

Impacto Causado por Lâmpadas Fluorescentes Compactas e de LED na Rede de Distribuição

Thiago Prini Franchi

FACENS - Faculdade de Engenharia de Sorocaba
thiagoprinchi@gmail.com

Carlos A. F. Murari

FEEC, DSE, UNICAMP
murari@dsee.fee.unicamp.br

Resumo — Este artigo apresenta os impactos causados na rede de distribuição de energia elétrica devido ao uso em larga escala das lâmpadas fluorescentes compactas e de LED. Também são contempladas as modelagens matemáticas dos dispositivos da rede de distribuição, das lâmpadas e do fluxo de potência trifásico para as versões tradicional (frequência fundamental) e harmônica. O algoritmo desenvolvido que realiza o fluxo de potência trifásico para as versões tradicional e harmônica é baseado no método *backward/forward sweep* do tipo *Ladder*. Com os resultados obtidos com o algoritmo são estudadas e analisadas as perdas nos dispositivos da rede e os níveis de distorção harmônica.

Palavras-chaves — Lâmpadas Fluorescentes Compactas, Lâmpadas de LED's, Harmônicas, Método *Backward/Forward Sweep* do tipo *Ladder*, Qualidade de Energia.

I. INTRODUÇÃO

Na rede de distribuição de energia elétrica as cargas podem ser classificadas como lineares e não lineares. As cargas lineares não geram deformação na forma de onda da corrente enquanto que as cargas não lineares geram correntes distorcidas, sendo responsáveis pela geração de harmônicos na rede elétrica [19].

No Brasil, até meados de 2000 a iluminação residencial era composta basicamente por lâmpadas incandescentes que possuem um comportamento linear [2]. Em 2002, devido à crise energética e aos programas de eficiência promovidos pelas concessionárias, intensificou-se o esforço pela substituição das lâmpadas incandescentes pelas lâmpadas fluorescentes que são cargas não lineares [3]. Dentre os principais motivos para esta substituição estão: a queda dos preços das lâmpadas fluorescentes, a economia e a eficiência energética [4].

Com o avanço tecnológico surgiram dispositivos com melhor desempenho e mais econômicos para serem utilizados na iluminação residencial como, por exemplo, a lâmpada de LED (*Light Emitting Diode*) que também é uma carga não linear.

A modelagem harmônica da lâmpada fluorescente compacta (LFC) e de LED tem sido elaborada de diferentes maneiras por diferentes autores com o passar dos tempos. Teixeira et al [5] propõem a modelagem da LFC como uma fonte de corrente para as ordens harmônicas, porém enfatizam a importância da utilização do ângulo da corrente de cada componente harmônica (o emprego dos ângulos

possibilitam possíveis cancelamentos devido a presença de outras cargas não lineares na rede elétrica); Wei et al [6] também utilizam uma fonte de corrente harmônica para representar a LFC com o conteúdo harmônico definido através da Transformada Rápida de Fourier; e Rylander e Grady [7] propõem a modelagem através do circuito equivalente de Norton.

Uddin et al [8] descrevem o conteúdo harmônico oriundo de diferentes lâmpadas de LED de baixa potência; Martinson et al [9] determinam que para a frequência fundamental a lâmpada LED pode ser modelada como uma carga linear (através de uma impedância) e para as componentes harmônicas através do circuito equivalente de Norton; Uddin et al [10] também descrevem a modelagem harmônica através do circuito equivalente de Norton.

II. MODELAGEM MATEMÁTICA

Este tópico é destinado as modelagens matemáticas dos componentes da rede elétrica (linhas de distribuição, transformador, bancos de capacitores e cargas lineares), das lâmpadas (LFCs e de LEDs) e do algoritmo desenvolvido para realizar o cálculo do Fluxo de Potência Trifásico (FPT) para as versões tradicional e harmônica.

A. Fluxo de Potência Trifásico para Versão Tradicional

O algoritmo desenvolvido para realizar o cálculo do FPT para versão tradicional é baseado no método *backward/forward sweep* do tipo *Ladder* [11]. Na iteração *backward sweep* determinam-se as tensões de fase e as correntes de linha nas barras a montante, partindo da barra final (m) em direção à barra inicial (n), através de (1) e (2) [11].

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

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

A iteração *forward sweep* parte da barra inicial (subestação) em direção às barras terminais atualizando as tensões de fase nas barras a jusante, conforme (3) [11].

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

Através das equações do FPT observa-se a necessidade de determinar as matrizes $[a]$, $[b]$, $[c]$, $[d]$, $[A]$ e $[B]$ para os dispositivos séries da rede de distribuição de energia elétrica.

B. Linhas de Distribuição

As linhas de distribuição de energia elétrica possuem baixos valores de admitância *shunt* e por esta razão elas são desprezadas no modelo simplificado, como mostra a Fig. 1 [11].

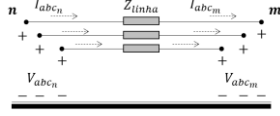


Fig. 1. Modelo simplificado das linhas de distribuição de energia elétrica.

Com base na disposição e no comprimento dos cabos determina-se a matriz primitiva utilizando-se as equações de Carson. Aplicando a redução de Kron na matriz primitiva encontra-se a matriz de impedância de fase $[Z_{linha}]$. Com esta definição, determinam-se as matrizes inseridas no FPT como está definida em (4) [11].

$$\begin{aligned} [a] &= [d] = [A] = [U] & [b] &= [B] = [Z_{linha}] \\ [c] &= [0] & [U] &- \text{Matriz identidade } 3 \times 3 \end{aligned} \quad (4)$$

Para determinar as perdas harmônicas da rede de distribuição (P_{linha}^h) utiliza-se (5) [1].

$$P_{linha}^h = \sqrt{h} \cdot R \cdot (I^h)^2 \quad (5)$$

Em (5), o termo $\sqrt{h}$ é utilizado para representar o efeito pelicular, R compreende a resistência da rede e I^h a corrente harmônica. É importante salientar que o cálculo das perdas considera as perdas mútuas das linhas.

C. Transformador Y-Y

O transformador da rede de 13 barras do IEEE [12] está configurado através da ligação estrela-estrela, como representado na Fig. 2 [11].

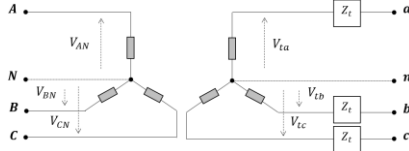


Fig. 2. Transformador Y-Y

Inicialmente, determina-se a relação de espiras (n_t) através de (6) [11].

$$n_t = \frac{V_{f(pri)}}{V_{f(sec)}} \quad (6)$$

Em (6), $V_{f(pri)}$ e $V_{f(sec)}$ são as tensões de fase no primário e secundário, respectivamente [11].

As matrizes que são utilizadas para representar o transformador no FPT estão determinadas em (7) [11].

$$\begin{aligned} [a] &= n_t \cdot [U] & [b] &= n_t \cdot [Z_{tabc}] & [c] &= [0] \\ [d] &= [A] = \frac{1}{n_t} \cdot [U] & [B] &= [Z_{tabc}] \end{aligned} \quad (7)$$

Em (7), $[Z_{tabc}]$ é a matriz impedância do transformador [11].

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

D. Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores trifásicos podem ser configurados em estrela ou triângulo, como mostra a Fig. 3.

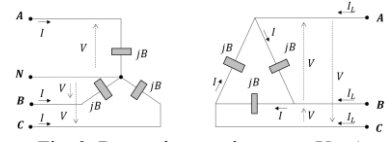


Fig. 3. Banco de capacitores em Y e Δ

Inicialmente, deve-se determinar a susceptância (B) em cada fase através dos valores de potência reativa (Q) e da tensão (V), como está definido em (8) [11].

$$B = \frac{Q}{V^2} \quad (8)$$

Com o valor da susceptância de cada fase determina-se a corrente de fase para a frequência fundamental (I), conforme indicado em (9) [11].

$$I = jB \cdot V \quad (9)$$

Nos bancos de capacitores em triângulo a corrente de linha (I_L) é determinada através da lei de Kirchhoff para as correntes, como indicado em (10) [11].

$$[I_L] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot [I] \quad (10)$$

A equação (11) permite obter as perdas harmônicas nos dielétricos dos capacitores (P_{cap}^h) [1].

$$P_{cap}^h = C \cdot \text{tg}(\delta) \cdot h \cdot \omega \cdot (V^h)^2 \quad (11)$$

Em (11), C é a capacitância, h a ordem harmônica, ω a velocidade angular, V^h a tensão harmônica e $\text{tg}(\delta)$ o fator de perdas (para o polipropileno é 0,0002 [13]).

E. Cargas na Rede de Distribuição

Na rede de distribuição de energia elétrica as cargas não lineares geram correntes distorcidas que por sua vez deformam a tensão devido às quedas de tensões que ocorrem nos ramos da rede [1].

Na Fig. 4 estão as formas de se representar as cargas lineares e não lineares no FPT harmônico.

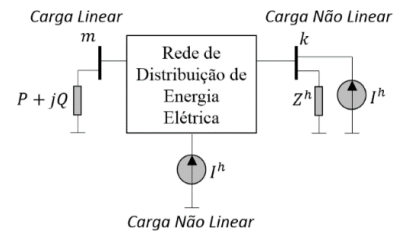


Fig. 4. Modelo de carga linear e não linear na rede de distribuição.

Devido a este comportamento, as cargas não lineares podem ser representadas no FPT harmônico pelos modelos: equivalente de Norton, equivalente de Thévenin ou como uma injeção de corrente (Fig. 4).

Os tópicos que seguem contemplam a modelagem matemática das cargas lineares e não lineares.

1) Cargas Lineares

As cargas lineares trifásicas podem ser divididas em cargas de potência constante, impedância constante e corrente constante (ligadas em Y ou Δ), como indicado na Fig. 5 [11].

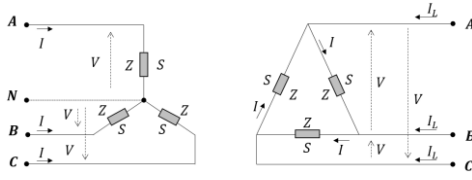


Fig. 5. Cargas lineares em Y e Δ

Os valores conhecidos das cargas lineares compreendem a tensão e a potência de cada fase, conforme (12) [11].

$$S \angle \theta = P + jQ \quad e \quad V \angle \delta \quad (12)$$

Para a carga de potência constante a corrente de fase é determinada através de (13) [11].

$$I = \left(\frac{S}{V} \right)^* \quad (13)$$

Na carga de impedância constante é necessário determinar a impedância para, posteriormente, calcular a corrente conforme (14) [11].

$$Z = \frac{|V|^2}{S} \quad e \quad I = \frac{V}{Z} \quad (14)$$

Para a carga de corrente constante, a corrente é determinada através do cálculo da sua magnitude e fase, como mostra (15) [11].

$$|I| = \left(\frac{S}{V} \right)^* \quad e \quad I = |I| \angle \delta - \theta \quad (15)$$

As equações (13), (14) e (15) são utilizadas para determinar as correntes de fase para as cargas ligadas em estrela ou triângulo, porém para determinar as correntes de linha para a carga em triângulo deve-se utilizar a equação (10) [11].

As modelagens das cargas não lineares (LFC e de LED) estão descritas no próximo tópico.

2) Lâmpadas Fluorescentes Compactas e de LED

A modelagem adotada neste trabalho para as LFCs e de LED para a frequência fundamental compreendem a representa-las como cargas de potência constante no FPT, conforme a Fig. 6.

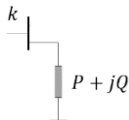


Fig. 6. Modelo da lâmpada (LFC e de LED) para freq. fundamental.

O valor da corrente é determinado através de valores de potência, FP e tensão de alimentação.

Nas frequências harmônicas a modelagem adotada compreende a uma fonte de corrente harmônica [5] para a representação no FPT (versão harmônica).

A Fig. 7 representa o modelo das lâmpadas (LFC e de LED) inseridas no FPT harmônico [5].

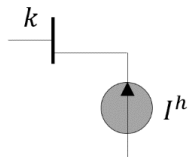


Fig. 7. Modelo da lâmpada (LFC e de LED) para as frequências harmônicas.

Para determinação dos parâmetros do modelo utiliza-se o conteúdo harmônico descrito pela lâmpada. Neste trabalho é utilizada uma LFC de 14 W com FP de 0,6 e seu conteúdo harmônico está descrito pela Fig. 8 [14].

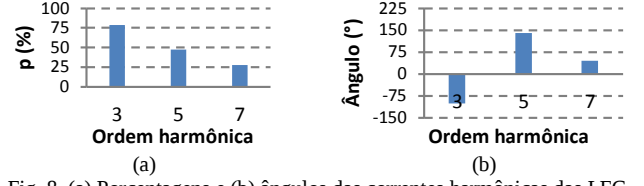


Fig. 8. (a) Porcentagens e (b) ângulos das correntes harmônicas das LFC.

O conteúdo harmônico de uma lâmpada de LED de 9 W com FP de 0,76 está descrito pela Fig. 9 [15].

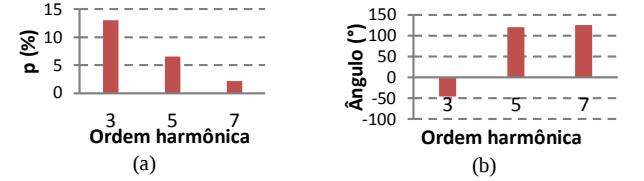


Fig. 9. (a) Porcentagens e (b) ângulos das correntes harmônicas das lâmpadas LED.

Com a representação dos dispositivos da rede dá-se início ao processo de inicialização das tensões harmônicas para, posteriormente, determinar o estado da rede para as frequências harmônicas de interesse (através do FPT harmônico).

F. Inicialização das Tensões Harmônicas

O processo de inicialização das tensões harmônicas compreende a um processo preliminar ao FPT para a versão harmônica. Neste processo assume-se que os únicos dispositivos *shunts* da rede são correntes das cargas não lineares e que a distorção harmônica para a tensão na barra da subestação é nula [16].

Partindo desta premissa e através das análises em [1], [16] e [17], verifica-se que a representação matemática dos elementos série da rede devem ser alterados de acordo com a frequência harmônica de interesse. A alteração corresponde à multiplicação da componente real da impedância pelo termo $\sqrt{h}$ (efeito pelicular) e a componente imaginária pela ordem harmônica h , portanto $[b]$ e $[B]$ devem ser alteradas.

Este processo realiza uma iteração *backward sweep* e outra *forward sweep* para determinar as tensões harmônicas utilizadas no FPT para a versão harmônica [16].

G. Fluxo de Potência Trifásico para a Versão Harmônica

Com os valores oriundos do processo de inicialização das tensões harmônicas (matrizes alteradas $[b]$, $[B]$ e as tensões harmônicas) dá-se início ao FPT harmônico para determinar o estado da rede para cada frequência de interesse. Este processo é baseado no método *backward/forward sweep* [16].

III. SIMULAÇÕES

Para as simulações com as cargas não lineares utilizou-se a rede de 13 barras do IEEE [12], porém com algumas alterações. A primeira alteração elaborada é nos parâmetros do transformador (devido as características de alimentação das lâmpadas); a segunda ocorreu devido a retirada da barra 692 e ao acúmulo da sua carga (juntamente com a carga

distribuída) na barra 671; e a terceira devido a retirada das cargas na barra 634 para colocar os conjuntos de lâmpadas. A Fig. 10 representa o circuito utilizado nas simulações [12].

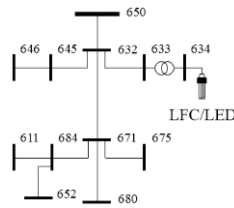


Fig. 10. Rede utilizada para as simulações.

Os parâmetros do transformador estão especificados na Tabela I.

TABELA I. PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR.

Tipo	Potência (kVA)	Tensão (V)		R_t (%)	X_t (%)
		Primário	Secundário		
Y-Y	500	4.160	380	0,1	0,2

Para haver uma correspondência entre a LFC e a de LED, utilizou-se o fluxo luminoso para que na substituição das lâmpadas não afete de forma significativa a luminosidade do ambiente. A LFC utilizada possui 14 W com 900 lúmens [14] e a lâmpada de LED de 9 W que possui um fluxo luminoso típico de 855 lúmens [18]. Portanto, para 3.000 LFC utilizou-se 3.159 lâmpadas de LED.

A. Simulação com um Conjunto de LFC

As LFCs adotadas são de 14 W e com FP de 0,6 [14]. Para esta simulação, utilizou-se 3.000 LFCs distribuídas entre as fases A, B e C da barra 634.

As magnitudes e ângulos das tensões nas barras da rede devido as LFCs estão definidas na Tabela II.

TABELA II. TENSÕES NAS BARRAS DEVIDO AS LFCs.

DADOS		Freq. Fund.		3° h		5° h		7° h	
B	F	U(V)	0(°)	U(V)	0(°)	U(V)	0(°)	U(V)	0(°)
650	A	2550,92	0,00	0,00	-30,29	0,00	-149,08	0,00	-9,37
650	B	2521,78	-120,00	0,00	88,88	0,00	-31,81	0,00	-111,06
650	C	2567,54	120,00	0,00	100,77	0,00	-14,68	0,00	-98,61
632	A	2470,46	-2,27	4,59	33,64	4,61	-81,59	3,71	-176,05
632	B	2512,27	-121,44	4,97	140,23	4,89	25,03	3,92	-69,25
632	C	2460,48	117,87	5,25	-88,36	5,25	156,42	4,23	61,94
633	A	2470,69	-2,29	6,17	29,48	6,16	-84,69	4,96	-178,65
633	B	2512,51	-121,45	6,66	140,75	6,56	26,45	5,25	-67,43
633	C	2460,65	117,85	6,89	-88,35	6,89	157,37	5,56	63,34
634	A	225,72	-2,30	0,71	29,38	0,70	-84,62	0,57	-178,49
634	B	229,54	-121,47	0,75	142,29	0,74	28,20	0,59	-65,60
634	C	224,80	117,83	0,77	-88,86	0,77	157,05	0,62	63,12
645	A	-	-	-	-	-	-	-	-
645	B	2490,71	-121,61	4,93	139,97	4,85	24,75	3,88	-69,53
645	C	2456,15	117,89	5,25	-88,43	5,25	156,36	4,23	61,87
646	A	-	-	-	-	-	-	-	-
646	B	2486,79	-121,68	4,92	139,89	4,85	24,66	3,88	-69,63
646	C	2451,45	117,93	5,26	-88,53	5,26	156,25	4,24	61,76
671	A	2397,73	-5,06	4,50	29,51	4,48	-86,53	3,60	178,50
671	B	2535,14	-122,01	4,94	138,01	4,81	22,42	3,82	-72,06
671	C	2358,90	115,85	5,13	-93,11	5,09	151,23	4,09	56,38
675	A	2382,28	-5,31	4,49	29,16	4,48	-87,00	3,59	177,95
675	B	2540,89	-122,19	4,94	137,83	4,81	22,18	3,82	-72,35
675	C	2354,29	115,86	5,11	-93,33	5,08	150,95	4,08	56,05
680	A	2397,70	-5,06	4,50	29,51	4,48	-86,53	3,60	178,50
680	B	2535,13	-122,01	4,94	138,01	4,81	22,42	3,82	-72,06
680	C	2358,90	115,85	5,13	-93,11	5,09	151,23	4,09	56,38
684	A	2392,91	-5,09	4,48	29,51	4,46	-86,53	3,58	178,52
684	B	-	-	-	-	-	-	-	-
684	C	2353,90	115,74	5,12	-93,37	5,09	150,89	4,09	55,98
611	A	-	-	-	-	-	-	-	-
611	B	-	-	-	-	-	-	-	-
611	C	2348,94	115,60	5,12	-93,61	5,08	150,59	4,08	55,62
652	A	2378,44	-5,04	4,46	29,48	4,44	-86,58	3,56	178,46
652	B	-	-	-	-	-	-	-	-
652	C	-	-	-	-	-	-	-	-

As magnitudes e ângulos das correntes nos ramos da rede devido a utilização das LFCs estão dispostas na Tabela III.

TABELA III. CORRENTES NOS RAMOS DEVIDO AS LFCs.

