

ESTUDO SOBRE INDICADORES NUMÉRICOS DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA POR MEIO DE RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA

Marina Cividini*
Marconi Januário**
Kleyton Hoffmann***

Resumo

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a utilização de indicadores numéricos aplicados no diagnóstico de falhas de transformadores de potência a partir da análise de respostas em frequência. Neste estudo são utilizados quatro indicadores: Soma do Erro Quadrático (SEQ), Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL), Coeficiente de Correlação (CC) e Desvio de Espectro. Os cálculos dos indicadores são feitos em quatro bandas de frequência, entre o espectro que inicia em 100 Hz até 1 MHz. Para reproduzir respostas em frequência de impedância de transformadores, sadios e com falhas, foi utilizado um circuito elétrico equivalente. O circuito elétrico é constituído por conjuntos de células RLC, onde, alternadamente os valores de parâmetros são modificados e são obtidas diversas respostas em frequência de impedância. Através de valores das respostas em frequências das impedâncias, são calculados os indicadores para as quatro bandas de frequência do espectro em estudo. Os resultados dos indicadores para cada banda de frequência são apresentados.

Palavras-chave: Análise de Respostas em Frequência. FRA. Transformadores de potência.

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores são dispositivos que tornam a transmissão de energia elétrica dentro de sistemas de potência economicamente viável. Todavia, esses dispositivos estão sujeitos a falhas oriundas, por exemplo, de curtos-circuitos entre espiras. As falhas podem alterar as características construtivas dos transformadores e, assim, a sua funcionalidade (PAULINO; CASAGRANDA, 2013; TORRES, 2006a).

A análise de respostas em frequência na determinação de falhas é um procedimento que auxilia os construtores, concessionárias e demais usuários de transformadores na manutenção, bem como na análise construtiva desses equipamentos. A análise de falhas em respostas em frequência pode ser realizada a partir de respostas em frequência de impedância e de relações de tensão de terminais. Em geral, são utilizadas respostas frequências originais (antigas), as quais são comparadas com respostas em frequências medidas, por exemplo, após um sinistro com o equipamento. Conforme a variação entre as respostas antigas e as atuais podem ser determinadas partes construtivas dos equipamentos que estão susceptíveis a alguma falha (enrolamentos, núcleo, etc.). Ainda, na determinação de falhas podem ser utilizados indicadores numéricos, os quais auxiliam de maneira mais precisa a determinação de falhas. Além disso, podem ser utilizadas técnicas de inteligência artificial na identificação de falhas (PAULINO, CASAGRANDA, 2013; TORRES, 2006; COUTINHO, 2010; ISLAM; KHAN; HOQUE, 2011; RYDER, 2002).

Este artigo é dividido nas seguintes seções: primeiramente, tem-se uma revisão bibliográfica de trabalhos sobre indicadores numéricos aplicados em estudo de falhas de transformadores de potência a partir de respostas em frequência. Em seguida, quatro tipos de indicadores numéricos utilizados em análise de respostas em frequência e suas

* Graduanda em Engenharia Elétrica na Universidade do Oeste de Santa Catarina; Bolsista do PIBIC/Universidade do Oeste de Santa Catarina com financiamento do Governo do Estado de Santa Catarina por meio do Art. 170; macividini@gmail.com

** Professor do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Oeste de Santa Catarina; kleyton.hoffmann@unoesc.edu.br

*** Professor do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Oeste de Santa Catarina; marconi.januário@unoesc.edu.br

equações são apresentados. Para mostrar a aplicação dos indicadores numéricos, um circuito elétrico com três células RLC é utilizado para simular a resposta em frequência do terminal equivalente de um transformador e o espectro de frequência em estudo é dividido em quatro bandas de frequência (de 100 Hz até 1 MHz). Ainda, para representar falhas provenientes de transformadores, os valores dos parâmetros de cada célula RLC do circuito são modificados alternadamente por meio de fatores multiplicativos. Os resultados obtidos para cada tipo de indicador numérico, banda, variação de valores de células são apresentados por intermédio de dados em tabelas. Por fim, os resultados e as considerações finais são comentados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

A seguir são apresentados alguns trabalhos disponíveis na literatura que utilizam indicadores numéricos de identificação de falhas em transformadores de potência.

Segundo Ryder (2002) a análise da resposta em frequência é uma excelente ferramenta de diagnóstico e avaliação de resultados. No trabalho do autor são apresentados dois tipos de indicadores: o cálculo da correlação cruzada e o desvio de espectro. O mesmo autor afirma que o coeficiente de correlação pode indicar resultados falso negativo e que o desvio de espectro pode gerar análise de falhas falso positivo. No trabalho, o autor divide o espectro de estudo em bandas para facilitar a análise.

Nos trabalhos de Torres (2006) e de Torres e Rolim (2006) as análises de respostas em frequência de transformadores são feitas por meio do coeficiente de correlação, da soma absoluta do erro logarítmico e também mediante uma rede neural artificial.

Islam, Khan e Hoque (2011) utilizam o coeficiente de correlação cruzada na análise de deformações mecânicas de transformadores a partir de respostas em frequência.

