

Estudos integrados de fluxo de carga e de penetração harmônica em sistemas elétricos com cargas não-lineares

José Wilson Resende - Jair Vieira Tavares Júnior

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Campus Santa Mônica, 38401-136 - Uberlândia (MG)
e-mail: jwresende@ufu.br

Resumo: Este artigo apresenta uma sistemática que visa integrar e manter inalteradas as características de operação de cargas elétricas não-lineares em estudos integrados, que envolvam as análises simultâneas de fluxo de carga e de penetração harmônica.

Palavras-chave: Fluxo de carga, penetração harmônica, modelagem.

Abstract: This paper presents an approach in which the data of non-linear loads are made compatible during interactive analysis of an ac system, as far as load flow and harmonic penetration studies are concerned.

Keywords: Load flow, harmonic penetration, modeling.

1. INTRODUÇÃO

Nos programas de fluxo de carga tradicionais, os consumidores, em geral, são identificados pelos valores das suas potências ativas e reativas. Para cargas lineares, a tarefa de se obter essas potências, visando um estudo de fluxo de carga, é relativamente fácil. O mesmo nem sempre ocorre para as cargas *não-lineares*, que podem estar definidas, inicialmente, por dados mais adequados a estudos de penetração harmônica. Por outro lado, os sistemas elétricos portadores de cargas elétricas do tipo não-lineares, podem requerer, além do estudo de fluxo de carga, aqueles de penetração harmônica. Nestas condições, essas cargas deverão ser modeladas de tal forma que haja *coerência* entre os dados do equipamento a 60 hz e aqueles dados relativos às frequências harmônicas.

Exemplificando, seja um sistema elétrico portador de um conversor AC/DC, do qual se conhece suas potências P_D e Q_D demandadas. Estes dois dados são imprescindíveis para que essa carga seja inserida em um estudo tradicional de fluxo de carga, a 60 hz. No entanto, estes dados são *inadequados e insuficientes* para que o conversor seja inserido em um estudo de penetração harmônica. Neste tipo de estudo, as potências P_D e Q_D devem ser *convertidas* em outras informações, tais como os valores dos ângulo de disparo dos tiristores, a corrente do lado dc, a tensão no barramento CA, etc. A obtenção destas variáveis faz-se necessária pois são elas que habilitam o cálculo do conteúdo harmônico dessa carga não-linear e não os valores de P_D e Q_D . Por outro lado, conforme será ilustrado neste artigo por um exemplo numérico, o oposto também pode ocorrer. Isto é, o conversor pode estar sendo originalmente identificado pelo ângulo de disparo dos tiristores, a

corrente do lado *dc*, etc., que são dados mais apropriados para estudos de penetração harmônica. Neste sentido, ao se desejar um estudo de fluxo de carga a 60 Hz do mesmo sistema, torna-se necessária a *conversão* destas variáveis em potências ativa (P_D) e reativa (Q_D).

Essas correspondências entre os dados deverá ser *específica* para cada *tipo* e *função* da carga não-linear.

Este trabalho propõe uma sistemática para promover a integração dos estudos de penetração harmônica e de fluxo de carga, de tal forma que os dados numéricos requeridos das cargas não-lineares, para ambos os estudos, sejam compatíveis. Tal proposta foi implementada em um programa computacional [1].

2. CÁLCULO INTEGRADO DE FLUXO DE CARGA E PENETRAÇÃO HARMÔNICA

Na formulação desses estudos integrados, as cargas do tipo *linear* não sofrem alterações. No entanto, para incluir as cargas *não-lineares* nessas análises, os seguintes passos deverão ser seguidos:

a) Além dos dados normais aos programas de fluxo de carga convencionais, deve-se incluir, na entrada de dados, os parâmetros específicos das diversas cargas não-lineares estudadas (tais como ângulos de disparo, indutâncias, etc.);

b) A partir desses dados e de tensões iniciais *estimadas*, são calculadas as potências ativa e reativa das cargas não-lineares, conforme será ilustrado na seção 3, para o RCT. A referência [1] apresenta modelagens adequadas para obtenção de potências ativas e reativas de conversores, fornos a arco e reator saturado. Observa-se que essa etapa pode significar um processo extremamente lento e

cansativo, se realizado de forma manual pelo usuário. No entanto, tal situação é muito comum nos programas de fluxo de carga convencionais, onde as potências P e Q das barras são dados de entrada e que devem ser fornecidos pelos usuários.

