times \omega_n \times V_n^2 \quad (7)$$

Em (7), C é a capacitância, ω_n a velocidade angular para a frequência de interesse (rad/s) e $tg(\delta)$ corresponde ao fator de perda (para o polipropileno este valor é de 0,0002) (Vishay, 2016).

2.5 Motor de Indução Trifásico

Para estudar os harmônicos gerados pelo motor de indução trifásico utilizou-se a modelagem descrita por Pedra (Pedra, 2006) que permite estudar a reprodução dos harmônicos. Esta modelagem utiliza o circuito equivalente para determinar a impedância para frequência fundamental e para as componentes harmônicas, como mostra a Figura 5.

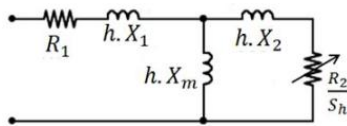


Figura 5. Circuito equivalente do motor de indução para uma fase

Na Figura 5, h corresponde à ordem harmônica, S_h é o escorregamento, R_1 é a resistência dos enrolamentos do estator, X_1 é a reatância de dispersão dos enrolamentos do estator, R_2 é a resistência dos enrolamentos do rotor, X_2 é a reatância de dispersão do rotor e X_m é a reatância de magnetização (Pedra, 2006).

Para calcular a impedância para a frequência fundamental e para as componentes harmônicas utiliza-se (8).

$$Z_m^h = R_1 + jh \times X_1 + \left(\frac{1}{jh \times X_m} + \frac{1}{\frac{R_r}{S_h} + jh \times X_r} \right)^{-1} \quad (8)$$

Para a frequência fundamental h é igual a 1 e o escorregamento S_1 é definido através de (9) (Del Toro, 1994).

$$S_1 = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (9)$$

Em (9), ω_s corresponde à velocidade síncrona e ω_r é a velocidade do rotor, ambas em rpm. Para as componentes harmônicas, o escorregamento deve ser determinado através de (10).

$$S_h = \frac{h \times \omega_s \pm \gamma \times \omega_m}{h \times \omega_s} \quad (10)$$

Em (10), γ compreende ao número de pares de polos e utiliza-se o sinal positivo para sequência positiva e negativo para a sequência negativa.

A matriz que representa o motor de indução no FPT para as componentes harmônicas é obtida através de (11).

$$[Y_{M_{abc}}^h] = [A_s] \times [Y_{M_{012}}^h] \times [T] \times [A_s]^{-1} \quad (11)$$

A matriz $[A_s]$ transforma as componentes de sequência em componentes de fase, definida por (12).

$$[A_s] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix} \text{ para } a_s = 1 \angle 120^\circ \quad (12)$$

A matriz $[Y_{M_{012}}^h]$ é a matriz admitância de sequência do motor, definida através de (13).

$$[Y_{M_{012}}^h] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{M_1}^h & 0 \\ 0 & 0 & Y_{M_2}^h \end{bmatrix} \quad (13)$$

O termo unitário presente em (13) compreende a ligação das bobinas do estator em estrela e os elementos $Y_{M_1}^h$ e $Y_{M_2}^h$ são oriundos dos cálculos do inverso das impedâncias para as sequências positiva e negativa, respectivamente (Kersting, 2002).

No modelo matemático do motor de indução a matriz $[T]$ transforma as componentes de linha em fase, sendo definida através de (14).

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & t_s^* & 0 \\ 0 & 0 & t_s \end{bmatrix} \text{ para } t_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \quad (14)$$

Com a impedância para a frequência fundamental, determina-se a corrente que circula no estator do motor (15).

$$[I^1] = [Z_m^1]^{-1} \times [V^1] \quad (15)$$

Com as correntes para a frequência fundamental, determinam-se as correntes harmônicas através da Tabela 1 (Duque, 2013).

Tabela 1. Porcentagens para as Correntes Harmônicas.

h	5	7	11	13	17
p (%)	3,0	2,5	1,5	1,0	0,2

As tensões harmônicas do motor estão definidas em (16).

$$[V^h] = [Y_m^h]^{-1} \times [I^h] \quad (16)$$

A presença das correntes harmônicas (I^h) nos enrolamentos do estator produz o torque (T^h) calculado através de (17) (Arrilaga, 2007).

$$T^h = 3 \times \frac{(I^h)^2 \times R_2^2}{h \times S_h} \quad (17)$$

2.6 Forno Elétrico a Arco

Para a representação do forno elétrico a arco utilizou-se o modelo proposto por Ahmed et al. (Ahmed, 1999). Este modelo é composto por uma fonte de tensão harmônica (tensão do arco elétrico) em série com uma impedância (cabos de alimentação), conforme indicado na Figura 6.

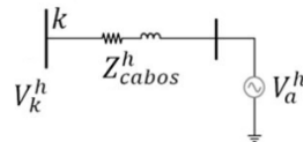


Figura 6. Circuito simplificado do forno a arco

A tensão do arco elétrico para a frequência fundamental é definida através de (18) (Ahmed, 1999).

$$V_a^1 = (A + C) + B \times L_a \quad (18)$$

Em (18), V_a^1 corresponde à tensão do arco elétrico para a frequência fundamental, A é a tensão no anodo, B é a queda de tensão média por unidade de comprimento, C é a queda de tensão do catodo e L_a é o comprimento médio do arco.

As porcentagens para se obterem as tensões harmônicas do arco elétrico estão indicadas na Tabela 2 (Chang, 2008).

Tabela 2. Porcentagens das Tensões Harmônicas.

h	3	5	7	9	11
p (%)	33,3	19,9	14,2	11,0	8,9

Para determinar a corrente na frequência fundamental para cada fase utilizou-se o princípio proposto em (Chang, 2008), que calcula a corrente em cada fase através da queda de tensão nos cabos de alimentação como está indicado em (19).

$$I^1 = \frac{V_k^1 - V_a^1}{Z_{cabos}^1} \quad (19)$$

Em (19), I^1 é a corrente para a frequência fundamental, V_k^1 a tensão na barra do forno e Z_{cabos}^1 a impedância dos cabos.

A determinação das correntes harmônicas em cada fase leva em consideração a divisão da tensão do arco elétrico pela soma das impedâncias harmônicas dos cabos com as impedâncias da rede (tronco principal da rede que liga o forno elétrico a arco à subestação), conforme (20).

$$I^h = \frac{V_a^h}{Z_{rede}^h + Z_{cabos}^h} \quad (20)$$

Em (20), I^h corresponde à corrente harmônica, V_a^h é a tensão harmônica do arco elétrico, Z_{rede}^h é a impedância harmônica da rede (tronco principal) e Z_{cabos}^h é a impedância harmônica dos cabos.

Para calcular as perdas nos cabos de alimentação (P_{cabos}) utiliza-se (21) que considera o efeito pelicular que ocorre nos cabos (Paul, 2008).

$$P_{cabos} = \sum_{h=1}^{\infty} R^h \times (I^h)^2, R^h = \frac{1}{\sigma} \times \sqrt{\frac{\omega_h \times \mu_0 \times \sigma}{2}} \quad (21)$$

Em (21), R^h corresponde à resistência devido ao efeito pelicular, σ a condutividade elétrica do material (S/m), ω_h a velocidade angular harmônica (rad/s) e μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo (H/m) (Paul, 2008).

3 Estudos de Caso

3.1 Simulação do Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico de 6 pólos que está localizado na barra 680 e tem seus parâmetros descritos pela Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros do Motor de Indução Trifásico.

$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$X_2(\Omega)$	$X_m(\Omega)$	$\omega_n(\text{rpm})$	$\omega_s(\text{rpm})$
1,25	1,47	1,05	1,47	120	1200	1182

A Figura 7 representa a rede com o motor de indução conectado a barra 680.