DADOS			Freq. Fund.		3° h		5° h		7° h	
B I	B F	F	I(A)	0(°)	I(A)	0(°)	I(A)	0(°)	I(A)	0(°)
650	632	A	484,25	-26,31	7,30	-55,71	4,39	-173,34	2,52	91,20
650	632	B	349,73	-136,40	7,10	65,20	4,25	-52,20	2,44	-147,50
650	632	C	529,55	97,01	7,23	-176,09	4,34	66,36	2,49	-29,09
632	633	A	9,44	50,42	7,39	-51,57	4,48	-168,63	2,59	96,26
632	633	B	9,29	-69,56	7,27	68,48	4,40	-48,59	2,54	-143,70
632	633	C	9,48	170,40	7,42	-171,61	4,49	71,32	2,60	-23,79
633	634	A	103,37	50,42	80,94	-51,57	49,00	-168,63	28,32	96,26
633	634	B	101,65	-69,56	79,60	68,48	48,18	-48,59	27,85	-143,70
633	634	C	103,80	170,40	81,27	-171,61	49,20	71,32	28,44	-23,79
632	645	A	-	-	-	-	-	-	-	-
632	645	B	139,18	-142,70	0,13	104,18	0,08	-17,78	0,05	-116,22
632	645	C	61,60	58,48	0,06	-54,93	0,04	-177,40	0,02	83,75
645	646	A	-	-	-	-	-	-	-	-
645	646	B	61,60	-121,52	0,06	125,07	0,04	2,60	0,02	-96,25
645	646	C	61,60	58,48	0,06	-54,93	0,04	-177,40	0,02	83,75
632	671	A	482,17	-27,41	0,54	26,68	0,37	-94,77	0,23	168,17
632	671	B	207,85	-134,55	0,34	145,58	0,24	20,33	0,15	-77,99
632	671	C	479,54	100,51	0,57	-106,87	0,39	132,24	0,24	35,65
671	675	A	203,61	-4,51	0,22	29,39	0,17	-86,89	0,12	178,02
671	675	B	69,81	-54,73	0,15	159,45	0,12	32,61	0,08	-66,00
671	675	C	123,47	111,95	0,15	-97,43	0,12	145,66	0,08	49,80
671	680	A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
671	680	B	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
671	680	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
671	684	A	64,84	-38,94	0,06	-19,85	0,04	-142,93	0,02	117,82
671	684	B	-	-	-	-	-	-	-	-
671	684	C	72,68	120,86	0,09	-92,31	0,07	151,19	0,05	55,99
684	611	A	-	-	-	-	-	-	-	-
684	611	B	-	-	-	-	-	-	-	-
684	611	C	72,68	120,86	0,09	-92,31	0,07	151,19	0,05	55,99
684	652	A	64,84	-38,94	0,06	-19,85	0,04	-142,93	0,02	117,82
684	652	B	-	-	-	-	-	-	-	-
684	652	C	-	-	-	-	-	-	-	-

A Fig. 11 representa a distorção harmônica total para a tensão nas barras da rede.

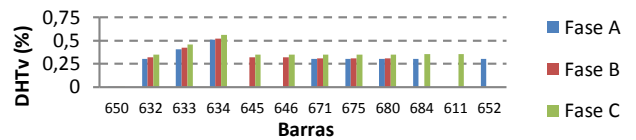


Fig. 11. DHT para as tensões nas barras da rede com as LFC.

Através dos níveis de distorção harmônica total para tensão pode-se verificar dois aspectos. O primeiro compreende as maiores distorções harmônicas ocorrem na barra onde as cargas não lineares estão instaladas (barra 634) e segundo corresponde ao comportamento da distorção harmônica que afeta de forma mais significativa as barras vizinhas (estando ou não dentro do tronco principal da rede) a barra 634.

A Fig. 12 representa a distorção harmônica total para a corrente nos ramos da rede.

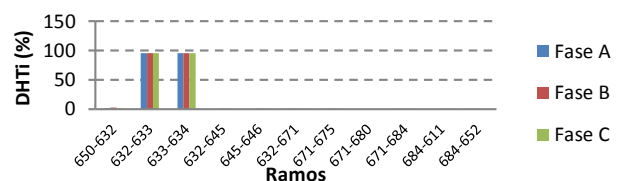


Fig. 12. DHT para as correntes nos ramos da rede com as LFC.

Através da análise dos níveis de distorções harmônicas para corrente verifica-se que as maiores distorções ocorrem nos ramos que estão no tronco principal da rede. Isto ocorre devido a maior parcela das correntes harmônicas seguirem em direção a barra da subestação, pois este é o caminho de menor impedância para a fonte de harmônicos.

B. Simulação com um Conjunto de lâmpadas LED

As lâmpadas de LED utilizadas possuem potência de 9 W com o FP de 0,76 [15]. Nesta simulação utilizou-se 3.159 lâmpadas distribuídas entre as fases A, B e C da barra 634.

As magnitudes e ângulos das tensões nas barras da rede com as lâmpadas de LED estão dispostas na Tabela IV.

TABELA IV. TENSÕES NAS BARRAS DEVIDO AS LÂMPADAS DE LED.

DADOS		Freq. Fund.		3° h		5° h		7° h	
B	F	U (V)	θ (°)	U (V)	θ (°)	U (V)	θ (°)	U (V)	θ (°)
650	A	2550,92	0,00	0,00	-124,17	0,00	-92,12	0,00	24,67
650	B	2521,78	-120,00	0,00	3,02	0,00	61,57	0,00	178,40
650	C	2567,54	120,00	0,00	33,66	0,00	83,18	0,00	-149,51
632	A	2469,78	-2,25	0,41	80,00	0,34	-112,13	0,16	-105,89
632	B	2511,42	-121,42	0,44	-173,41	0,36	-5,50	0,17	0,89
632	C	2459,64	117,89	0,47	-41,97	0,38	125,87	0,18	132,17
633	A	2469,83	-2,26	0,55	75,84	0,45	-115,23	0,21	-108,50
633	B	2511,47	-121,43	0,59	-172,90	0,48	-4,08	0,23	2,71
633	C	2459,64	117,88	0,61	-41,97	0,51	126,82	0,24	133,55
634	A	225,62	-2,27	0,06	75,73	0,05	-115,16	0,02	-108,34
634	B	229,42	-121,44	0,07	-171,35	0,05	-2,34	0,03	4,54
634	C	224,69	117,87	0,07	-42,48	0,06	126,50	0,03	133,31
645	A	-	-	-	-	-	-	-	-
645	B	2489,86	-121,60	0,44	-173,67	0,36	-5,78	0,17	0,61
645	C	2455,31	117,91	0,47	-42,04	0,39	125,80	0,18	132,10
646	A	-	-	-	-	-	-	-	-
646	B	2485,93	-121,67	0,44	-173,76	0,36	-5,87	0,17	0,51
646	C	2450,61	117,95	0,47	-42,14	0,39	125,69	0,18	131,99
671	A	2397,02	-5,05	0,40	75,89	0,33	-117,07	0,15	-111,30
671	B	2534,28	-122,00	0,44	-175,63	0,35	-8,11	0,16	-1,92
671	C	2357,99	115,86	0,46	-46,68	0,37	120,66	0,18	126,73
675	A	2381,56	-5,29	0,40	75,53	0,33	-117,53	0,15	-111,85
675	B	2540,03	-122,18	0,44	-175,81	0,35	-8,35	0,16	-2,20
675	C	2353,38	115,88	0,45	-46,90	0,37	120,38	0,18	126,40
680	A	2396,99	-5,05	0,40	75,89	0,33	-117,07	0,15	-111,30
680	B	2534,28	-122,00	0,44	-175,63	0,35	-8,11	0,16	-1,92
680	C	2358,00	115,86	0,46	-46,68	0,37	120,66	0,18	126,72
684	A	2392,19	-5,07	0,40	75,88	0,33	-117,07	0,15	-111,29
684	B	-	-	-	-	-	-	-	-
684	C	2352,99	115,76	0,45	-46,94	0,37	120,32	0,18	126,34
611	A	-	-	-	-	-	-	-	-
611	B	-	-	-	-	-	-	-	-
611	C	2348,02	115,61	0,45	-47,17	0,37	120,02	0,18	125,98
652	A	2377,72	-5,03	0,40	75,85	0,33	-117,12	0,15	-111,34
652	B	-	-	-	-	-	-	-	-
652	C	-	-	-	-	-	-	-	-

A Fig. 13 representa a distorção harmônica total para a tensão nas barras da rede.

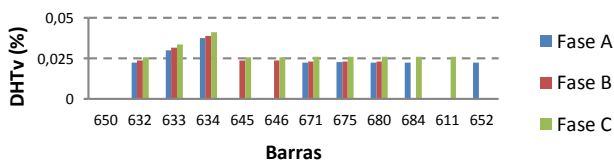


Fig. 13. DHT para as tensões nas barras devido as lâmpadas de LED's.

Nota-se através da DHTv que as barras mais afetadas compreendem as barras mais próximas da barra com a carga não linear (estando ou não dentro do tronco principal).

A Fig. 14 representa a distorção harmônica total para a corrente nos ramos da rede.

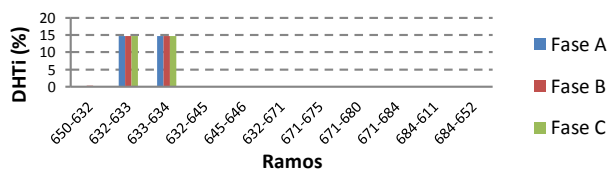


Fig. 14. DHT para as correntes nos ramos devido as lâmpadas de LED's.

Através da análise das distorções harmônicas para corrente verifica-se que os maiores níveis estão nos ramos dentro do tronco principal da rede devido ao comportamento das correntes harmônicas.

As magnitudes e ângulos das correntes nos ramos da rede estão dispostas na Tabela V.

TABELA V. CORRENTES NOS RAMOS DEVIDO AS LÂMPADAS DE LED.

DADOS			Freq. Fund.		3° h		5° h		7° h	
BI	BF	F	I (A)	θ (°)	I (A)	θ (°)	I (A)	θ (°)	I (A)	θ (°)
650	632	A	484,27	-26,84	0,648	-9,36	0,322	156,12	0,108	161,32
650	632	B	348,95	-137,12	0,631	111,55	0,312	-82,75	0,105	-77,37
650	632	C	529,35	96,52	0,642	-129,74	0,318	35,82	0,107	41,02
632	633	A	5,05	40,51	0,656	-5,21	0,328	160,83	0,111	166,39
632	633	B	4,96	-79,47	0,645	114,83	0,323	-79,13	0,109	-73,57
632	633	C	5,07	160,49	0,659	-125,26	0,330	40,78	0,112	46,34
633	634	A	55,27	40,51	7,185	-5,21	3,592	160,83	1,216	166,39
633	634	B	54,35	-79,47	7,066	114,83	3,533	-79,13	1,196	-73,57
633	634	C	55,50	160,49	7,215	-125,26	3,607	40,78	1,221	46,34
632	645	A	-	-	-	-	-	-	-	-
632	645	B	139,23	-142,69	0,011	150,53	0,006	-48,31	0,002	-46,07
632	645	C	61,62	58,50	0,005	-8,57	0,003	152,07	0,001	153,89
645	646	A	-	-	-	-	-	-	-	-
645	646	B	61,62	-121,50	0,005	171,43	0,003	-27,93	0,001	-26,11
645	646	C	61,62	58,50	0,005	-8,57	0,003	152,07	0,001	153,89
632	671	A	482,34	-27,40	0,048	73,09	0,027	-125,31	0,010	-121,57
632	671	B	207,94	-134,55	0,030	-168,06	0,018	-10,20	0,007	-7,83
632	671	C	479,75	100,51	0,050	-60,45	0,029	101,68	0,010	105,96
671	675	A	203,67	-4,51	0,020	75,76	0,013	-117,43	0,005	-111,79
671	675	B	69,78	-54,74	0,013	-154,20	0,009	2,09	0,003	4,14
671	675	C	123,52	111,94	0,014	-51,00	0,009	115,09	0,003	120,15
671	680	A	0,00	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
671	680	B	0,00	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
671	680	C	0,00	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
671	684	A	64,86	-38,92	0,005	26,52	0,003	-173,47	0,001	-171,98
671	684	B	-	-	-	-	-	-	-	-
671	684	C	72,70	120,85	0,008	-45,88	0,005	120,62	0,002	126,34
684	611	A	-	-	-	-	-	-	-	-
684	611	B	-	-	-	-	-	-	-	-
684	611	C	72,70	120,85	0,008	-45,88	0,005	120,62	0,002	126,34
684	652	A	64,86	-38,92	0,005	26,52	0,003	-173,47	0,001	-171,98
684	652	B	-	-	-	-	-	-	-	-
684	652	C	-	-	-	-	-	-	-	-

C. Comparações

Este tópico é destinado a comparação entre os efeitos dos harmônicos oriundos das LFCs e de LED sobre os ramos e os bancos de capacitores da rede de distribuição de energia elétrica.

A Fig. 15 representa as perdas nos ramos devido aos harmônicos das LFCs e de LED.

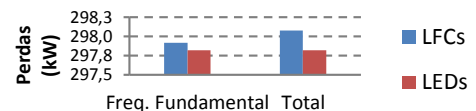


Fig. 15. Perdas nos ramos devidos as LFCs e de LED.

Notou-se que devido ao conteúdo harmônico das LFCs houve um aumento das perdas nos ramos de 0,053%; e para as lâmpadas de LED este aumento foi de 0,0003%

A Fig. 16 representa o comportamento das perdas harmônicas ramos devido ao funcionamento das LFCs.

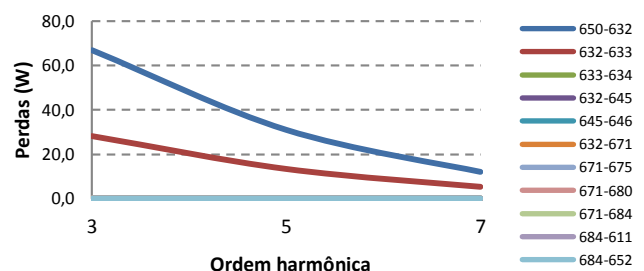


Fig. 16. Comportamento das perdas harmônicas nos ramos (LFCs).

A Fig. 17 representa as perdas harmônicas nos ramos devido ao funcionamento das lâmpadas de LED.

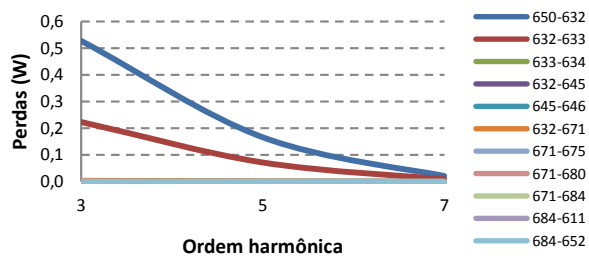


Fig. 17. Comportamento das perdas harmônicas nos ramos (LED).

É importante salientar que as curvas referentes aos outros ramos não aparecem neste gráfico devido ao seu baixo valor de perda e através da análise do seu comportamento verifica-se que elas seguem as características do conteúdo harmônico das cargas não lineares (LFCs e de LED), como pode ser verificado através da análise das Figuras 8, 9, 16 e 17. Notou-se também que as maiores perdas ocorrem nos ramos que formam o tronco principal da rede, ou seja, nos ramos entre as barras 650 e 632 e entre as barras 632 e 633 (devido ao comportamento das correntes harmônicas). As perdas no ramo entre as barras 633 e 634 não estão entre as maiores devido a este ramo possuir um transformador que tem baixa impedância.

As perdas totais nos bancos de capacitores da rede para as LFCs e de LED estão representadas pela Fig. 18.

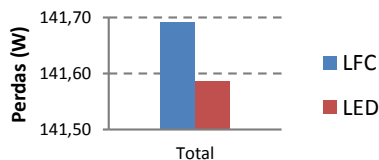


Fig. 18. Perdas nos bancos de capacitores (LFCs e de LEDs)

Como as perdas nos bancos de capacitores são proporcionais a ordem harmônica e a tensão elevada ao quadrado, verifica-se que as maiores perdas ocorrem devido a rede elétrica que apresenta as maiores tensões, que no caso compreende a rede com as LFCs como pode ser comprovada através da análise das Tabelas II e IV.

IV. OBSERVAÇÕES FINAIS

Através das simulações verifica-se que uma lâmpada fluorescente compacta ou de LED apesar de possuir características não lineares possuem baixa potência, o que não afeta de forma significativa a qualidade da energia elétrica (devido à baixa magnitude das correntes harmônicas). O problema se agrava quando um grande número de lâmpadas é utilizado no sistema elétrico [10]. Verificou-se, através dos níveis de distorção harmônica para a tensão que as barras mais afetadas são as barras vizinhas (estando ou não dentro do tronco principal da rede) e através das distorções harmônicas para a corrente que os ramos mais afetados são os que estão no tronco principal da rede.

Através do comportamento das correntes harmônicas e das impedâncias dos ramos pode-se explicar o fato das maiores perdas harmônicas ocorrerem nos ramos entre as barras 650 e 632 e entre as barras 632 e 633 (ramos dentro do tronco principal da rede).

Com os modelos e parâmetros utilizados para as lâmpadas (LFC e de LED), notou-se através das simulações que as distorções harmônicas para a tensão e corrente são maiores

para a rede com as LFCs do que com as lâmpadas de LED. As maiores perdas nos ramos e nos bancos de capacitores da rede foram encontradas com a utilização das LFCs (Fig. 15 e 18). Para uma comparação entre os efeitos dos harmônicos gerados pelas LFCs e de LED, verificou-se que as perdas harmônicas nos ramos da rede devido as lâmpadas de LED compreendem a 0,65 % das perdas harmônicas causadas pelas LFCs, de modo análogo, esta porcentagem compreende a 0,47 % para as perdas harmônicas nos bancos de capacitores.

V. REFERÊNCIAS

- [1] Arrilaga, J. and Watson, N. R. "Power System Harmonics". Second Edition, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2007.
- [2] Torres, I. S. M.; Sousa, F. P. F.; Ferreira, T. V.; Luciano, B. A. "Lâmpadas Fluorescentes e Distorção Harmônica: Eficiência Energética e Qualidade de Energia Elétrica". VII SBQEE, Agosto 2007.
- [3] Teixeira, M. D.; Paulillo, G.; Aoki, A. R.; Peniche, R. A.; Archanjo, D. L. "Análise do impacto de lâmpadas fluorescentes compactas na rede de distribuição da COPEL". VI SBQEE, Agosto 2005.
- [4] Gonos, I. F.; Kostic, M. B.; Topalis, F. V. "Harmonic distortion in electric power systems introduced by compact fluorescent lamps. International Conference on Electric Power Engineering, Budapest, pp. 295-300, 1999.
- [5] Teixeira, M. D.; Paulillo, G.; Aoki, A. R.; Archanjo, D. L. "Harmonic Distortions Produced by Compact Fluorescent Lamps in Distribution Networks" VI Induscon, Joinville – SC, 2004.
- [6] Z. Wei, N. R. Watson, L. P. Frater, "Modelling of Compact Fluorescent Lamp", Proc. ICHOP '08, pp. 1-6, 2008.
- [7] Rylander, M. and Grady, W. M. "Problems in the use of Norton equivalent models for single-phase nonlinear loads". Power and Energy Society General Meeting, pp.1-7, 25-29, July 2010.
- [8] Uddin, S., Shareef, H., Mohamed A., Hannan M. A.: „Harmonics and thermal characteristics of low wattage LED lamps". Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 88, No. 11a, pp. 266-271, 2012.
- [9] Martinsons C, Zong Y, Miller C, Ohno Y, Olive F, Picard N. Influence of current and voltage harmonic distortion on the power measurement of LED lamps and luminaires. CIE Publication x038:2013. Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light", Paris. Vienna: CIE, pp. 290-299, 2013.
- [10] Uddin, S.; Shareef, H.; Krause, O.; Mohamed, A.; Hannan, M. A.; Islam, N. N. "Impact of Large-Scale Installation of LED Lamps In a Distribution System". Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 23 Issue 6, p1769, December 2015.
- [11] Kersting, William H.. "Distribution system modeling and analysis". Florida: CRC Press, 2002. 314 p.
- [12] Testfeeders: <https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>. Janeiro 2017.
- [13] Vishay Roederstein, General Technical Information: Film Capacitors. <https://www.vishay.com/docs/26033/gentechinfofilm.pdf>
- [14] Solà, J. C. and Salichs, M. "Study and Characterization of Waveforms From Low-Watt (<25 W) Compact Fluorescent Lamps With Electronic Ballasts". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, n°4, October 2007.
- [15] Akila, A. A.; Youssef, K.; Yassin, I. "Harmonics Monitoring Survey on LED Lamps". Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RESDEV), vol. 3, march 2017.
- [16] Archundia-Aranda, I.; Mota-Palomino, R.O. "Harmonic load flow method for radial distribution networks". Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010.
- [17] Duque, M. B. "Fluxo de Carga Trifásico para Análise de Distorções Harmônicas em Redes de Distribuição de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2013.
- [18] Empalux: http://www.empalux.com.br/catalogo_empalux.pdf. Maio 2017.
- [19] Leão, R. P. S.; Sampaio, R. F.; Antunes, F. L. M. "Harmônicos em Sistemas Elétricos", Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.