Paulino e Casagrande (2013) apresentam diferentes técnicas de avaliação de transformadores utilizando a análise de resposta em frequência. Além disso, diferencia a análise de resposta em frequência por função de transferência e impedância terminal. Os autores expõem o cálculo do desvio entre funções de transferência, fator de correlação cruzada e o padrão chinês.

2.2 INDICADORES NUMÉRICOS

2.2.1 Soma do Erro Quadrático (SEQ)

A soma do erro quadrático é calculada pela Equação 1, em que x_i e y_i são os elementos da resposta em frequência a serem comparados, e N é a quantidade de dados amostrados (TORRES, 2006).

$$\delta_{SEQ}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \quad (1)$$

2.2.2 Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL)

Torres (2006) comenta que o indicador SAEL foi proposto primeiramente por Kim et al. Esse indicador auxilia na análise de resultados que estão apresentados na escala em decibel. O indicador é descrito pela Equação 2.

$$\delta SAEL(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} y_i - 20 \log_{10} x_i|}{N} \quad (2)$$

2.2.3 Coeficiente de Correlação (CC)

O Coeficiente de Correlação é dado pela Equação 3 (RYDER, 2002; TORRES, 2006).

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i^2}} \quad (3)$$

2.2.4 Desvio de Espectro

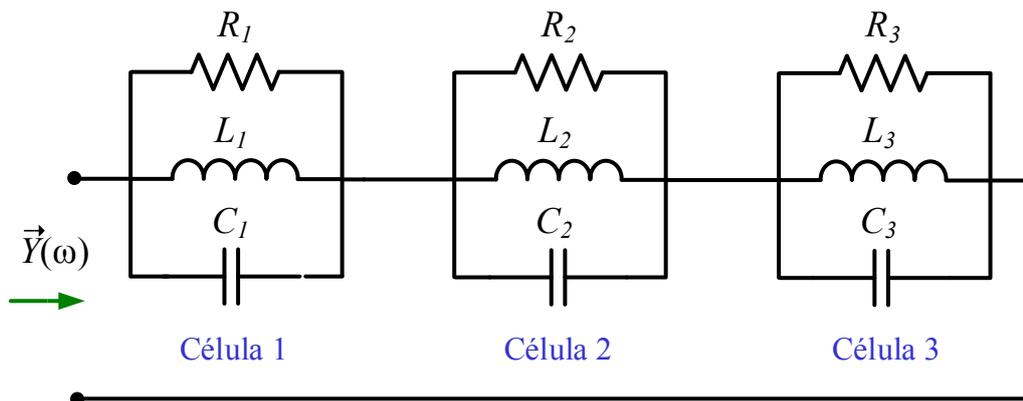
O desvio de espectro é calculado com a Equação 4 (MARTINS, 2007; RYDER, 2002).

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{x_i - \frac{x_i + y_i}{2}}{\frac{x_i + y_i}{2}} \right)^2 + \left(\frac{y_i - \frac{x_i + y_i}{2}}{\frac{x_i + y_i}{2}} \right)^2} \quad (4)$$

3 METODOLOGIA E RESULTADOS

A metodologia adotada neste trabalho consiste em apresentar o cálculo dos indicadores numéricos Soma do Erro Quadrático (SEQ), Soma Absoluta do Erro Logarítmico (SAEL), Coeficiente de Correlação (CC) e Desvio de Espectro. Para isso, são utilizadas respostas em frequência da admitância de um circuito elétrico fictício, onde em que são apresentados resultados dos cálculos ao longo de quatro bandas de frequências, sendo elas:: Banda 1, variando de 100 Hz à 1kHz; Banda 2, de 1 kHz à 10kHz; Banda 3, de 10 kHz à 100 kHz e Banda 4, de 100 kHz à 1 MHz. O circuito elétrico fictício é composto pelo conjunto de três células RLC, conforme o esboço do circuito apresentado no Esquema 1. Os valores dos parâmetros de cada célula RLC estão mostrados na Tabela 1. Nos cálculos dos indicadores, no SEQ foi utilizado o valor módulo da admitância e para os demais indicadores os valores em dB da admitância.

Esquema 1 – Esboço do circuito elétrico com as respectivas células RLC



Fonte: os autores.

Tabela 1 – Valores de parâmetros do circuito RLC utilizado nos cálculos dos indicadores

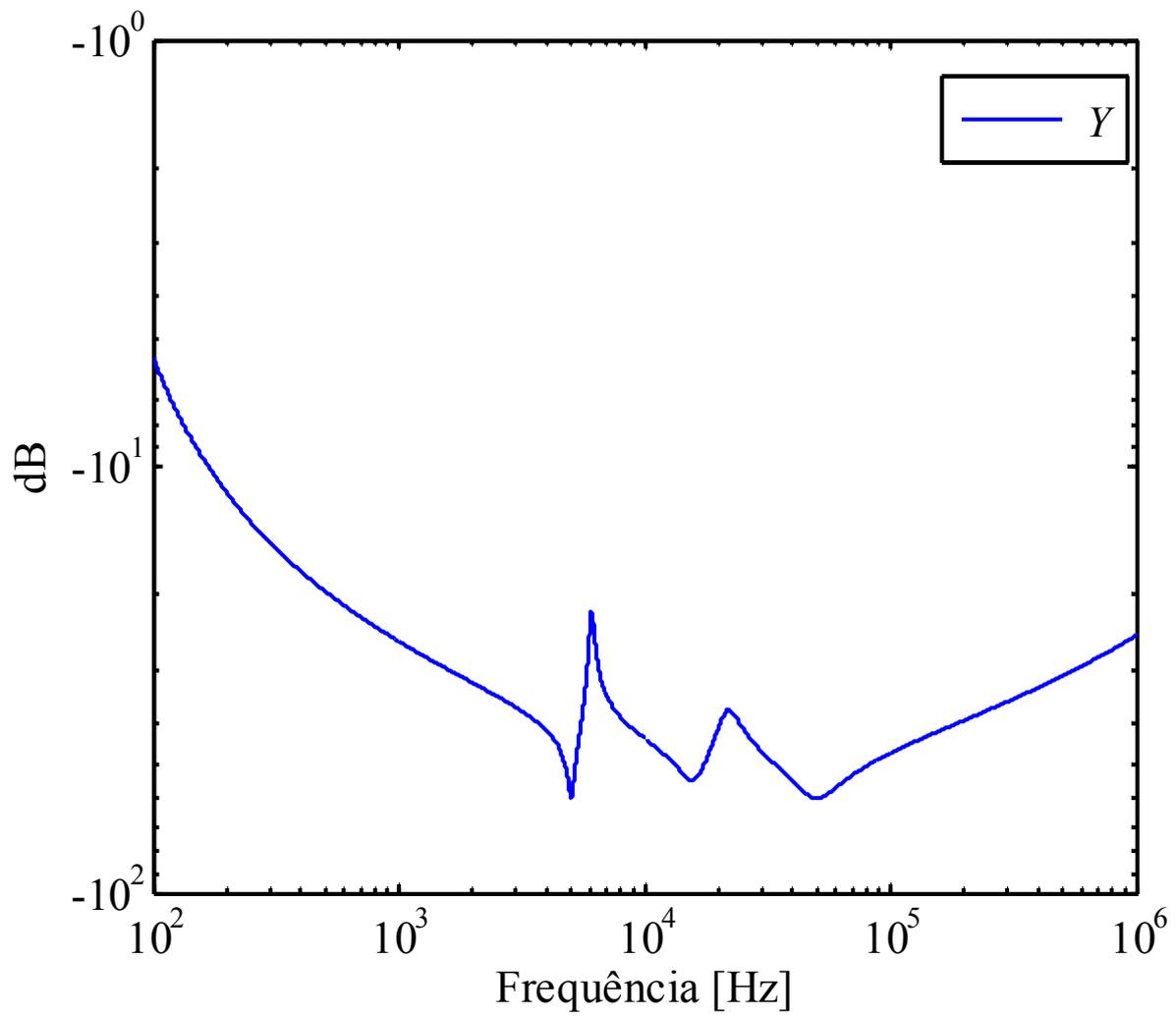
Parâmetros				
Célula	Resistência R [Ω]	Indutância L [mH]	Capacitância C [μF]	
1	1000	1	1	
2	500	1	0,1	
3	1000	1	0,01	

Fonte: os autores.

Com a finalidade de simular respostas em frequências com falhas para serem utilizadas nos cálculos dos indicadores, os valores dos parâmetros de cada célula foram multiplicados alternadamente por três valores fatores (0,9; 0,5; 0,1). Assim, sendo um conjunto de três células com três fatores diferente, tem-se a combinação de nove valores de parâmetros para o circuito RLC (Esquema 1). Isso resulta em nove respostas em frequências consideradas com falhas, as quais são diferentes da original obtida com os valores de parâmetros da Tabela 1.

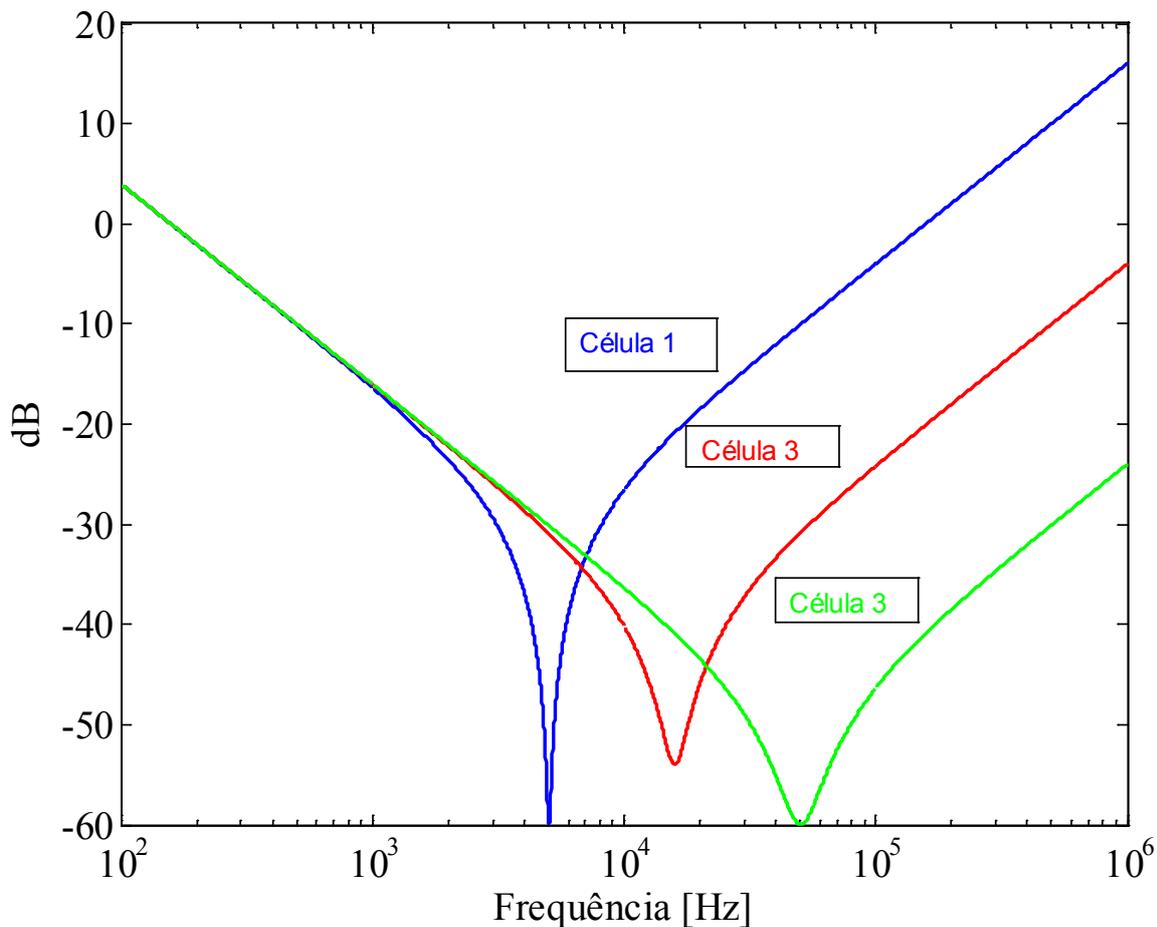
No Gráfico 1 é apresentada a curva da respostas em frequência da admitância original (em dB), a qual é obtida com os dados apresentados na Tabela 1. No Gráfico X estão ilustradas as respostas em frequência das admitâncias de cada célula RLC.

Gráfico 1 – Curva de resposta em frequência da admitância original



Fonte: os autores.

Gráfico 2 – Curvas de resposta em frequência das admitâncias de cada célula RLC



Fonte: os autores.

3 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE UM CIRCUITO COM VARIAÇÃO DE VALORES DE PARÂMETROS

3.1.1 ESTUDO COM FATOR 1

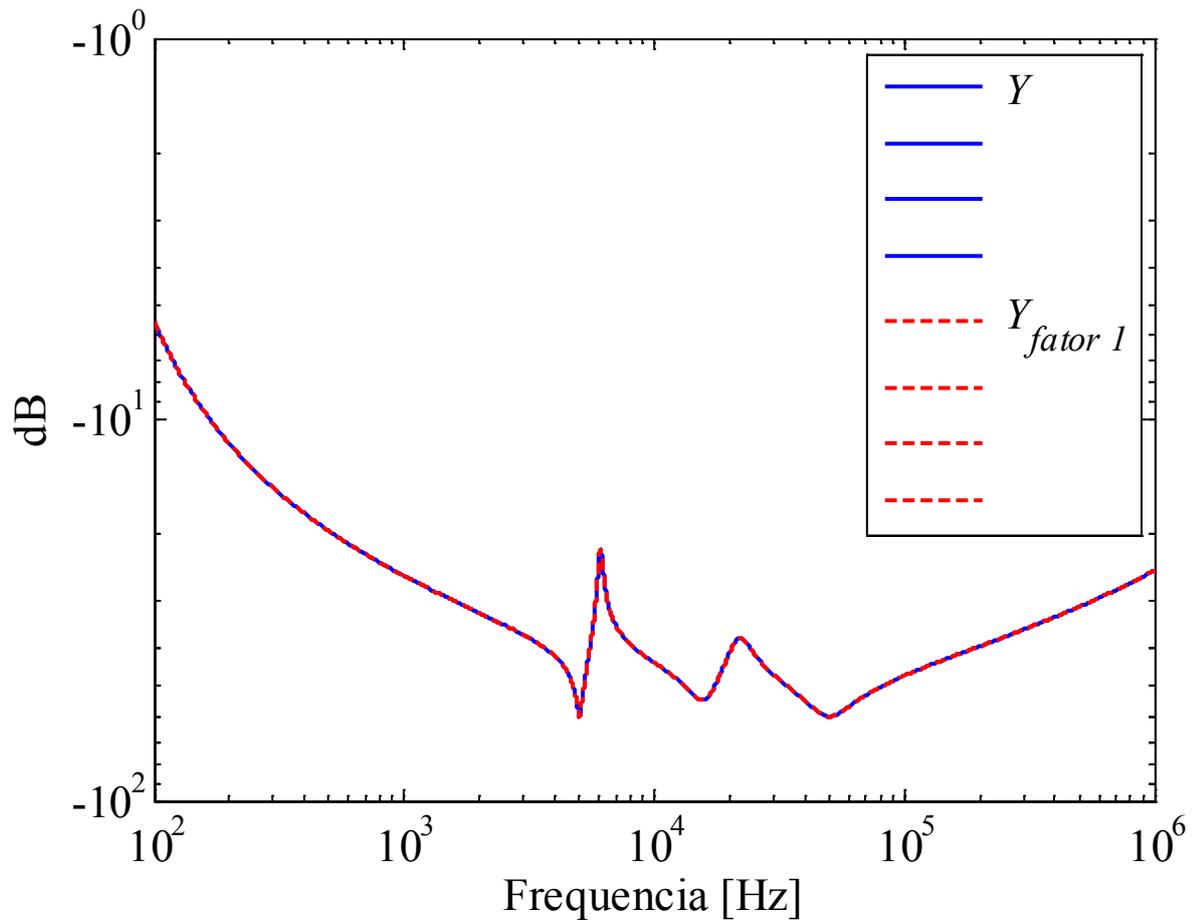
Como estudo inicial, são calculados os indicadores para a situação em que o fator multiplicativo de cada célula é igual a 1. Os resultados dos indicadores calculados são mostrados na Tabela 2, e as curvas de respostas em frequência da admitância original e com Fator 1 no Gráfico 2. Analisando os resultados mostrados na Tabela 2, percebe-se, que com exceção do CC, o qual possui valor igual a 1, os demais indicadores possuem valores iguais a zero.

Tabela 2 – Valores de indicadores obtidos com o Fator 1

Fator 1	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
SEQ	0	0	0	0
SAEL	0	0	0	0
CC	1	1	1	1
D. Espectro	0	0	0	0

Fonte: os autores.

Gráfico 3 – Curvas de respostas em frequência de admitâncias (dB)



Fonte: os autores.

3.1.2 Estudo com Fator 0,9, 0,5 e 0,1

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os quatro indicadores quando os fatores são multiplicados alternadamente nos valores de parâmetros de cada célula. Os resultados obtidos com fatores de 0,9, 0,5 e 0,1 são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Valores de indicadores obtidos com o Fator 0,9

		Fator 0,9			
		Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Célula 1	SEQ	7,2593E-05	1,3132E-04	1,6454E-09	6,6346E-10
	SAEL	3,0058E-01	2,6037E+00	3,0703E-02	8,2732E-03
	CC	9,9998E-01	9,8905E-01	1,0000E+00	1,0000E+00
	D. Espectro	1,6390E-02	4,7729E-02	4,8063E-04	1,7216E-04
Célula 2	SEQ	7,1915E-05	9,5395E-06	2,5763E-06	6,5632E-08
	SAEL	2,9420E-01	5,2025E-01	1,2840E+00	8,3844E-02
	CC	9,9998E-01	9,9986E-01	9,9899E-01	1,0000E+00
	D. Espectro	1,6165E-02	1,1233E-02	1,9653E-02	1,7373E-03
Célula 3	SEQ	7,1850E-05	3,9955E-06	1,2238E-06	5,8602E-06
	SAEL	2,9358E-01	3,6032E-01	1,5476E+00	9,3313E-01
	CC	9,9998E-01	9,9995E-01	9,9935E-01	1,0000E+00
	D. Espectro	1,6143E-02	7,9113E-03	2,2185E-02	1,8623E-02

Fonte: os autores.

Tabela 4 – Valores de indicadores obtidos com o Fator 0,5

		Fator 0,5			
		Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Célula 1	SEQ	2,4350E-03	1,7413E-04	9,5721E-07	5,2941E-08
	SAEL	1,6044E+00	5,1908E+00	6,2457E-01	7,4329E-02
	CC	9,9935E-01	9,8206E-01	9,9947E-01	1,0000E+00
	D. Espectro	9,3508E-02	9,7292E-02	9,6596E-03	1,5445E-03
Célula 2	SEQ	2,4181E-03	2,7165E-04	1,3998E-05	4,5980E-06
	SAEL	1,5807E+00	2,5242E+00	4,2247E+00	7,3985E-01
	CC	9,9932E-01	9,9663E-01	9,9351E-01	9,9999E-01
	D. Espectro	9,2610E-02	5,6591E-02	6,4417E-02	1,5131E-02
Célula 3	SEQ	2,4164E-03	1,1610E-04	7,3267E-05	1,5959E-04
	SAEL	1,5784E+00	1,9089E+00	7,0307E+00	6,4370E+00
	CC	9,9932E-01	9,9854E-01	9,8772E-01	9,9994E-01
	D. Espectro	9,2523E-02	4,2725E-02	1,0925E-01	1,1907E-01

Fonte: os autores.

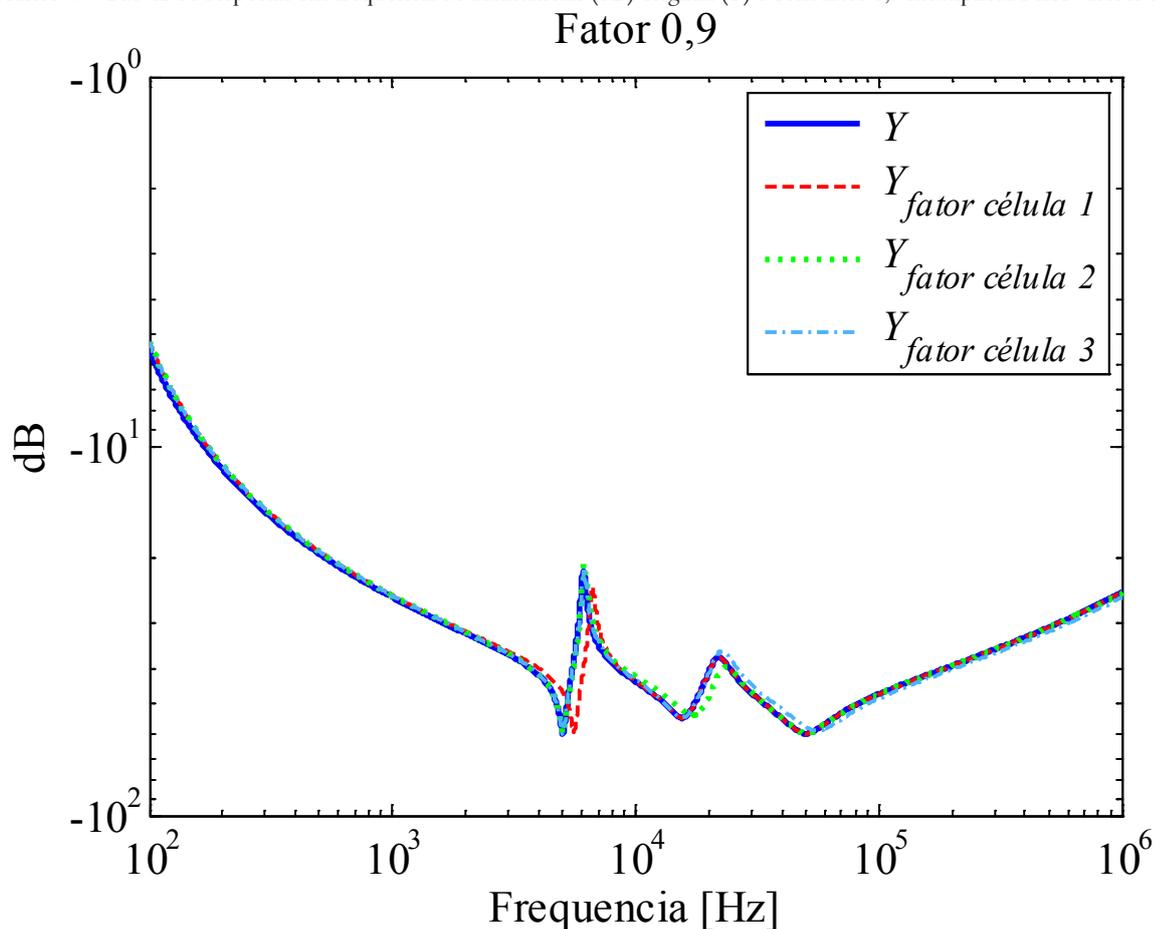
Tabela 5 – Valores de indicadores obtidos com o Fator 0,1

		Fator 0,1			
		Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4
Célula 1	SEQ	1,1156E-02	2,5731E-04	4,6863E-07	3,8182E-06
	SAEL	3,1219E+00	5,4206E+00	8,5726E-01	6,8428E-01
	CC	9,9694E-01	9,8447E-01	9,9994E-01	1,0000E+00
	D. Espectro	1,9816E-01	1,0989E-01	1,2549E-02	1,3951E-02
Célula 2	SEQ	1,1098E-02	1,0637E-03	2,5160E-05	1,0910E-04
	SAEL	3,0897E+00	4,5000E+00	4,2786E+00	2,8653E+00
	CC	9,9685E-01	9,8907E-01	9,9278E-01	9,9803E-01
	D. Espectro	1,9683E-01	1,0405E-01	6,8054E-02	6,0964E-02
Célula 3	SEQ	1,1092E-02	3,8694E-04	1,0572E-03	3,6740E-04
	SAEL	3,0866E+00	3,5989E+00	1,4856E+01	7,5278E+00
	CC	9,9684E-01	9,9484E-01	9,4407E-01	9,7522E-01
	D. Espectro	1,9670E-01	8,1818E-02	2,5607E-01	1,4810E-01

Fonte: os autores.

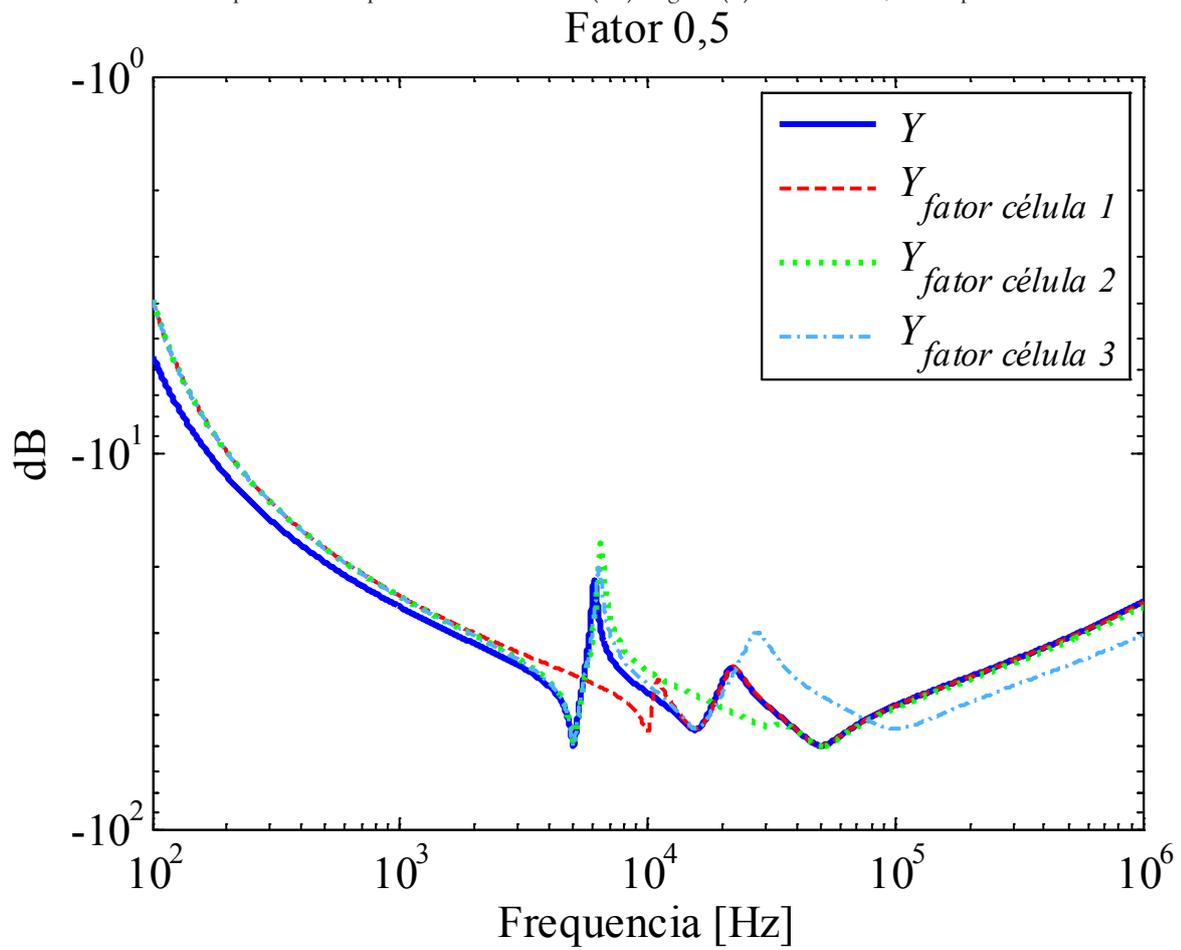
Nos Gráficos 3, 4 e 5 são apresentadas as curvas de respostas em frequências obtidas, respectivamente, com os fatores 0,9, 0,5 e 0,1 quando multiplicados alternadamente nos valores dos parâmetros das células. Nos Gráficos 3, 4 e 5 são também mostradas as curvas de respostas em frequências originais.

Gráfico 4 – Curvas de respostas em frequência de admitâncias (dB) original (Y) e com fator 0,9 multiplicado nos valores das células



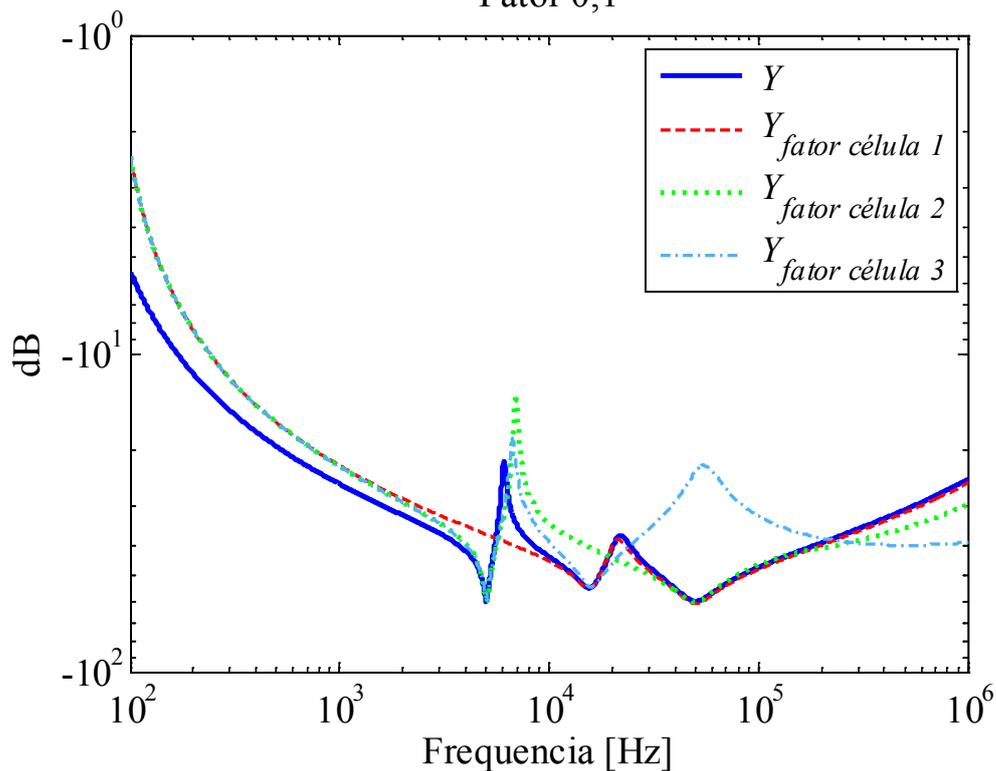
Fonte: os autores.

Gráfico 5 – Curvas de respostas em frequência de admitâncias (dB) original (Y) e com fator 0,5 multiplicado nos valores das células



Fonte: os autores.

Gráfico 6 – Curvas de respostas em frequência de admitâncias (dB) original (Y) e com fator 0,1 multiplicado nos valores das células



Fonte: os autores.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir da análise das curvas de respostas em frequência mostradas nos Gráficos 2 a 5, nota-se que a multiplicação de valores de parâmetros modifica a resposta em frequência em relação à resposta original. Ainda, quanto menor o valor do fator maior será a modificação da resposta obtida e com a multiplicação alternada nas células aumentam as diferenças entre as respostas em frequência ao longo do espectro em estudo.

Analisando os resultados dos indicadores nas Tabelas 3, 4 e 5 pode-se verificar variações entre os valores de curvas de respostas em frequência em uma determinada banda em relação a uma banda original. Como exemplo, são estudados os valores obtidos para o fator de 0,9 para a célula 1 (Tabela 3). Percebe-se que os valores de CC para a Banda 1 e para a Banda 2 são menores que 1, o que auxilia na indicação de que há diferenças entre os valores das admitâncias das respostas em frequência nas faixas de 100 Hz até 1 kHz (Gráfico 3). Aliados a esse indicador, notam-se que os indicadores SEQ, SAEL e Desvio de Espectro para a Banda 1 e Banda 2 possuem valores diferentes de zero e maiores que os valores obtidos nas demais bandas. Assim, percebe-se que caso estivesse sendo realizado um estudo com respostas em frequência de transformadores haveria o indício de problemas (falhas, problemas de montagem e construção diferente) em relação à curva de resposta em frequência atual e original.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre indicadores numéricos aplicados no diagnóstico de falhas de transformadores a partir da análise de respostas em frequência. Foi apresentado o equacionamento de quatro tipos de indicadores descritos na literatura. Para serem aplicados os indicadores, um circuito elétrico equivalente simulou as respostas em frequência de um transformador real. No circuito, os valores de parâmetros elétricos foram variados e diversas respostas em frequência foram obtidas. A partir das respostas em frequência foram calculados os valores de indicadores em quatro bandas de frequência diferentes.

Através dos valores de indicadores podem ser feitas as análises de variação entre as respostas em frequência (Tabela 1 a 4). Os indicadores proporcionam uma forma de interpretação melhor do que somente uma análise gráfica e contribuem em estudos de falhas a partir de respostas em frequência.

REFERÊNCIAS

- COUTINHO, L. M. A. **Modelagem de transformadores de potência utilizando técnicas no domínio da frequência**. 2010. 55 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2010093002.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2015
- ISLAM, A.; KHAN, S. I.; HOQUE, A. Detection of mechanical deformation in old aged power transformer using cross correlation co-efficient analysis method. **Energy and Power Engineering**, n. 3, p. 585-591, 2011.
- MARTINS, H. J. A. **Diagnóstico de transformadores de potência através de metodologias no domínio da frequência**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica)– Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- PAULINO, M. E. C.; CASAGRANDA, A. Análise da Resposta em Frequência e Impedância Terminal – Definições e Aplicações. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 22., 2013, Brasília. 2013. **Anais...** Brasília, 2013
- RYDER, S. A. Methods for comparing frequency response analysis measurements. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, Boston, 2002.
- TORRES, A. L. O. **Diagnóstico de Transformadores de Potência Através da Análise da Resposta em Frequência**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- TORRES, A. L. O.; ROLIM, J. G. Diagnóstico de Transformadores de Potência através da Análise da Resposta em Frequência (FRA). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 16., 2006, Salvador. **Anais...** Salvador, 2006.