c) Em seguida, realiza-se o cálculo de fluxo de carga, obtendo-se *novos* valores de tensão em cada barra do sistema;

d) De posse dos novos valores de tensão, repetem-se os passos 'b' e 'c', até que as tensões, em cada barra, atinjam a convergência.

e) Se o objetivo do estudo fosse apenas a solução do sistema à frequência fundamental, os cálculos terminariam aqui.

f) Caso se deseje também o estudo de penetração harmônica, as tensões fundamentais assim obtidas, serão agora utilizadas como *um* dos dados de entrada para o cálculo das correntes harmônicas injetadas, pelas cargas não-lineares, no sistema em estudo. O fluxo harmônico será realizado através da equação (1) [3].

$$[I_h] = [Y_h] \cdot [V_h] \quad (1)$$

onde:

[I_h]: vetor de correntes harmônicas injetadas nas barras pelas cargas não-lineares;

[Y_h]: matriz admitância da rede para cada frequência harmônica;

[V_h]: vetor de tensões harmônicas nas barras.

Esse processo de solução pode ser resumido no fluxograma da figura 1.

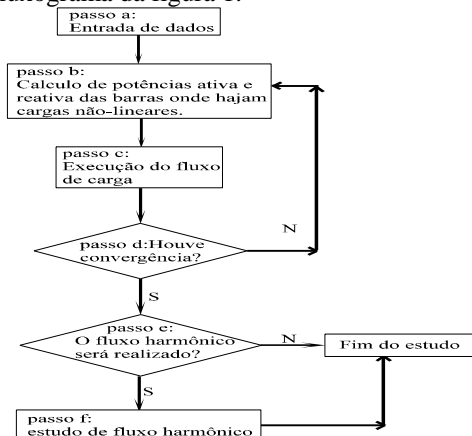


Figura 1 - Fluxograma para cálculo integrado de fluxo de carga e de penetração harmônica.

3. MODELAGEM DO RCT PARA ESTUDOS INTEGRADOS DE FLUXO DE CARGA E DE PENETRAÇÃO HARMÔNICA

Esse tipo de compensador de reativo está ilustrado na figura 2. Como se sabe, em geral, ele é utilizado para manter a tensão de um barramento, em um determinado valor U. Nesta hipótese, a barra

assim controlada seria do tipo PV. Eventualmente, o RCT também poderá operar a partir de um valor pré-estabelecido de reativo. Nessas condições, a sua barra seria do tipo PQ.

Os principais elementos de controle do RCT são os dois tiristores em anti-paralelo, por fase, os quais conduzem em alternados meio-ciclos da frequência. Se os tiristores são gatilhados no instante de máxima tensão fase-fase, o reator estará conduzindo plenamente. Nestas condições, a corrente no reator estará atrasada de 90° da tensão e a sua forma de onda será senoidal. Diz-se, então, que os tiristores têm um ângulo de disparo de 90° e a corrente no reator é máxima, com máxima susceptância, como pode ser visto na figura 3.

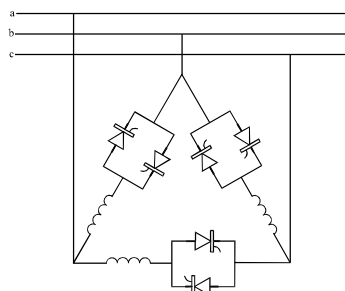


Figura 2- Representação trifásica simplificada de um RCT.

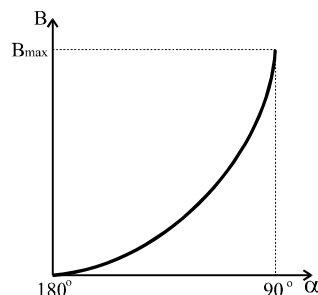


Figura 3 - Susceptância do RCT em função do ângulo de disparo

A corrente no reator diminuirá com o aumento do ângulo 'α', até alcançar valor nulo, quando tem-se ângulo de disparo de 180°.

3.1 - RCT operando para manter a tensão em um valor pré-definido (em barra do tipo PV):

Pela figura 4 pode-se observar que o ângulo de disparo do RCT determinará sua operação (90° ≤ α < 180°) ou não (α = 180°) para o controle da tensão da barra de interesse (normalmente aquela em que o mesmo está ligado). Nestas condições, essa barra será do tipo PV. Assim, para manter a tensão no valor U, o estudo de fluxo de carga determinará o valor do reativo Q, que o RCT deverá absorver.

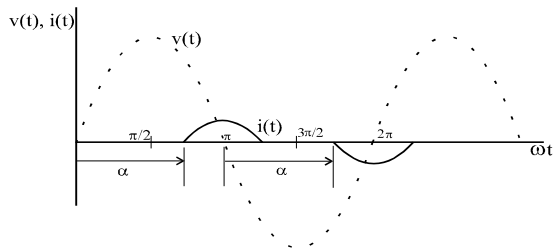


Figura 4 - Formas de onda de tensão e corrente de uma fase do RCT.

Por outro lado, para fins de estudo harmônico, será indispensável o conhecimento do ângulo de disparo ‘ α ’ correspondente ao reativo Q, necessário para manter a tensão no valor U pretendido. Essas informações podem ser associadas através da equação (2) [2].

$$\frac{Q_{\text{reator}}}{U^2} = \frac{(2p - 2a) - \text{sen}(2p - 2a)}{p \cdot X_L} \quad (2)$$

onde:

Q_{reator} : potência reativa absorvida pelo RCT;

U : valor da tensão no barramento a ser controlado pelo RCT;

α : ângulo de disparo do RCT, em radianos;

X_L :reatância de uma fase do RCT.

O valor do ângulo de disparo ‘ α ’ somente poderá se obtido após o estudo de fluxo de carga (que fornecerá Q_{reator}), quando então será a única incógnita na equação (2). Tal equação deverá ser resolvida para ‘ α ’, através de um método numérico.

Caso se adote o Método de Gauss para a solução de ‘ α ’, deve-se explicitar, na equação (2), o ângulo de disparo ‘ α ’, na forma $\alpha = f(\alpha)$. Obtém-se, assim:

$$a = p - \left[\frac{\frac{Q_{\text{reator}} \cdot p \cdot X_L}{U^2} + \text{sen}(2p - 2a)}{2} \right] \quad (3)$$

Este ângulo de disparo ‘ α ’, assim obtido, poderá agora ser utilizado para o estudo harmônico do RCT.

3.2 - RCT operando em uma barra do tipo PQ:

Caso o RCT fosse modelado, no estudo a 60 Hz, com um valor de reativo já conhecido, então sua barra seria do tipo PQ. Desta forma, o valor da sua tensão de operação (que é um dado importante para o estudo harmônico) somente seria conhecido ao final do estudo de fluxo de carga, ao contrário da situação anteriormente discutida, onde a tensão era especificada como um dado de entrada (para a barra PV). Também nesta hipótese, o ângulo de disparo ‘ α ’, necessário à manutenção da tensão no valor U, deverá ser obtido, conforme descrito no item 3.1 Em seguida, o estudo de penetração harmônica poderá ser iniciado.

Uma outra situação, ainda para barras ‘‘PQ’’, é aquela em que, ao invés de se conhecer diretamente o reativo Q do RCT, conhece-se o

ângulo ‘ α ’. Logo, caso se queira fazer o estudo de fluxo de carga para um sistema que possua um RCT assim definido, então o valor correspondente de potência reativa Q deverá ser obtido a partir do ângulo ‘ α ’. Neste caso, novamente é solucionada a equação (2), porém de uma forma mais simples que as anteriores, sem a necessidade de utilização de método numérico, já que a variável Q, uma vez explicitada, estará presente apenas no primeiro membro da equação (2).

Os demais procedimentos, para esta última hipótese de modelagem do RCT, dentro do estudo de fluxo de carga, seriam:

a) a potência reativa Q é calculada, inicialmente, para o valor ‘ α ’ determinado e para uma tensão inicial, normalmente, de 1,0 pu;

b) Realizado o estudo de fluxo de carga, calcula-se a diferença de tensão entre o valor atual e o valor anterior na barra PQ onde se localiza o RCT. Se esta diferença for superior à tolerância, novo valor de potência reativa é calculado pela equação. (2) (agora para o valor atual de tensão), sempre com o mesmo ângulo de disparo ‘ α ’. Ou seja, novo cálculo de fluxo de carga deverá ser realizado.

O exemplo numérico a seguir mostrado possui dois RCT’s definidos a partir do ângulo de disparo ‘ α ’.

4- APLICAÇÃO NUMÉRICA:

Um programa digital, denominado HARMFLOW, foi desenvolvido de acordo com a proposta deste trabalho. Neste programa foram implementadas, além das modelagens do RCT (mostradas no item 3), aquelas relativas aos conversores, fornos a arco e reatores saturados. Essa seção apresenta resultados obtidos através desse programa. Tais resultados são então comparados com outros, obtidos através de programas não-integrados de fluxo de carga convencional e de penetração harmônica.

Esses estudos foram realizados para o sistema elétrico ilustrado na figura 5, o qual possui, além de diversas cargas lineares, dois conversores e dois RCT’s como cargas não-lineares. Ressalte-se que, neste exemplo, os dados relativos aos RCT’s e conversores estão, a princípio, mais adequados a estudos de penetração harmônica. Isto é, suas cargas ativas e reativas, essenciais a estudos de fluxo de carga, não foram fornecidas diretamente.

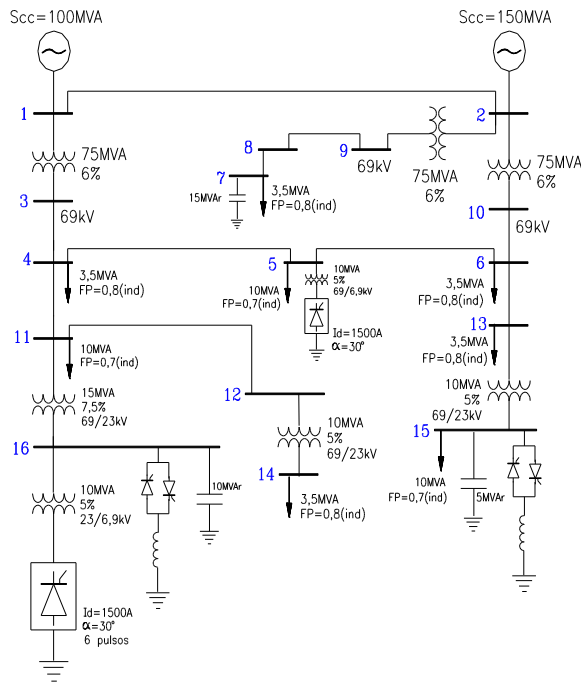


Figura 5 - Sistema elétrico estudado

A tabela 1 mostra os principais dados relativos aos RCT's.

Tabela 1 - Dados referentes ao RCT

Barra	Ângulo de disparo (graus)	Indutância do RCT a 60 hz (mH)	Resistência do RCT a 60 hz (ohms)	Desequilíbrio do ângulo de disparo (graus)
15	115,0	0,2727	0,0	0,0
16	100,0	0,2727	0,0	0,0

Os parâmetros relativos às linhas de transmissão do sistema, estão mostrados na tabela 2, em pu, na base de 100 MVA.

Tabela 2 - Parâmetros das linhas de transmissão

Barra emissora	Barra receptora	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância (pu)
3	4	0,0101	0,0712	0,0
4	5	0,0027	0,01062	0,0
4	11	0,0041	0,01731	0,0
5	6	0,0027	0,01082	0,0
8	7	0,0025	0,0101	0,0
8	9	0,0103	0,054	0,0
1	2	0,0081	0,059	0,0
10	6	0,0103	0,054	0,0
6	13	0,0041	0,01731	0,0
11	12	0,0027	0,01082	0,0

4.1- Análise para o estudo de fluxo de carga

Em termos de fluxo de carga, o sistema da figura 5 foi calculado através de um programa de fluxo de carga convencional e do programa HARMFLOW.

O fluxo de carga convencional foi realizado supondo-se, em todas as barras PQ, uma tensão inicial de 1,0 pu para o cálculo das potências de cargas não-lineares. A mesma consideração foi também assumida para o início do estudo, no programa HARMFLOW

Os dados iniciais relativos às barras, para os estudos de fluxo de carga, são mostrados na tabela 3.

As barras possuidoras de cargas não-lineares estão em destaque nesta tabela.

Tabela 3 - Dados iniciais de barras para o fluxo de carga (Potência base de 100 MVA)

B	T	Potência ativa de barra (MW)	Potência reativa de barra (MVar)	Módulo de tensão (pu)	Ângulo de tensão (graus)	Reativo mínimo (MVar)	Reativo máximo (MVar)
1	Ref.	0,0	0,0	1,0	0,0		
2	PV	0,0	0,0	1,0	0,0	-100,0	100,0
3	PQ	0,0	0,0	1,0	0,0		
4	PQ	-2,8	-2,1	1,0	0,0		
5	PQ	-18,59	-13,83	1,0	0,0		
6	PQ	-2,8	-2,1	1,0	0,0		
7	PQ	-2,8	-2,1	1,0	0,0		
8	PQ	0,0	0,0	1,0	0,0		
9	PQ	0,0	0,0	1,0	0,0		
10	PQ	0,0	0,0	1,0	0,0		
11	PQ	-7,0	-7,14	1,0	0,0		
12	PQ	0,0	0,0	1,0	0,0		
13	PQ	-2,8	-2,1	1,0	0,0		
14	PQ	-2,8	-2,1	1,0	0,0		
15	PQ	-7,0	-14,53	1,0	0,0		
16	PQ	-11,57	-18,72	1,0	0,0		

Outras observações sobre as simulações realizadas:

- As barras onde estão instalados os RCT's foram modeladas como barras PQ, com os mesmos possuindo um valor de ângulo de disparo **fixo** (que se enquadra em uma das três modelagens possíveis para o RCT-comentadas no item 3-). Recorde-se que, conforme já discutido na seção 3, uma barra portadora de um RCT também pode ser do tipo PV ou PQ com um valor de reativo *fixo* (ao invés do ângulo de disparo *fixo*, como neste caso).
- As barras 5 e 16 (locais dos conversores) também são modeladas como PQ. As potências ativas e reativas dos conversores deverão ser calculadas em função dos parâmetros fornecidos na figura 5 (de acordo com modelagem desenvolvida em [1]).

A tabela 4 mostra os resultados obtidos ao final do estudo de fluxo de carga, realizado pelos dois programas. Em barras onde existem apenas cargas lineares, as diferenças entre os resultados relativos a *tensões* foram pequenas, oscilando entre **0,2%** (nas barras 3 e 10) e **0,65%** (nas barras 11 e 12). Para barras onde estão localizadas cargas não-lineares (5, 15 e 16), a diferença de tensões é *mais significativa*, possuindo o seu valor máximo de **2,8%**, na barra 16.

Pode-se também observar *menores* perdas (tanto de potência ativa como reativa) nos cálculos obtidos no programa HARMFLOW em relação ao programa de fluxo de carga convencional.

Tabela 4 - Resultados obtidos com um programa de fluxo de carga convencional e o modelo proposto pelo HARMFLOW (Potência base= 100 MVA)

BARRA	TIPO	Potências de Barra				Módulo de Tensão (pu)		Ângulo de Tensão (°)		Perdas Ativas (MW)		Perdas Reativas (MVar)	
		Ativa (MW)		Reativa (MVar)		Conv.	Prop.	Conv.	Prop.	Conv.	Prop.	Conv.	Prop.
		v	.	v	.	v	.	v	.	v	.	v	.
1	Ref.	58,7	57,0	24,4	21,45	1,0	1,0	0,0	0,0				
2	PV	0,0	0,0	21,2	17,95	1,0	1,0	-0,93	-0,91				
3	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,978	0,98	-1,46	-1,42				
4	PQ	-2,8	-2,8	-2,1	-2,1	0,955	0,96	-2,68	-2,61				
5	PQ	-18,6	-18,1	13,8	-13,55	0,955	0,96	-2,73	-2,65				
6	PQ	-2,8	-2,8	-2,1	-2,1	0,957	0,961	-2,67	-2,6				
7	PQ	-2,8	-2,8	-2,1	-2,1	1,019	1,019	-1,26	-1,24				
8	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,017	1,017	-1,23	-1,2				
9	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	1,011	1,011	-1,07	-1,04				
10	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,976	0,978	-2,05	-1,99				
11	PQ	-7,0	-7,14	0,0	0,0	0,95	0,956	-2,86	-2,78				
12	PQ	0,0	0,0	0,0	0,0	0,95	0,956	-2,87	-2,8				
13	PQ	-2,8	-2,8	-2,1	-2,1	0,954	0,959	-	-2,67				
14	PQ	-2,8	-2,8	-2,1	-2,1	0,939	0,944	-	-3,68				
15	PQ	-7,0	-7,0	14,5	-13,22	0,894	0,907	-5,05	-4,94				
16	PQ	-11,6	-10,5	-18,7	-16,06	0,886	0,911	-6,75	-6,2				
										0,554	0,479	8,38	6,9
Observações: 1) "Conv." significa "programa convencional"; e 2) "Prop." significa "programa proposto"; HARMFLOW													

Quanto às potências de barra, na barra 5, a diferença entre os dois programas, para as respectivas potências ativa e reativa, é da ordem de 2%. Por outro lado, na barra 15, a diferença para as potências reativas é da ordem de 10% e, para a barra 16, a correspondente diferença é da ordem de 16,5%. Ainda na barra 16, o erro para a potência ativa está em torno de 10%. Na barra 15, não houveram diferenças entre as potências ativas calculadas pelos dois programas porque a única carga não-linear ali instalada é um RCT, que não absorve potência ativa.

5.2- Análise harmônica

Para a análise harmônica foram utilizados dois programas: o programa desenvolvido conforme a proposta deste trabalho (HARMFLOW) e o programa HARMOD [3].

Os resultados finais para as componentes harmônicas e fundamental das tensões, obtidos pelo programa HARMFLOW e HARMOD estão nas tabelas 5 (tensões fundamentais) e 6 (harmônicas). Pela tabela 5, observa-se que as diferenças obtidas para as tensões fundamentais entre os dois

programas são significativas. Em geral, elas são da ordem de 20 a 30%, alcançando um valor máximo de 63,22% na barra 16, que é a barra que apresenta o maior número de cargas não-lineares instaladas (um conversor e um RCT).

Tabela 5 - Valores de tensões fundamentais obtidas em todas as barras do sistema, utilizando-se os dois programas (Potência base de 100 MVA).

Barra	Valores de tensão (pu)	
	Fundamental	
	HARMOD	HARMFLOW
1	1,206	1,000
2	1,202	1,000
3	1,218	0,980
4	1,228	0,960
5	1,226	0,960
6	1,223	0,961
7	1,224	1,019
8	1,223	1,017
9	1,214	1,011
10	1,214	0,978
11	1,235	0,956
12	1,235	0,956
13	1,222	0,959
14	1,221	0,944
15	1,218	0,907
16	1,487	0,911

Na tabela 6 são apresentados os valores de componentes harmônicas de tensão (em cada barra), para as harmônicas de ordem 5, 7 e 11.

Nesta tabela nota-se que, em geral, as harmônicas resultantes da simulação realizada no HARMOD possuem maiores amplitudes em relação aos valores obtidos pelo modelo proposto. Essas diferenças entre os valores obtidos nos dois programas, variam de acordo com a ordem harmônica estudada e a barra do sistema. Por exemplo, na barra 16, a harmônica de sétima ordem apresentou a maior diferença (cerca de 20%), enquanto as outras harmônicas apresentaram diferença de valores variando de 5 a 15%. A barra 15, que possui um RCT, apresentou uma diferença de 10 a 15% em todas as ordens harmônicas.

Tabela 6 - Valores de tensões harmônicas obtidas em todas as barras do sistema (pu)

Barra	5ª Harmônica		7ª Harmônica		11ª Harmônica	
	HMOD	HFLOW	HMOD	HFLOW	HMOD	HFLOW
1	0,1098	0,0970	0,0017	0,0014	0,0045	0,0040
2	0,1320	0,1170	0,0009	0,0007	0,0037	0,0032
3	0,0908	0,0800	0,0033	0,0027	0,0061	0,0053
4	0,0760	0,0675	0,0047	0,0040	0,0074	0,0065
5	0,0793	0,0700	0,0027	0,0023	0,0084	0,0073
6	0,0842	0,0750	0,0024	0,0020	0,0078	0,0068
7	0,2756	0,2440	0,0044	0,0036	0,0022	0,0020
8	0,2653	0,2355	0,0041	0,0034	0,0018	0,0016
9	0,2107	0,1870	0,0024	0,0019	0,0005	0,0004
10	0,1026	0,0910	0,0017	0,0014	0,0062	0,0054
11	0,0700	0,0620	0,0083	0,0068	0,0062	0,0054
12	0,0700	0,0620	0,0083	0,0068	0,0062	0,0054
13	0,0878	0,0779	0,0021	0,0017	0,0074	0,0065
14	0,0681	0,0600	0,0080	0,0066	0,0060	0,0052
15	0,2050	0,1800	0,0072	0,0064	0,0043	0,0037
16	0,4823	0,4234	0,1090	0,0910	0,0300	0,0270

O cálculo das distorções harmônicas de tensão nas barras, realizado de acordo com a equação (4), mostrou os resultados ilustrados na tabela 7.

$$DHT_{(\%)} = \frac{\sqrt{\sum V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (4)$$

onde:

V_h : Valor da componente de tensão de ordem harmônica h;

V_1 : Valor da componente fundamental de tensão.

Tabela 7 - Valores de distorções harmônicas percentuais em todas as barras do sistema

Barra	Distorção de Tensão (%)	
	HARMOD	HARMFLOW
1	9,625	9,800
2	11,560	11,750
3	7,990	8,350
4	6,760	7,240
5	7,080	7,570
6	7,470	7,960
7	23,630	24,010
8	22,780	23,150
9	18,210	18,510
10	9,010	9,410
11	6,240	6,730
12	6,230	6,730
13	7,770	8,300
14	6,140	6,630
15	17,840	19,910
16	36,780	47,700

As distorções apresentaram diferenças menos significativas nas barras 1, 2, 7, 8 e 9, com valores em torno de **1,5 a 2%**. Foram verificadas diferenças consideráveis para as distorções harmônicas nas demais barras (da ordem de **5% a**

10%) e, em especial, na barra 16 (em torno de **30%**). Deve-se lembrar que, nesta barra, conforme mostrado na tabela 5, houve a maior diferença entre as tensões fundamentais obtidas pelos programas HARMOD e HARMFLOW (**63,22%**).

6- CONCLUSÕES

Em sistemas elétricos que possuam cargas não-lineares, os estudos de fluxo de carga e de penetração harmônica dever ser realizados de maneira integrada. Caso os cálculos sejam feitos de forma isolada, os resultados finais de cada um dos estudos, para o mesmo sistema, podem dar erros significativos. Conforme ilustrado no exemplo numérico, erros da ordem de 10 a 15% foram verificados para o estudo de fluxo de carga. Nos cálculos de penetração harmônica, erros maiores que 20% foram encontrados.

7- REFERÊNCIAS

- [1] Tavares Jr., J.V.; "Estudos interativos de fluxo de carga e de penetração harmônica em sistemas elétricos com cargas não-lineares"- Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia - Maio/1997.
- [2] Miller, T.J.; Oltrogge, A. R.; "Reactive power control in electric systems"; John Wiley & Sons Ltd., 1982, 381 p.
- [3] Oliveira, J.C., Resende, J.W., Massaud, A.E., Garcia, F. R.; "HARP O3 Modificado: uma nova alternativa para estudos de fluxo harmônico"; XI SNPTEE (GSI), Rio de Janeiro, outubro/1991.