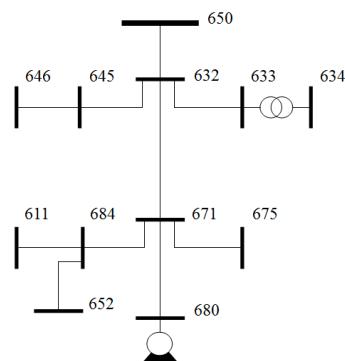


Figura 7. Rede com o motor conectado a barra 680

As magnitudes e ângulos das tensões e das correntes na rede obtidas com o FPT para a versão tradicional e harmônica estão na Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente.

Tabela 4. Valores das Tensões nas Barras da Rede.

BARRA		1° H		5° H		7° H		DHTv
N.	F.	V(V)	θ(°)	V(V)	θ(°)	V(V)	θ(°)	(%)
650	A	2.550,95	0,00	15,92	72,30	18,68	34,96	1,67
650	B	2.521,82	-120,00	16,13	-52,12	19,38	-89,07	1,74
650	C	2.567,56	120,00	15,50	-168,88	18,64	153,13	1,63
632	A	2.442,39	-2,59	16,25	72,00	19,06	34,66	1,78
632	B	2.493,36	-121,82	16,51	-52,14	19,85	-89,07	1,80
632	C	2.438,06	117,61	15,89	-169,08	19,10	152,94	1,76
633	A	2.435,08	-2,65	16,17	71,99	18,97	34,66	1,78
633	B	2.488,80	-121,87	16,47	-52,16	19,79	-89,08	1,80
633	C	2.431,77	117,60	15,84	-169,00	19,05	153,02	1,76
634	A	274,30	-3,34	1,79	71,90	2,10	34,66	1,75
634	B	282,06	-122,33	1,85	-52,19	2,22	-89,05	1,78
634	C	275,36	117,12	1,77	-169,04	2,13	153,05	1,74
645	A	-	-	-	-	-	-	-
645	B	2.471,65	-122,00	16,32	-52,17	19,61	-89,07	1,80
645	C	2.433,68	117,63	15,85	-169,01	19,06	153,02	1,76
646	A	-	-	-	-	-	-	-
646	B	2.467,70	-122,07	16,28	-52,23	19,56	-89,12	1,80
646	C	2.428,96	117,67	15,82	-168,90	19,02	153,13	1,76
671	A	2.362,06	-5,51	16,71	71,04	19,61	33,74	1,90
671	B	2.505,79	-122,57	17,55	-51,40	21,10	-88,32	1,91
671	C	2.330,13	115,35	16,53	-169,17	19,88	152,84	1,92
675	A	2.346,78	-5,77	16,52	71,08	19,39	33,83	1,89
675	B	2.511,21	-122,73	17,57	-51,57	21,11	-88,47	1,91
675	C	2.325,35	115,36	16,51	-169,12	19,85	152,88	1,92
680	A	2.358,09	-5,56	17,94	71,80	21,15	34,21	2,05
680	B	2.502,65	-122,66	18,00	-50,34	21,68	-87,22	1,96
680	C	2.326,74	115,28	17,47	-169,57	21,01	152,24	2,04
684	A	2.357,16	-5,53	16,66	71,00	19,55	33,70	1,90
684	B	-	-	-	-	-	-	-
684	C	2.325,21	115,24	16,46	-169,13	19,80	152,90	1,91
611	A	-	-	-	-	-	-	-
611	B	-	-	-	-	-	-	-
611	C	2.320,32	115,09	16,38	-169,16	19,70	152,89	1,91
652	A	2.342,47	-5,49	16,56	71,16	19,44	33,85	1,90
652	B	-	-	-	-	-	-	-
652	C	-	-	-	-	-	-	-

A Figura 8 apresenta os níveis de distorção harmônica total para tensão.

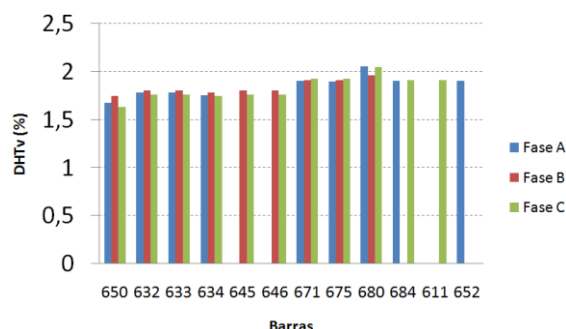


Figura 8. Distorção harmônica total para tensão

Tabela 5. Valores das Correntes nos Ramos da Rede.

BARRA			1° H		5° H		7° H	
Ini	Fin	F	I(A)	0(°)	I(A)	0(°)	I(A)	0(°)
650	632	A	606,94	-29,65	0,33	-17,70	0,27	-55,04
650	632	B	450,90	-143,69	0,33	-142,12	0,28	-179,07
650	632	C	629,19	93,77	0,32	101,12	0,27	63,13
632	633	A	81,68	-37,84	0,18	-1,88	0,15	-43,60
632	633	B	61,36	-159,20	0,13	-127,25	0,11	-168,27
632	633	C	62,86	80,25	0,13	115,90	0,11	73,84
633	634	A	707,86	-37,84	1,57	-1,88	1,34	-43,60
633	634	B	531,80	-159,20	1,12	-127,25	0,98	-168,27
633	634	C	544,75	80,25	1,13	115,90	0,99	73,84
632	645	A	-	-	-	-	-	-
632	645	B	140,25	-143,09	0,32	-111,44	0,29	-152,93
632	645	C	62,08	58,10	0,16	87,00	0,14	44,88
645	646	A	-	-	-	-	-	-
645	646	B	62,08	-121,91	0,16	-93,00	0,14	-135,12
645	646	C	62,08	58,10	0,16	87,00	0,14	44,88
632	671	A	526,22	-28,38	0,50	-12,07	0,43	-50,92
632	671	B	251,97	-140,29	0,76	-126,98	0,67	-166,35
632	671	C	520,15	99,39	0,59	100,67	0,52	60,71
671	675	A	206,71	-4,59	0,66	12,88	0,58	-32,74
671	675	B	61,98	-58,64	0,04	15,44	0,03	-16,50
671	675	C	124,82	112,99	0,24	123,81	0,21	79,40
671	680	A	38,18	-37,29	1,93	-0,87	1,68	-43,51
671	680	B	40,52	-154,38	1,28	-125,49	1,13	-165,84
671	680	C	37,67	83,55	1,51	117,42	1,33	74,96
671	684	A	65,83	-39,39	0,16	-2,26	0,14	-44,15
671	684	B	-	-	-	-	-	-
671	684	C	73,77	121,80	0,19	130,96	0,17	84,86
684	611	A	-	-	-	-	-	-
684	611	B	-	-	-	-	-	-
684	611	C	73,77	121,80	0,19	130,96	0,17	84,86
684	652	A	65,83	-39,39	0,16	-2,26	0,14	-44,15
684	652	B	-	-	-	-	-	-
684	652	C	-	-	-	-	-	-

A Tabela 6 apresenta as perdas em componentes da rede devido ao funcionamento do motor de indução trifásico.

Tabela 6. Perdas em Componentes da Rede.

Dispositivos	Perdas			Perc. Aumento de Perdas (%)
	Fund. (W)	Harm. (W)	Total (W)	
Linhas	408109,628	7,860	408117,488	0,002
Transf.	72,925	0,002	72,927	0,003
Banco Cap.	160,000	0,280	160,300	0,187

Os harmônicos oriundos do motor de indução provocam perdas nos componentes da rede, nota-se que o maior percentual de perda harmônica ocorre no banco de capacitores com 0,187 %, seguido pelo transformador com 0,003% e as linhas com 0,002%.

3.2 Simulação com o Motor de Indução Trifásico e o Forno Elétrico a Arco

Para este estudo de caso foi adicionado a rede, na barra 634, um forno elétrico a arco com as características: resistência dos cabos de 0,35 mΩ; reatância dos cabos de 22 mΩ; parâmetro A igual a 30 V; B igual a 12 V/cm; C igual a 10 V; o comprimento de 5 cm.

A Figura 9 representa a disposição das cargas.

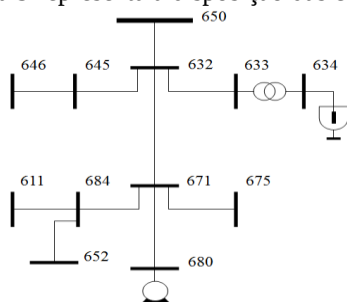


Figura 9. Rede disposição das cargas não lineares

As magnitudes e ângulos das tensões e das correntes na rede obtidas com o FPT para a versão tradicional e harmônica estão na Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7. Valores das Tensões nas Barras da Rede.

BARRAS		1 H		3 H		5 H		DHTv (%)
N.	F.	U(V)	θ(°)	U(V)	θ(°)	U(V)	θ(°)	
650	A	2.550,33	0,0	247,22	1,18	157,9	9,82	13,38
650	B	2.521,78	-120,0	248	-117,44	158,26	-108,77	13,58
650	C	2.567,26	120,0	251,8	121,28	160,39	129,78	13,53
632	A	2.363,06	-1,5	223,73	7,38	163,73	18,28	14,39
632	B	2.392,95	-121,5	238,79	-115,62	185,48	-110,1	14,89
632	C	2.342,93	118,2	247,49	127,3	199,49	133,76	16,39
633	A	2.331,58	-1,1	226,99	10,23	170,04	21,85	15,15
633	B	2.356,88	-121,0	246,23	-114,39	191,36	-109,42	15,59
633	C	2.309,65	118,8	260,86	129,13	212,44	134,54	17,69
634	A	233,12	3,0	34,47	28,3	29,42	37,49	26,03
634	B	235,42	-117,0	37,38	-101,59	30,49	-100,35	24,85
634	C	231,13	122,8	40,92	141,83	34,51	142,79	28,70
645	A	-	-	-	-	-	-	-
645	B	2.370,41	-121,7	236,16	-115,82	183,35	-110,28	14,86
645	C	2.338,62	118,2	246,97	127,3	199,05	133,76	16,39
646	A	-	-	-	-	-	-	-
646	B	2.366,29	-121,8	235,67	-115,91	182,94	-110,37	14,86
646	C	2.333,70	118,3	246,41	127,37	198,61	133,83	16,39
671	A	2.279,51	-4,7	193,54	4,29	152,53	13,98	13,38
671	B	2.405,42	-122,3	221,95	-117	207,33	-112,55	15,14
671	C	2.229,91	115,8	209,32	125,89	200,2	133,19	15,89
675	A	2.263,67	-4,9	191,78	4,11	151,03	13,85	13,35
675	B	2.411,10	-122,5	222,22	-117,11	207,53	-112,62	15,12
675	C	2.224,85	115,8	208,89	125,89	199,68	133,17	15,89
680	A	2.275,33	-4,7	187,29	4,6	156,07	13,5	13,41
680	B	2.401,98	-122,4	212,74	-117,29	217,97	-113,2	15,32
680	C	2.226,25	115,7	200,57	125,68	211,53	133,16	16,15
684	A	2.274,47	-4,7	193,09	4,23	152,19	13,88	13,38
684	B	-	-	-	-	-	-	-
684	C	2.224,73	115,6	208,53	125,83	199,33	133,16	15,86
611	A	-	-	-	-	-	-	-
611	B	-	-	-	-	-	-	-
611	C	2.219,63	115,5	207,68	125,71	198,39	133,06	15,82
652	A	2.259,23	-4,6	191,96	4,27	151,33	13,91	13,39
652	B	-	-	-	-	-	-	-
652	C	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 8. Valores das Correntes nos Ramos da Rede.

BARRAS			1 H		3 H		5 H	
Ini.	Fin.	F	I(A)	0(°)	I(A)	0(°)	I(A)	0(°)
650	632	A	859,7	-53,8	44,0	48,9	23,2	-22,7
650	632	B	719,4	-175,5	29,4	-86,1	27,0	175,6
650	632	C	881,1	69,7	32,1	158,0	24,0	63,6
632	633	A	438,8	-86,5	51,5	-11,0	29,3	-19,6
632	633	B	446,4	153,6	47,4	-148,2	23,3	-162,2
632	633	C	432,3	33,4	54,7	92,0	27,0	78,0
633	634	A	3.803,2	-86,5	446,7	-11,0	254,1	-19,6
633	634	B	3.868,8	153,6	410,7	-148,2	202,0	-162,2
633	634	C	3.746,4	33,4	473,9	92,0	233,8	78,0
632	645	A	-	-	-	-	-	-
632	645	B	146,3	-142,8	7,9	-165,4	4,0	-169,6
632	645	C	64,7	58,4	3,7	34,3	1,9	28,9
645	646	A	-	-	-	-	-	-
645	646	B	64,7	-121,6	3,7	-145,7	1,9	-151,1
645	646	C	64,7	58,4	3,7	34,3	1,9	28,9
632	671	A	544,3	-28,0	48,2	-63,3	6,3	172,0
632	671	B	260,7	-140,4	35,2	169,6	12,1	135,6
632	671	C	540,9	99,5	47,5	58,6	7,8	-30,6
671	675	A	214,3	-3,7	11,8	-37,6	6,5	-44,4
671	675	B	64,6	-58,4	1,2	-56,6	0,5	-45,6
671	675	C	130,5	113,4	5,4	73,0	3,2	66,1
671	680	A	38,8	-41,0	22,2	-77,0	12,1	-81,0
671	680	B	40,9	-158,6	25,2	161,1	16,9	152,4
671	680	C	37,9	79,4	23,8	44,0	16,4	38,7
671	684	A	68,3	-38,5	3,1	-59,3	1,6	-59,5
671	684	B	-	-	-	-	-	-
671	684	C	77,1	122,2	4,0	82,7	2,6	73,2
684	611	A	-	-	-	-	-	-
684	611	B	-	-	-	-	-	-
684	611	C	77,1	122,2	4,0	82,7	2,6	73,2
684	652	A	68,3	-38,5	3,1	-59,3	1,6	-59,5
684	652	B	-	-	-	-	-	-
684	652	C	-	-	-	-	-	-

A Figura 10 apresenta os níveis de distorção harmônica total para tensão.

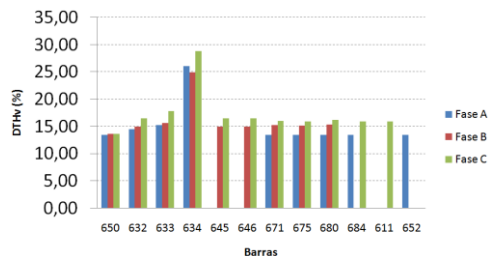


Figura 10. Distorção harmônica total para tensão

A Tabela 9 apresenta as perdas em componentes da rede devido ao funcionamento do motor de indução trifásico juntamente com o forno elétrico a arco.

Tabela 9. Perdas em Componentes da Rede.

Dispositivos	Perdas			Perc. Aumento de Perdas (%)
	Fund. (W)	Harm. (W)	Total (W)	
Linhas	741.122,09	9.056,29	750.178,38	1,22
Transf.	2.933,39	113,55	3.046,94	3,87
Banco Cap.	160,00	19,67	179,67	12,29

Os harmônicos oriundos das cargas não lineares (motor de indução e forno elétrico a arco) provocam entre outros fenômenos o aumento das perdas nos dispositivos da rede elétrica. Em ordem decrescente o maior percentual do aumento de perdas ocorre nos bancos de capacitores chegando a 12,29 %, seguido pela perda no transformador e nas linhas com 3,87 % e 1,22%.

4 Conclusão

Analisando o estudo de caso 3.1, que consiste na inserção do motor de indução na barra 680, verificou-se que no ponto de conexão comum (PCC) as distorção harmônica individual e total não violam as normas IEEE 519-1992, IEC 610003-6, EN 50160 e o módulo 8 do Prodist (regulamentação da ANEEL). No estudo de caso 3.2, onde foi adicionada uma carga não linear (forno elétrico a arco) que possui um alto teor harmônico, verificou-se o não seguimento das normas descritas anteriormente. Este fenômeno ocorre devido à injeção de correntes harmônicas possuírem altas magnitudes acarretando na deformação da tensão nas barras da rede de distribuição.

Comparando o estudo de caso 3.1 com o estudo de caso 3.2 nota-se que os fluxos de corrente na rede são maiores na rede que possui mais cargas não lineares em funcionamento. Este aumento do fluxo de corrente acarreta no aumento das perdas nas linhas de distribuição, nos transformadores e nos bancos de capacitores. Para este estudo verificou-se que as perdas nas linhas de distribuição na rede que possui somente o motor em funcionamento (estudo de caso 3.1) compreendem a 54,40 % das perdas nas linhas quando o motor e o forno estão em funcionamento (estudo de caso 3.2), de modo análogo, a perda no transformador e nos bancos de capacitores são de 2,39 % e 89,22 %, respectivamente.

Nos motores de indução trifásicos a presença de correntes harmônicas nos seus enrolamentos acarreta no aumento das perdas no ferro e no cobre, do ruído audível e a redução da eficiência (Arrilaga, 2007).

A utilização dos fornos elétricos gera distúrbios de tensão na rede de distribuição de energia elétrica chamados de efeito *flicker*, além das distorções harmônicas e dos desequilíbrios.

Portanto, o aumento desregrado de cargas não lineares conectadas a rede de distribuição acarreta no aumento do conteúdo harmônico, dos efeitos danosos ao sistema elétrico (aumento das perdas no dielétrico dos bancos de capacitores, degradação do material isolante em transformadores devido ao aquecimento e o efeito pelicular nas linhas), além da violação das normas vigentes de qualidade de energia elétrica.

Referências Bibliográficas

- Ahmed, E. E.; Aziz, M. M. A.; El-Zahab, E. A., Xu, W.; "Investigation and Mitigation of Harmonic from Electrical Arc Furnace", IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1999.
- Archundia-Aranda, I.; Mota-Palomino, R.O. Harmonic load flow method for radial distribution networks Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010.
- Arrilaga, J. and Watson, N. R. "Power System Harmonics", Second edition, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2007.
- Chang, G. W.; Liu, Y. J.; Chen, C. I., "Modeling Voltage-Current Characteristics of on Electric Arc Furnace Based on Actual Recorded Data: A comparison of Classic and Advanced Models", Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE
- Del Toro, V. "Fundamentos de Máquinas Elétricas", Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1994.
- Duque, M. B. "Fluxo de Carga Trifásico para Análise de Distorções Harmônicas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2013.
- Gilbert, G. M.; Bouchard, D. E. and Chikhani, A. Y.. "A Comparison of Load Flow Analysis Using DISTFLOW, GAUSS-SEIDEL, and Optimal Load Flow Algorithms". IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998.
- Kersting, William H.. "Distribution system modeling and analysis". Florida: CRC Press, 2002. 314 p.
- Leão, R. P. S.; Sampaio, R. F.; Antunes, F. L. M. "Harmônicos em Sistemas Elétricos", Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- Paul, C. R. "Analysis of multiconductor transmission lines", Second edition, New Jersey, 2008.
- Pedra, J.; Sainz, L.; Córcoles, F., "Harmonic modeling of induction motors", Electric Power Research, 2006.
- Pomilio, J.A.; Deckmann, S.M., "Flicker effect produced by harmonics modulation", IEEE, Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998.
- Testfeeders:
<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>. Maio, 2016.
- Vishay Roederstein, General Technical Information: Film Capacitors.
<https://www.vishay.com/docs/26033/gentechinfofilm.pdf>
- Yang, Hui; When, Fushuan and Wang, Liping. "Newton-Raphson on Power Flow Algorithm and Broyden Method in the Distribution System". 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia