

Ressonâncias Harmônicas em Redes de Distribuição de Baixa Tensão Modernas

Pedro Almeida*, Ricardo Torquato*,
Walmir Freitas*

* Departamento de Sistemas e Energia, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),
Campinas, Brasil, (e-mail: torquato@ieee.org)

Abstract: Modernization of low voltage (LV) distribution systems created the possibility of connecting new types of components to the systems. A possibility currently considered consists in installing shunt capacitor banks on LV systems for reactive power compensation. This paper presents an extensive study to characterize the potential harmonic resonances created by this connection, by studying 66.433 real LV systems. Results outline this capacitor connection creates a parallel and a series resonance. Both may occur between the 3rd and 15th harmonics, which matches the typical range of distortions injected by nonlinear loads connected to the LV system. Sensitivity studies are used to identify the impact of system parameters in the resonance frequency and damping. The study has also revealed that, in general, the parallel resonance has higher potential to create issues in the system than the series resonance.

Resumo: A modernização das redes de distribuição de baixa tensão (BT) criou a possibilidade de conexão de novos tipos de componentes nas mesmas. Uma possibilidade atualmente considerada é a conexão de bancos de capacitores para compensação de potência reativa. Este artigo apresenta um estudo extensivo de caracterização das potenciais ressonâncias harmônicas criadas por esta conexão, considerando 66.433 redes de BT reais. Os resultados mostram que a conexão deste capacitor cria uma ressonância paralela e uma série na rede. Ambas podem ocorrer entre a 3^a e 15^a harmônicas, coincidindo com a faixa de distorções tipicamente produzidas por cargas não lineares das redes de BT. Estudos de sensibilidade são utilizados para identificar o impacto de diferentes parâmetros da rede na frequência das ressonâncias e no seu amortecimento. O estudo também mostrou que, de forma geral, a ressonância paralela apresenta maior potencial de causar problemas que a ressonância série.

Keywords: Photovoltaic generation, low-voltage systems, harmonic resonance.

Palavras-chaves: Geração fotovoltaica, redes de baixa tensão, ressonância harmônica.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica modernos (Kazmi et al., 2017) apresentam uma estrutura ativa e supervisionada devido à introdução de geradores distribuídos, dispositivos de medição distribuídos, novos tipos de carga (e.g., veículos elétricos, eletrodomésticos mais eficientes) e novos componentes da rede elétrica (e.g., novas tecnologias de reguladores de tensão (ABB, 2019), (ITB, 2019) e equipamentos de compensação reativa conectados nas redes de baixa tensão (ENGO@ V10.4., 2019)). Se, por um lado, a modernização dos sistemas de distribuição de energia elétrica traz benefícios técnicos e ambientais, por outro lado, ela pode trazer impactos negativos para a qualidade da energia suprida ao consumidor. Um desses impactos negativos é o risco de ressonâncias harmônicas em redes de baixa tensão devido à conexão de bancos de capacitores em derivação nestas redes, para compensação de potência reativa.

Um dos efeitos das ressonâncias é amplificar as distorções harmônicas presentes na rede elétrica (Dugan et al., 2012) e, conseqüentemente, reduzir a vida útil dos componentes da rede (transformadores (Xu, Bagheri e Shaloudegi, 2019), cabos (Xu e Yong, 2016), bancos de capacitores (Tian, 2014) etc.). As ressonâncias também podem provocar instabilidade em dispositivos conectados via inversores tais como mini e

microgeradores fotovoltaicos (Li, 2018), (Song e Blaabjerg, 2017), (Wang, Blaabjerg e Wu, 2014). Entretanto, a ressonância é um fenômeno tradicionalmente estudado apenas nas redes de média tensão (Dugan et al., 2012). Com a conexão de bancos de capacitores também nas redes de baixa tensão, torna-se necessário identificar e analisar as características e efeito das ressonâncias neste nível de tensão.

Neste contexto, este artigo apresenta uma análise detalhada das ressonâncias em redes de distribuição de baixa tensão. Identifica-se o comportamento das ressonâncias em termos de qual o principal tipo de ressonância observado (série ou paralela), qual a faixa típica de frequências da ressonância e quais os valores típicos amortecimento que ela apresenta. Além disso, para garantir que os resultados obtidos de fato representem a realidade da concessionária, as características das ressonâncias são avaliadas em 66.433 redes de baixa tensão reais de uma concessionária da Região Sudeste. Os estudos são realizados no programa OpenDSS (Dugan, Montenegro e Ballanti, 2019), atualmente adotado pela ANEEL (PRODIST - Módulo 7, 2017) para o cálculo de perdas técnicas regulatório das concessionárias de distribuição brasileiras.

O artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve brevemente os dois tipos principais de ressonância que podem surgir nas redes de baixa tensão (BT) caso estes

capacitores sejam instalados. A Seção 3 apresenta uma análise detalhada do efeito dos parâmetros da rede nas ressonâncias. A Seção 4 apresenta um estudo extensivo do comportamento das características dessas ressonâncias em 66.433 redes de baixa tensão reais. Por fim, a Seção 5 apresenta as principais conclusões e os trabalhos futuros.

2 PRINCIPAIS RESSONÂNCIAS EM REDES DE BAIXA TENSÃO

O fenômeno de ressonâncias em redes de BT pode ser identificado na Fig. 1. O modelo é composto pelo equivalente de Thévenin para representar a média tensão (MT), um transformador abaixador, um banco de capacitor conectado na barra de BT e um segmento de linha conectando o transformador a uma barra trifásica (BC) com carga indutiva.

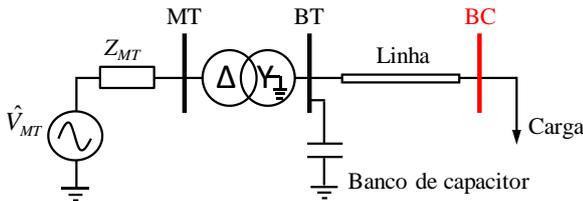


Fig. 1. Modelo de sequência positiva para a rede simplificada de BT.

Como a impedância equivalente da rede de média tensão é muito menor que a impedância do transformador, ela pode ser desprezada. Assim, pode-se escrever a seguinte equação para a impedância equivalente vista pela barra de carga (BC):

$$Z_{eq}^{-1} = \left(\frac{-jr_t + x_t}{r_t \omega C + j(x_t \omega C - 1)} + r_{linha} + jx_{linha} \right)^{-1} + \left(\frac{V_{carga}^2}{S_{carga}} \right)^{-1} \quad (1)$$

A parte real da impedância, que está relacionada ao amortecimento do sistema, é determinada por:

$$Re\{Z_{eq}\} = r_{linha} + \frac{r_t}{C^2 \omega^2 (r_t^2 + x_t^2) - 2C\omega x_t + 1} \quad (2)$$

em que Z_{eq} é a impedância equivalente vista pela barra de carga; r_t e x_t são a resistência e reatância do transformador, respectivamente; r_{linha} e x_{linha} são a resistência e reatância de sequência positiva da linha, respectivamente; S_{carga} e V_{carga} são a potência aparente (trifásica) e tensão de linha nominal na carga, respectivamente; ω e C são a frequência angular da rede e a capacitância equivalente do banco trifásico.

Para validar o modelo básico (1), a resposta em frequência que ele fornece é mostrada na Fig. 2, com a resposta em frequência detalhada, obtida com o programa OpenDSS.

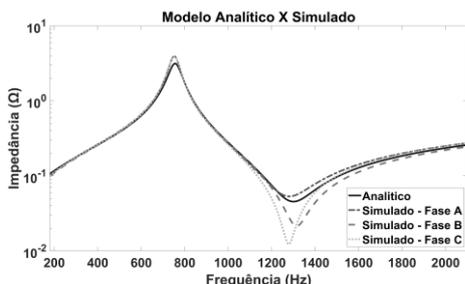


Fig. 2. Comparação entre modelo analítico e detalhado (simulado).

Nota-se que o modelo básico (analítico (1)) fornece uma boa aproximação da resposta da rede. As diferenças observadas

ocorrem pois o modelo básico despreza o acoplamento entre fases existentes na rede de distribuição trifásica e considera as linhas como se estivessem idealmente transpostas.

As frequências de ressonância paralela (impedância máxima) e série (impedância mínima) observadas na Fig. 2 podem ser estimadas de forma simplificada como segue:

$$f_{res_{paralela}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_t C}} \quad (3)$$

$$f_{res_{serie}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq} C}} \quad (4)$$

em que L_t , L_{linha} e L_{eq} representam a indutância do transformador, da linha e do equivalente resultante entre o paralelo de L_t e L_{linha} , respectivamente.

A equação (3) indica que a frequência da ressonância paralela vista de uma barra a certa distância do transformador depende apenas da reatância do transformador e da capacitância em derivação. A ressonância paralela, não depende dos parâmetros da linha e da carga. O valor da frequência de ressonância estimado por (3) é 756 Hz, muito próximo do valor real observado na Fig. 2, que é 750 Hz. Por outro lado, (4) mostra que a frequência de ressonância série depende, além do transformador e banco de capacitor, também da reatância da linha que separa a barra do transformador. O valor estimado por (4) é 1300 Hz, muito próximo do valor real observado na Fig. 2, que é 1305 Hz.

3 CARACTERIZAÇÃO DAS RESSONÂNCIAS

Esta seção apresenta uma análise detalhada de como os parâmetros das redes de BT afetam as características das ressonâncias harmônicas. As características avaliadas são a frequência de ressonância e a amplificação que a ressonância pode provocar em diferentes pontos da rede.

3.1 Rede Utilizada nos Estudos – Caso Base

Duas características importantes de uma ressonância são a frequência de ressonância e a magnitude da impedância equivalente nesta frequência, pois indica quanto um sinal de tensão ou corrente é amplificado nesta frequência. Esta seção apresenta estudos de sensibilidade para identificar o impacto de diferentes parâmetros da rede de BT na frequência de ressonância e na magnitude da impedância equivalente.

A rede de BT da Fig. 3 é utilizada nos estudos. Trata-se de uma rede real de uma concessionária da Região Sudeste. Ela é constituída pelo equivalente de Thévenin da rede de MT, um transformador abaixador, um banco trifásico de capacitor na barra secundária do transformador, além de diversos segmentos de linha trifásicos, bifásicos, e monofásicos para conexão dos consumidores. As características elétricas da rede são fornecidas na Tabela 1.

As características das ressonâncias vistas em cada barra da rede original são mostradas na Fig. 4. A frequência de ressonância série decresce com o aumento da distância ao transformador. A ressonância se encontra em torno da 17ª harmônica em regiões próximas ao transformador e decresce até a 9ª harmônica em pontos mais distantes. Essa relação inversa entre a ressonância série e a indutância das linhas

também pode ser visualizada em (3). A frequência da ressonância paralela (em torno da 7ª harmônica) varia pouco em função da distância, pois depende principalmente da indutância do transformador, e do capacitor. Ela apresenta desvio máximo de 5.0 Hz entre os extremos da rede.

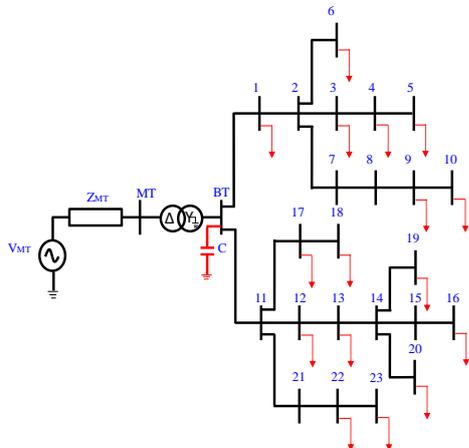


Fig. 3. Rede de distribuição teste de BT.

Tabela 1. Parâmetros elétricos do caso base da rede de BT.

| Parâmetro | Valor |
|----------------------------------|---------------|
| Nível de C.C Trifásico (MVA) | 152.0 |
| Tensão Primário/Secundário (kV) | 11.4 / 0.22 |
| Potência do Transformador (KVA) | 75.0 |
| Reatância do Transformador (%) | 3.15 |
| Resistência do Transformador (%) | 0.76 |
| Pot. Banco de Capacitor (kvar) | 45.0 |
| Pot. Média Total de Cargas (kW) | 15.0 |
| Fator de Potência das Cargas | 0.85 indutivo |
| Número de Consumidores | 57 |

Em relação à amplitude, no caso série a magnitude da impedância cresce linearmente com a distância. Ressonâncias em barras mais afastadas possuem amortecimento maior devido à resistência das linhas e às cargas. A impedância na ressonância paralela apresenta magnitude praticamente independente da distância, mostrando um comportamento dominado pelo transformador e capacitor.

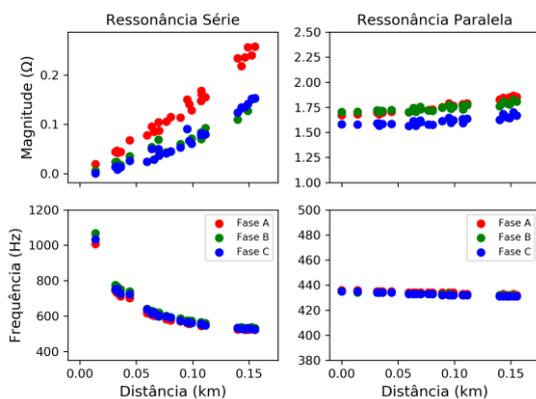


Fig. 4. Ressonâncias versus distância ao transformador - caso base.

3.2 Análises de Sensibilidade de Parâmetros

Esta seção apresenta estudos de sensibilidade realizados na rede de BT real. O objetivo é determinar como diferentes

fatores afetam as características das ressonâncias paralela e série. Para isso, cada parâmetro em estudo é variado, enquanto os demais são mantidos constantes. Em cada estudo, calcula-se a resposta em frequência a partir de todas as barras da rede, considerando frequências entre 60 Hz e 2500 Hz. Identifica-se então as frequências de ressonância paralela e série, e a magnitude da impedância equivalente nestas frequências.

Avalia-se apenas o resultado obtido para a fase A da rede. As características e tendências observadas são as mesmas nas outras fases. Apenas os resultados quantitativos podem ser distintos visto que os segmentos de linha secundários não são idealmente transpostos.

3.2.1 Reatância do Transformador

A indutância do transformador é significativa em relação às demais indutâncias da rede (e.g., indutância das linhas) e, portanto, tem impacto direto nas ressonâncias. A Fig. 5 mostra o comportamento das ressonâncias na fase A de todas as barras em função da distância ao transformador, variando-se a reatância de dispersão entre 1.5% e 6.0%.

De forma geral, o efeito da distância em relação ao transformador na frequência de ressonância e magnitude da impedância equivalente é o mesmo do caso base na Fig. 4. As características da ressonância paralela são praticamente constantes, pois dependem principalmente do capacitor e do transformador. As características da ressonância série são afetadas, pois dependem também da impedância das linhas.

Além disso, nota-se que o aumento da reatância de dispersão reduz a frequência de ressonância, tanto no caso da ressonância paralela quanto da ressonância série, o que está de acordo com o comportamento previsto nas expressões simplificadas (3) e (4). Por exemplo, no ponto mais distante do transformador, a frequência de ressonância paralela cai da 10ª para próxima da 5ª harmônica, enquanto a frequência de ressonância série cai da 11ª para a 7ª harmônica. Como distorções até a 15ª harmônica são relativamente comuns em redes de baixa tensão, tanto a ressonância paralela quanto a série podem ser excitadas em redes reais.

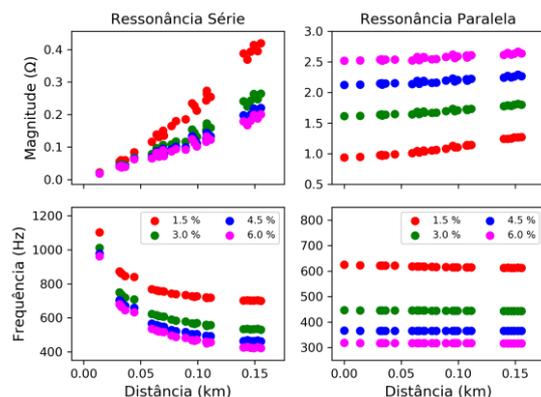


Fig. 5. Efeito da reatância de dispersão do transformador.

O amortecimento das ressonâncias diminui com o aumento da reatância do transformador, sendo que o maior efeito está na ressonância paralela. Este amortecimento pode ser avaliado a partir da magnitude da impedância equivalente na

frequência de ressonância. Na ressonância paralela, maior magnitude da impedância (*i.e.*, menor amortecimento) indica maior amplificação das distorções harmônicas de tensão. Na ressonância série, menor magnitude da impedância (*i.e.*, menor amortecimento) indica maior amplificação das distorções harmônicas de corrente. A Fig. 5 mostra que ao aumentar a reatância do transformador de 3.0% para 6.0%, a amplitude da impedância na ressonância paralela aumenta cerca de 50%. O efeito na ressonância série é menor.

Em resumo, transformadores com maior reatância de dispersão tendem a acentuar a severidade das ressonâncias.

3.2.2 Reatância do Capacitor

Neste caso, a potência trifásica do banco capacitivo é modificada em passos de 15 kvar entre 15 kvar e 60 kvar. Os resultados são mostrados na Fig. 6.

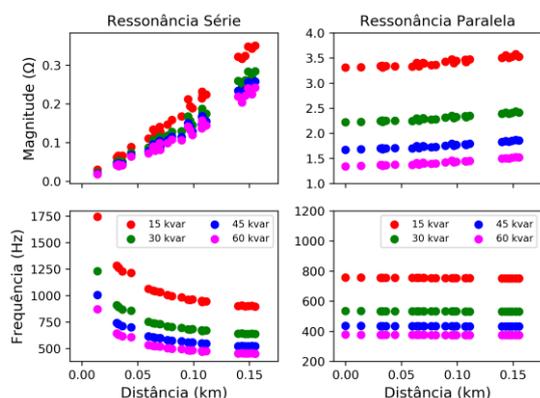


Fig. 6. Efeito da potência do banco de capacitores.

Variações na potência do capacitor possuem efeito similar ao da reatância do transformador. O incremento da potência do banco capacitivo resulta na diminuição das frequências de ressonância, o que está de acordo com (3) e (4).

Para o caso de ressonância paralela, a frequência apresenta variações desprezíveis entre barras, mas cai da 13ª para próximo da 7ª harmônica ao aumentar o banco de capacitor de 15 kvar para 60 kvar. Já no caso da ressonância série, a frequência de ressonância diminui ao se distanciar do transformador e aumentar a capacidade nominal do banco de capacitor. Por exemplo, no ponto mais distante do transformador, a frequência de ressonância série cai da 15ª para próxima da 7ª harmônica ao aumentar o banco de capacitor de 15 kvar para 60 kvar.

Distorções entre a 5ª e 15ª harmônicas são comuns em redes de baixa tensão reais e coincidem com as frequências das ressonâncias mostradas na Fig. 6. Portanto, tais ressonâncias podem, de fato, ser excitadas em redes reais e demandam estudos mais detalhados acerca de seus potenciais efeitos.

A Fig. 6 também sugere variações no amortecimento das ressonâncias em função da potência do banco. Este efeito é mais pronunciado na ressonância paralela, em que a magnitude da impedância cai para menos da metade (de 3.5 Ω para 1.5 Ω) quando o banco é modificado de 15 kvar para 60 kvar. Variações de magnitude no caso série também estão presentes, sendo mais notórias ao fim da rede, com

redução de cerca de 1/3 na magnitude quando comparados os casos de 15 e 60 kvar.

Em resumo, este estudo mostra que bancos de capacitores maiores tendem a acentuar a severidade das ressonâncias (ocorrem em frequências menores e, no caso das ressonâncias série, são menos amortecidas).

3.2.3 Variação de Cargas

Neste estudo, considerou-se que os consumidores possuem fator de potência constante e igual a 0.85 indutivo. Foram analisados três casos distintos: rede com carga nominal, sem carga e com cargas com fator de potência unitário. Os resultados são apresentados na Fig. 7.

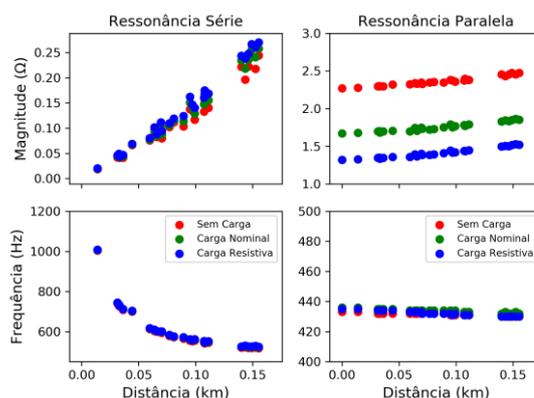


Fig. 7. Efeito das características das cargas.

As simulações sugerem que o efeito de alterações nas cargas é de modificar a amplitude das ressonâncias, tendo influência pouco significativa nas características de frequência. Não houve variações nas frequências de ressonância série e variações pouco significativas na paralela para os casos simulados.

O efeito das cargas consiste em, principalmente, amortecer as ressonâncias. Os resultados com maior amortecimento foram obtidos no estudo com cargas puramente resistivas. Nesse caso a impedância na frequência de ressonância paralela apresenta seu menor valor de magnitude (1.53 Ω) e a série o seu maior valor (0.27 Ω ao fim da rede).

Por outro lado, o estudo sem cargas apresentou os menores amortecimentos na ressonância como esperado. A magnitude da impedância nestes casos é em torno de 2.50 Ω e 0.24 Ω para ressonâncias paralela e série, respectivamente.

Em resumo, este estudo indica que as cargas impactam diretamente no amortecimento fornecido a rede na ressonância. Quanto mais cargas, maior o amortecimento.

3.2.4 Linhas de Distribuição

Esta seção avalia o impacto da impedância das linhas de BT nas características das ressonâncias. A Fig. 8 apresenta o impacto apenas da resistência das linhas, enquanto a Fig. 9 apresenta o impacto apenas da reatância das linhas.

Em ambos os casos, o efeito das linhas de distribuição na ressonância paralela é baixo (variação máxima de amplitude de 8% ao fim da rede). Isto foi visto na Seção 2, sendo que a ressonância paralela decorre da interação entre o banco de

capacitor e a indutância do transformador. Além disso, o amortecimento da ressonância está associado principalmente à resistência das cargas, ao invés da resistência das linhas.

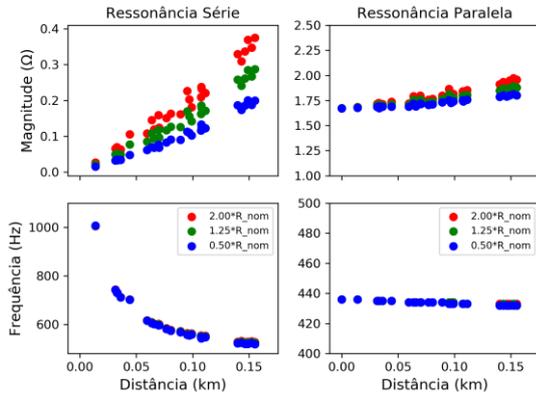


Fig. 8. Efeito da resistência das linhas de distribuição.

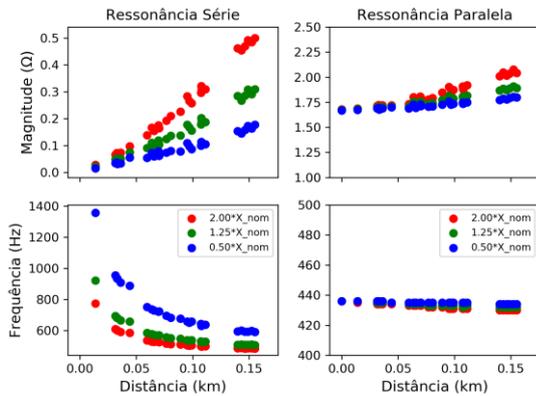


Fig. 9. Efeito da reatância das linhas de distribuição.

Por outro lado, a ressonância série é afetada pelas linhas, como já visto na Seção 2 e confirmado na Fig. 8 e Fig. 9. Quanto maior a resistência das linhas, maior a magnitude da impedância na ressonância. Ou seja, ressonâncias vistas de pontos mais distantes do transformador são mais amortecidas.

A indutância das linhas interfere tanto na frequência quanto no amortecimento da ressonância série. Quanto maior a indutância da linha, menor a frequência de ressonância (o que é uma característica indesejada pois a frequência se aproxima da faixa de distorções tipicamente presentes na rede) e maior o amortecimento (o que é uma característica positiva pois corresponde a ressonâncias menos severas).

Em resumo, a impedância das linhas afeta principalmente a ressonância série. Impedância maior leva a frequência de ressonância menor e mais amortecimento.

4 ANÁLISE EXTENSIVA EM REDES REAIS

Dados de 66.433 redes de BT reais de uma concessionária da Região Sudeste são utilizados para analisar se as conclusões obtidas na Seção 3 podem ser generalizadas. Os circuitos são simulados no programa OpenDSS, utilizando scripts em Python. No total, 2,4 milhões de consumidores são analisados com carga total de 860 MW. Nos estudos, conecta-se um banco de capacitor trifásico com potência nominal de 45 kvar no secundário de cada transformador de distribuição.

4.1 Análise da Ressonância Série

Inicialmente, a Fig. 10 mostra a distribuição de frequências da ressonância série para dois pontos da rede, um na barra mais próxima do transformador (início da rede) e outro na barra mais distante do transformador (fim da rede).

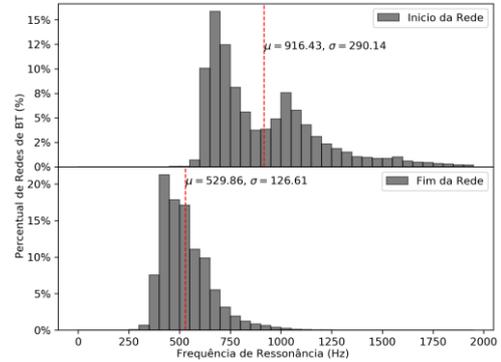


Fig. 10. Distribuição das frequências na ressonância série.

Para barras próximas ao transformador, as ressonâncias estão entre a 9ª e 21ª harmônicas em 90% das redes. A distribuição obtida é dispersa nesse intervalo, apresentando valor médio de 916.43 Hz e desvio padrão de 290.14 Hz (linha vermelha nas figuras). Já para barras localizadas ao final da rede, a distribuição de frequências é concentrada em torno da média (529.86 Hz). Isto confirma os estudos de sensibilidade, que mostraram que ressonâncias vistas no fim da rede apresentam frequências menores que em barras iniciais. Em 90% dos casos, os valores encontram-se entre a 6ª e 11ª harmônicas.

A magnitude da impedância nas ressonâncias é mostrada na Fig. 11. Nas proximidades do transformador as ressonâncias são pouco amortecidas, com valor médio 0.03 Ω. Este valor é quase dez vezes menor que o valor médio das barras mais distantes (0.21 Ω), o que também está de acordo com o observado nos estudos de sensibilidade.

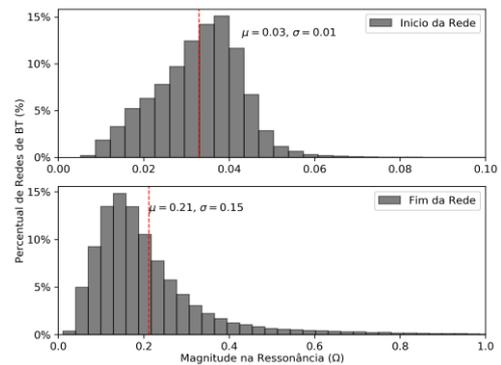


Fig. 11. Distribuição das magnitudes na ressonância série.

4.2 Análise da Ressonância Paralela

A distribuição de frequências de ressonância paralela é verificada no histograma da Fig. 12. Novamente, dois pontos de análise são investigados: no início da rede (parte superior da figura) e final da rede (parte inferior da figura).

Comparando os dois casos, é nítido que ambos apresentam resultados similares, confirmando o estudo de sensibilidade, em que se observou que as ressonâncias paralelas apresentam pouca variação de frequência em função da distância total. A

ressonância paralela está entre a 5ª e a 7ª harmônicas. As distribuições apresentam baixo desvio padrão (79 Hz).

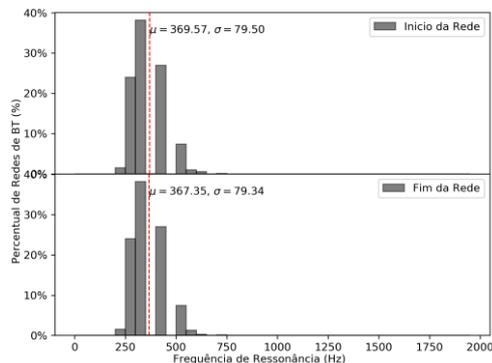


Fig. 12. Distribuição das frequências na ressonância paralela.

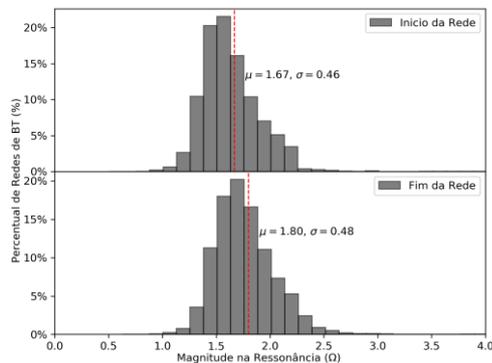


Fig. 13. Distribuição das magnitudes na ressonância paralela.

Os resultados de magnitude da impedância são exibidos na Fig. 13. Novamente, as distribuições para os dois casos são semelhantes e confirmam os resultados da Seção 3. O valor médio é em torno de 1.70 Ω e com desvio padrão de 0.46 Ω.

5 CONCLUSÕES

Esse artigo conduziu estudos em grande escala para analisar o impacto de capacitores instalados em redes de distribuição de baixa tensão do ponto de vista de ressonâncias harmônicas. Foram analisadas mais de 60.000 redes reais de baixa tensão (que atendem 2,4 milhões de consumidores). Os resultados mostraram que, o banco capacitivo pode introduzir novos pontos de ressonância do tipo série e paralela na rede. Estudos de sensibilidade indicaram que tais ressonâncias podem ocorrer entre a 5ª e a 15ª harmônicas, faixa que coincide com distorções existentes na BT. Além disso, a ressonância série surge da interação entre o capacitor, o transformador e as linhas de distribuição. Ao se afastar do transformador, a frequência de ressonância cai enquanto seu amortecimento aumenta devido ao efeito da impedância das linhas. Por outro lado, a ressonância paralela surge da interação apenas entre o capacitor e o transformador. Como ela não depende da impedância das linhas, suas características (frequência em que ocorre e amortecimento) são praticamente constantes ao longo da rede de BT.

Estudos futuros deste projeto consistirão em expandir as análises para considerar o efeito do desequilíbrio da rede de BT nas características das ressonâncias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processos nº 2018/24018-0, 2016/08645-9, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo 88887.341882/2019-00, e da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL Energia), processo PD-00063-3012/2014.

REFERÊNCIAS

- ABB (2019). *Line voltage regulator ABB*. [online] <https://new.abb.com/products/transformers/dry-type/line-voltage-regulators/line-voltage-regulator-for-low-voltage-grids> [Acesso 5 Dez. 2019].
- Dugan, R., McGranaghan, M., Santoso, S. and Beaty, H. (2012). *Electrical power systems quality*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Dugan, R., Montenegro, D. and Ballanti, A. (2019). *The open distribution system simulator™ (OpenDSS)*. [ebook] EPRI. <https://www.epri.com/#/pages/sa/opendss?lang=en> [Acesso 5 Dez. 2019].
- ENGO® V10.4 Product Description. (2019). [ebook] Varentec. <http://varentec.com/products/engo-v10/> [Acesso 5 Dez. 2019].
- ITB (2019). *Compensadores dinâmicos de potência reativa ITB*. [online] <https://itb.ind.br/produtos/compensadores-dinamicos-de-potencia-reativa/> [Acesso 5 Dez. 2019].
- Kazmi, S., Shahzad, M., Khan, A. and Shin, D. (2017). Smart distribution networks: a review of modern distribution concepts from a planning perspective. *Energies*, 10(4), p.501.
- Li, C. (2018). Unstable operation of photovoltaic inverter from field experiences. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(2), pp.1013-1015.
- PRODIST - Modulo 7. (2017). 5th ed. [ebook] ANEEL. Disponível em: www.aneel.gov.br/modulo-7 [Acessado em 5 Dez. 2019].
- Song, Y. and Blaabjerg, F. (2017). Analysis of the behaviour of undamped and unstable high-frequency resonance in a DFIG System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(12), pp.9105-9116.
- Tian, Y. (2014). *An investigation of power quality issues associated with shunt capacitor applications*. Dissertação de mestrado. University of Alberta.
- Wang, X., Blaabjerg, F. and Wu, W. (2014). Modeling and analysis of harmonic stability in an AC Power-electronics-based power system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(12), pp.6421-6432.
- Xu, W., Bagheri, P. and Shaloudegi, K. (2018). New indices to evaluate the impact of harmonic currents on power transformers. In: *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. Ljubljana.
- Xu, W. and Yong, J. (2016). A method to estimate the impact of harmonic and unbalanced currents on the ampacity of concentric neutral cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 31(5), pp.1971-1979.