

## 0.1 Problemas Causados por Cargas Não Lineares na Rede

Para entender os problemas causados por cargas não lineares conectados à rede, primeiro é necessário entender o funcionamento de sistemas elétricos reais. Os circuitos elétricos compostos por elementos ideais possuem um modelo matemático estabelecido e são fundamentais para descrever as características da resposta do circuito. Entretanto, esses elementos isolados não são factíveis devido a sua natureza ideal. Porém, para a metodização da análise dos circuitos elétricos reais através de modelos matemáticos, são concebíveis a representação do funcionamento destes por elementos ideais [1]. Existem modelos mais simplificados para análises mais abrangentes ao passo que existem modelos mais complexos para análises mais específicas. A escolha dessa complexidade depende do grau de destreza que o circuito real necessita ser representado para a análise.

Os modelos reais do sistema de geração e transmissão podem ser concebidos a partir da utilização de elementos ideais e a análise matemática é então obtida para descrever a resposta desse sistema. Para o estudo descrito nesse trabalho, a concepção dos circuitos pode ser realizada utilizando o teorema de Thevenin. Segundo este teorema, qualquer par de terminais contidos em um circuito realizado com elementos lineares podem ser substituídos por uma fonte de tensão  $V_{th}$  em série com uma impedância  $Z_{th}$  [2]. Isto é válido tanto para sistema monofásicos como para sistema multifásicos, levando em conta o estudo de cada fase em separado. Apesar do sistema de geração de uma aeronave ser complexa, para efeito didático e sem perda de generalidade, pode-se considerar que este sistema é tido por elementos lineares, assim, para esse estudo pode-se modelá-la como uma fonte de tensão senoidal acoplada a uma impedância. A interpretação dessa impedância cabe ao fato de que o gerador possui reatância indutiva em seus enrolamentos e resistências nos fios que o compõe. De forma análoga, a linha de transmissão a qual leva a energia do gerador para a carga pode ser modelada da mesma maneira. Por esta ser ausente de fonte de energia, seu equivalente Thevenin é tido apenas como uma impedância composta pelas reatâncias e as resistências da linha de transmissão. A figura 1a mostra o equivalente Thevenin de um gerador típico, enquanto que a figura 1b mostra o equivalente de uma linha de transmissão qualquer.

Com isso em mente, pode-se modelar um sistema composto por cargas acopladas a um barramento alimentado por um gerador e uma linha de transmissão. Considerando a figura 2, existe um barramento com ponto de conexão em comum (PCC) com  $N$  cargas acopladas cujas correntes demandadas são denominadas  $i_1, i_2, \dots, i_N$ . A tensão no PCC é dada por  $V_B$  e é essa a tensão de alimentação no ponto de conexão das cargas. Ainda, a conexão do barramento com gerador é feita via uma linha de transmissão, e, como explicado anteriormente, nesses elementos existem não idealidades como resistências e reatâncias indutivas. Aplicando o teorema de Thevenin para modelar o gerador e a linha

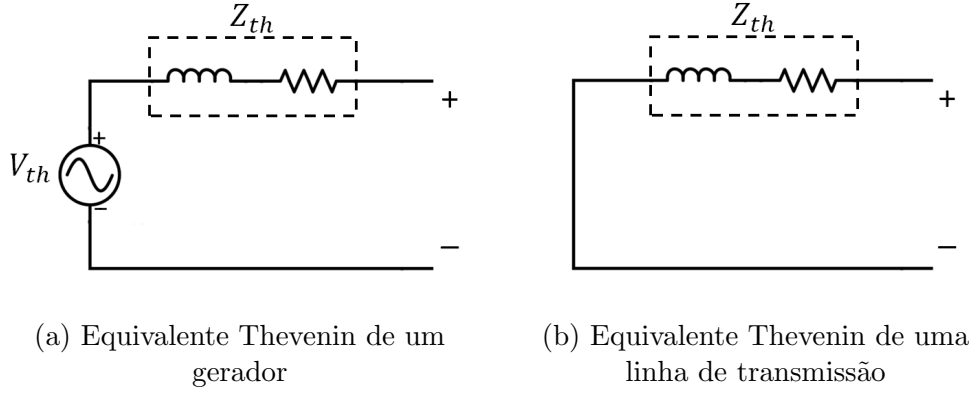


FIGURA 1 – Equivalentes Thevenin

de transmissão, tem-se que a impedância  $Z_{th}$  é composta pela composição das resistências e impedâncias de cada elemento. Para o gerador e linha de transmissão, as resistências e impedâncias são dadas por  $R_G$ ,  $L_G$  e  $R_L$ ,  $L_L$ , respectivamente. Já a fonte de alimentação  $V_S$  é considerada senoidal, como encontrada comumente em sistemas de geração AC

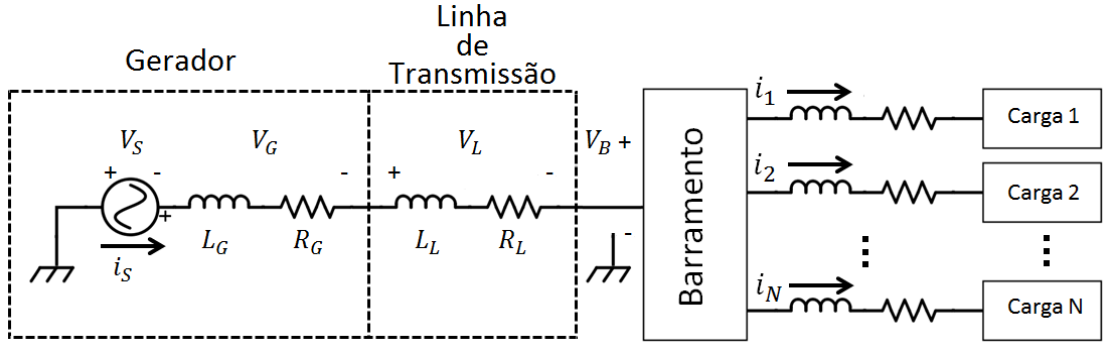


FIGURA 2 – Circuito real monofásico

Analisando o circuito da figura 2 e utilizando as leis de Kirchoff, tem-se que corrente provida pela fonte é dada segundo a equação 1.

$$i_S = i_1 + i_2 + \dots + i_N \quad (1)$$

Ainda de acordo com a lei de Ohm generalizada, as quedas de tensões nas impedâncias  $Z_G$  e  $Z_L$ , as quais advém da composição das reatâncias e resistências do gerador e da linha de transmissão são dadas por  $V_G$  e  $V_L$ , as quais são definidas segundo as equações 2 e 3.

$$V_G = Z_G \cdot i_S \quad (2)$$

$$V_L = Z_L \cdot i_S \quad (3)$$

Para definir-se o nível de tensão que é obtido no barramento no PCC, deve-se aplicar a lei de Kirchoff, a qual define-se  $V_B$  segundo a equação 4.

$$V_B = V_S - (V_G + V_L) = V_S - (Z_G + Z_L) \cdot i_S \quad (4)$$

Segundo a equação 4, o valor de tensão no barramento é dependente da corrente proveniente da fonte de tensão  $i_S$ , a qual, segundo a equação 1, é definida pela composição de correntes requeridas pelas cargas conectadas no PCC. Desse modo, pelo fato da existência das não idealidades intrínsecas dos elementos do circuito, há um vínculo entre a tensão disponível no barramento com as correntes exigida pelas cargas.

Para uma primeira análise, considerando as cargas 1, 2 , ...,  $N$  caracterizadas por elementos lineares, as quedas de tensões  $V_G$  e  $V_L$  são definidas por funções senoidais e o valor observado em  $V_B$  é tido como senoidal pura com certa atenuação e defasagem se comparada com a tensão  $V_S$ . Esse tipo de problema pode ser recorrente em alguns sistemas com altas cargas lineares conectadas, todavia este problema pode ser facilmente contornado aumentando o valor de  $V_S$  até que  $V_B$  atinja um valor especificado. Esse processo é comumente realizado de maneira automática pela introdução de uma malha de controle simples a qual controla o valor da tensão na saída do gerador de modo a suprir um nível de tensão específico no barramento. Agora, considerando as cargas ligadas ao barramento sendo não lineares, ou seja, que a forma da onda da corrente demandada não seja uma função linear senoidal com a mesma frequência que a tensão da fonte de alimentação, a composição das correntes demandantes de cada elemento gera uma corrente requerente da fonte de geração  $i_S$  cujo aspecto é também não linear. Isso cria um problema além, pois torna a tensão do barramento  $V_B$  com aspecto não senoidal em razão das quedas de tensão  $V_G$  e  $V_L$  não senoidais. Isto posto, são introduzidos na tensão do barramento a distorção harmônica, a qual é definida por componentes senoidais com a frequência igual a um múltiplo da frequência fundamental ( $f_0$ ) da forma de onda da tensão  $V_B$  [3]. Desse modo, há uma distorção na tensão do barramento cuja forma de onda não apresenta mais um formato senoidal, onde muitas vezes é requerida para alimentar determinadas cargas. A mitigação das distorções na forma de onda possui uma abordagem diferente se comparado com o caso em que cargas lineares são conectadas ao barramento, a qual dá-se utilizando filtros casados com as frequências harmônicas, por conversores com correção de fator de potência ou filtros ativos [4].

Para exemplificar o problema posto, considera-se um sistema como descrito pela figura 2, e que a composição das correntes das cargas necessita uma corrente do gerador  $i_S$  cuja forma é definida segundo a figura 3.

Segundo a lei de Ohm generalizada, as quedas de tensão nas reatâncias e resistências do gerador e da linha de transmissão são estabelecidas segundo as equações 2 e 3,

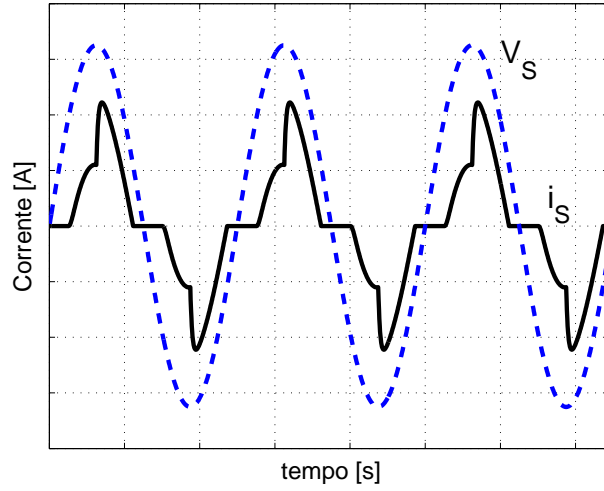
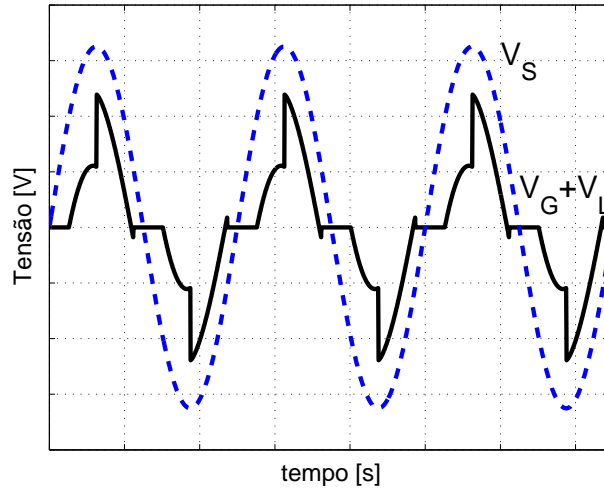


FIGURA 3 – Corrente do gerador para o barramento

e aplicando a corrente  $i_s$  da figura 3 tem-se que a forma de onda da tensão  $V_G + V_L$  é representada pela figura 4.

FIGURA 4 – Queda de tensão em  $V_G + V_L$ 

Como descrito anteriormente, a tensão no barramento pode ser sumarizada pela expressão 4 a qual é dependente dos valores encontrados na forma de onda definidas pela figura 4. Seguindo essas expressões, tem-se que a forma de onda encontrada no barramento, para este exemplo, é dada pela figura 5. Aqui pode-se claramente observar que a tensão no barramento é periódica não senoidal.

O aspecto senoidal na tensão do barramento é perdido mas o valor da frequência fundamental é mantido. Aplicando a série de Fourier em  $V_B$ , é observado o aparecimento das harmônicas nas frequências múltiplas de  $f_0$ . Para o exemplo descrito anteriormente, a série de Fourier de  $V_B$  é representada na figura 6.

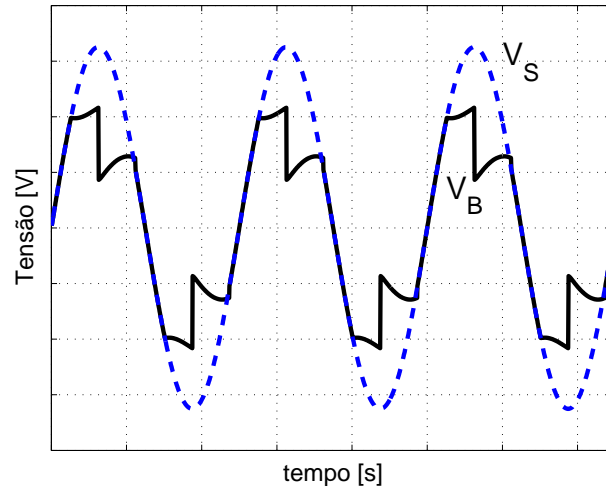


FIGURA 5 – Tensão  $V_B$  comparativamente à tensão  $V_S$

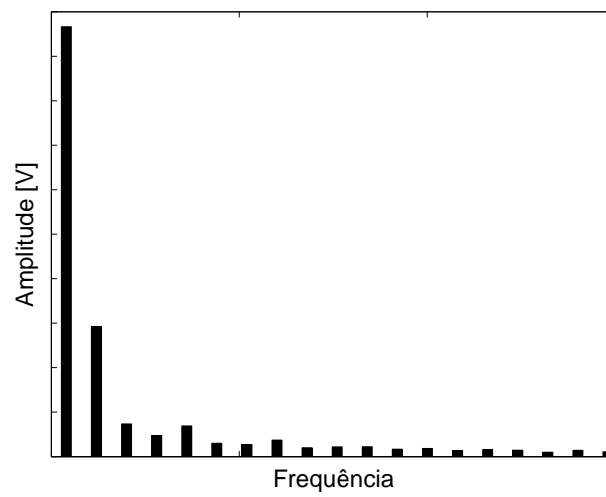


FIGURA 6 – Transformada de Fourier da tensão  $V_B$

Com o equacionamento e o exemplo descrito anteriormente fica claro que os efeitos de cargas não lineares possuem grande influência na qualidade de energia de um sistema elétrico. Entende-se que a qualidade de energia é degradada pela injeção de harmônicas nas tensões do sistema, visto que a presença de harmônicas distorce a forma de onda e as componentes de alta frequências podem trazer efeitos indesejáveis em equipamentos conectados na rede.

## Referências Bibliográficas

- [1] CIDADE, G. *Eletricidade e Eletrônica Aplicada a Biociências*. Disponível em: <<http://fisbio.biof.ufrj.br/restrito/bmb353/>>.
- [2] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentals of of Electric Circuits*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [3] DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. *Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica*. 2010. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>>.
- [4] KASSICK, E. V. *Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão*. Florianópolis, Abril 2010. Instituto de Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina.