

IMPACTO DAS OPERAÇÕES DE UM FORNO À ARCO DIRETO EM TRANSFORMADORES DE FORÇA – ESTUDO DE CASO

Vitor Correa Fernandes Alves, Wilson Silva Costa, Leandro Pereira Gama, Márcio Zamboti Fortes, Felipe Sass

RESUMO:

Com o objetivo de verificar a presença de distorções harmônicas na prática, os dados de qualidade de energia foram coletados com a ajuda de um analisador (RE8061), em um sistema de derretimento de vidro formado por um forno à arco direto e seu transformador a óleo bifásico (TR-B – 2MVA – 13,8 / 0,48 KV). Os resultados mostram a presença de harmônicos gerados a partir das operações do forno à arco direto nas 2 fases do transformador. Os harmônicos existentes no sistema nos alertam para possíveis impactos, apresentados neste artigo pelo estudo bibliográfico, como acréscimo da perda de potência, sobreaquecimento e redução da vida útil. Adicionalmente, um significativo desbalanceamento entre a fase A (THD de 2,729 %) e a fase B (THD de 49,288 %) foi identificado, possivelmente representando um desbalanceamento de fluxo.

PALAVRAS-CHAVE: Harmônicos, Transformador, Fator k, Forno, Arco.

INTRODUÇÃO

Para a utilização da energia elétrica, de forma simples e cotidiana, os consumidores em geral se abstraem do complexo sistema que viabiliza o fornecimento de energia elétrica, desde a produção, passando pela transmissão e chegando ao ponto de consumo através da distribuição de energia, a qual é realizada pelas empresas de distribuição regionais.

Variações da qualidade na energia fornecida através da rede de distribuição são cada vez mais perceptíveis. A demanda pela adoção de processos industriais mais preci-

-sos e eficazes, vem tornando comum os controles eletrônicos, com o conseqüente acréscimo de cargas não-lineares conectadas aos sistemas de alimentação de energia elétrica. As cargas não-lineares provocam distorções na forma de onda da corrente e da tensão, as quais podem ser transferidas da fonte geradora para a rede de distribuição, se não tratada adequadamente. Este efeito é conhecido como harmônicos e causam diversos problemas nos equipamentos e máquinas elétricas (TEIXEIRA, 2009). Para a devida padronização e fiscalização do setor, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL desenvolveu o Procedimento de Dis-

Vitor Correa Fernandes Alves, UFF, vitor.correa.alves@gmail.com;

Wilson Silva Costa, UFF, webcosta1@gmail.com;

Leandro Pereira Gama, UFF, lpgama@hotmail.com;

Márcio Zamboti Fortes, UFF, mzf@vm.uff.br;

Felipe Sass, UFF, felipesass@id.uff.br;

-tribuição de Energia Elétrica – PRODIST, o qual, em seu módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, estabelece os parâmetros e valores balizadores para a qualidade da energia distribuída (ANEEL, 2017).

Os diversos equipamentos elétricos instalados em uma planta industrial podem sofrer alterações em suas condições de operação em decorrência dos harmônicos gerados dentro da própria instalação. Perdas elétricas adicionais e superaquecimento são importantes impactos dos harmônicos em máquinas elétricas.

Especificamente para os transformadores: a saturação do núcleo, com alteração do seu ponto de operação; o aumento das perdas do núcleo; o aumento de temperatura no enrolamento, suportes, isolamento e óleo, causando superaquecimento; redução de eficiência e do fator de potência; depreciação e redução da vida útil são os principais efeitos dos harmônicos sobre esses equipamentos (MOSOUM e FUCHS, 2008; JAYASINGHE et al., 2013).

Em função das condições de operação durante a fase de fusão, que são especialmente severas, fornos a arco direto são grandes geradores de perturbações no nível de tensão, que são transmitidas para o sistema de alimentação (FILHO, 2011).

Adotando como estudo de caso uma fábrica de vidros real, a coleta de dados realizada neste trabalho teve como objetivo avaliar a presença dos harmônicos gerados pelo acionamento e operação de um forno a arco direto sobre o seu transformador. Este estudo não teve como pretensão a análise dos impactos da carga sobre a rede de distribuição, se limitando a analisar as alterações na qualidade da energia no barramento secundário do transformador.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como difundido na literatura acadêmica, uma das principais fontes geradoras de

harmônicos são os equipamentos a arco voltaico, tais como soldas elétricas e fornos elétricos a arco. Estas cargas tipicamente provocam flutuações de tensão de baixa frequência e a resultante cintilação luminosa. Estas flutuações de tensão podem causar lesões nos olhos humanos e também são conhecidas como flicker (JAYASINGHE et al., 2013; PAULILLO, 2018; FILHO, 2011). O efeito destes harmônicos nos transformadores serão discutidos nesta seção.

O forno a arco elétrico é formado por uma cuba revestida com material refratário, geralmente refrigerado a água, coberto com um teto retrátil, através do qual operam os eletrodos cilíndricos de grafite, com comprimento e diâmetro variáveis em função da capacidade do forno. Esses são montados verticalmente e ficam posicionados acima da carga de trabalho (vidro), mantendo-se a uma distância determinada. Essa distância é necessária para manter o comprimento de arco entre o eletrodo e a carga que resulte em um melhor controle de potência durante a operação. Geralmente são aplicados a fusão de sucatas metálicas, porém, neste estudo de caso, aplica-se a fusão de vidro. O equipamento aquece a carga por meio da abertura do arco elétrico. Os fornos a arco industriais variam em tamanho de acordo com sua capacidade de produção que pode estar entre 1 e 400 toneladas. A capacidade depende da aplicação do forno que pode ser encontrado principalmente em empresas siderúrgicas e de vidro.

A operação se inicia com a abertura do arco e pode ser dividida em dois ciclos de operação. O primeiro é chamado de fusão e se caracteriza pela intensa movimentação da massa sólida e por grande variação de corrente em função da instabilidade do arco. Ocorrem de 600 a 1.000 curtos-circuitos e o ciclo dura aproximadamente 50 minutos. O segundo ciclo, chamado de refino, caracteriza-se por uma maior estabilidade em função da condição líquida adquirida pela carga.

Com uma flutuação de tensão de menor intensidade este ciclo resulta em uma operação mais estável.

O forno elétrico a arco é uma carga de característica fortemente não-linear que provoca diversos impactos indesejáveis na rede de distribuição de energia elétrica. O desenvolvimento de modelos que caracterizem os diversos distúrbios provocados devido à implantação de fornos elétricos a arco é de interesse das concessionárias e indústrias que utilizam este tipo de equipamento. Diversos modelos foram propostos para representar o comportamento de tais fornos no intuito de contribuir para o desenvolvimento de sistemas que possam diminuir os problemas causados pelos harmônicos (FILHO, 2011; SOUSA, 2005).

Os harmônicos presentes na rede elétrica geram impactos nos transformadores que vão desde ruído audível até elevadas perdas nos enrolamentos, superaquecimento e diminuição da sua vida útil (BOLLEN, 2000).

As distorções na tensão aumentam as perdas no núcleo dos transformadores enquanto que os harmônicos de corrente aumentam as perdas nos enrolamentos (ELMOUDI et al., 2006). Quanto maior a frequência da corrente injetada no transformador, maiores serão a perda no seu núcleo e a temperatura nos seus enrolamentos, com a conseqüentemente diminuição da vida útil do transformador (IEEE, 1992). Para compensar esse efeito nos transformadores, é previsto um superdimensionamento do equipamento com impacto no custo de aquisição e posterior manutenção (TAHER et al., 2016).

A vida útil de um transformador depende em alto grau dos eventos extraordinários, tais como superaquecimento, devido a correntes de carga com componentes harmônicas, curtos-circuitos, etc., os quais provocam o aumento de (JAYASINGHE et al., 2003):

- Ruído
- Temperatura das várias partes do transfor-

mador.

- A concentração de umidade no isolamento e no óleo.
- A concentração de oxigênio e outros gases no isolamento e no óleo.
- Quantidade, tamanho e tipo de impureza e partículas.

Atualmente no meio residencial e principalmente nas indústrias, ocorreu um grande aumento do número de equipamentos eletrônicos como reatores, conversores eletrônicos, equipamentos de comunicação e outras cargas que utilizam chaves semicondutoras e, portanto, possuem características não-lineares (FRANK, 1997). A natureza não linear da carga gera harmônicos de corrente que causam superaquecimento e perda de potência adicional em transformadores, torques oscilatórios em motores de indução, desgaste de isolamentos, e várias outras anomalias (PHIPPS et al., 1994). Com todos estes problemas gerados pelas distorções harmônicas, diversos estudos foram realizados com o intuito de quantificá-los. A entidade denominada Underwriters Laboratory - UL criou uma forma de mensurar estes harmônicos conforme sua intensidade em um sistema (UL-1561 e UL-1562), obtendo um parâmetro denominado fator K (CECATO et al., 2007).

O fator K conforme a Equação (1), é um índice que indica a capacidade do transformador de suportar uma proporção de harmônicos em sua corrente nominal, se mantendo dentro dos limites da temperatura de operação (MORAES, 2013).

$$K_{factor} = \frac{1}{I_R^2} \sum_{h=1}^{\infty} ((I_h)^2 h^2)$$

onde:

- I_R = Corrente nominal de carga rms do transformador;
- h = Ordem harmônica;
- I_h = Corrente rms na harmônica h ;

A equação 1 está diretamente relacionada a IEEE C57.110 - 2018, para o cálculo de perdas devido a harmônicas em Transforma-

-dores (IEEE, 2018). Alguns benefícios da aplicação do Fator K são (ELETRIC, 2018):

- Aumento da Vida útil do Transformador
- Garantir melhor confiabilidade na operação
- Indicador de qualidade de energia
- Atendimento da IEEE Std C.57.110

Segundo a recomendação C57.110-1998 (IEEE, 1998), feitas pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, o fator K se tornou uma forma de classificar os equipamentos para operar em condições não lineares (MORAES,2013). Este fator, amplamente utilizado por projetistas de transformadores, é usado para se calcular o aumento do aquecimento de um transformador devido à circulação de correntes harmônicas(IEEE,1992).

Os transformadores com especificações de fator K são projetados para reduzir os efeitos de aquecimento das correntes harmônicas criadas por cargas não lineares. A classificação do fator K, atribuída a um transformador, é um índice de capacidade do transformador suportar um nível de harmônicos em relação a sua corrente nominal e permanecer dentro de seus limites da temperatura de operação (CECATO et al., 2007). O total da soma das harmônicas irá determinar a porcentagem da carga que não é linear. Exemplos numéricos para o fator K são:K = 1, 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50. Se:

- **K=1**, o transformador é desenvolvido como sendo um transformador normal, que não está preparado para suportar correntes não senoidais em frequências diferentes de 60 Hz (MATTOS, 2011).
- **K=4**, 50 % da carga não é linear (MATTOS, 2011), sendo os limites para ordens harmônicas em:
 - 16,7% da corrente medida é da 3ª harmônica.
 - 10% da corrente medida é da 5ª harmônica.
 - 7,1% da corrente medida é da 7ª harmônica.
 - 5,6% da corrente medida é da 9ª harmônica.

A partir da 9ª harmônica as porcentagens da corrente em relação a fundamental não serão considerados.

- **K=9**, o transformador pode suportar 163% do carregamento harmônico de um transformador classificado como K-4 (INDUSIL, 2016), sendo os limites para ordens harmônicas em:

- 27,22% da corrente medida é da 3ª harmônica.
- 16,3% da corrente medida é da 5ª harmônica.
- 11,57% da corrente medida é da 7ª harmônica
- 9,12% da corrente medida é da 9ª harmônica.

- **K=13**, 100 % da carga não é linear (MATTOS, 2011), sendo os limites para ordens harmônicas em:

- 33,3% da corrente medida é da 3ª harmônica.
- 20% da corrente medida é da 5ªharmônica.
- 14,3% da corrente medida é da 7ª harmônica
- 11,1% da corrente medida é da 9ª harmônica.

- **K=30**, 150 % da carga não é linear (MATTOS, 2011), sendo os limites para ordens harmônicas em:

- 50% da corrente medida é da 3ª harmônica.
- 30% da corrente medida é da 5ªharmônica.
- 21,4% da corrente medida é da 7ªharmônica.
- 16,7% da corrente medida é da 9ª harmônica.

Cabe observar que valores acima do fator K-13 indicam a capacidade do transformador operar sucessivamente com cargas harmônicas mais altas, sem superaquecer. Alguns desses transformadores são usados em con-

-troladores de velocidade variável, circuitos exclusivos para o processamento de dados, instalações de cuidados intensivos e salas de cirurgia em hospitais.

Na Tabela I apresentam-se exemplos de tipo de cargas, com o fator K aplicado nos transformadores (XITRON, 2018):

CARGA	FATOR K
Iluminação com Lâmpadas de Descarga	K-4
Máquinas de solda	K-4
Equipamento de aquecimento indutivo	K-4
Sistemas de Corrente Contínua em Geral	K-9
Equipamentos de Telecomunicação (por ex. PBX)	K-13
Alimentação Elétrica de Áreas hospitalares (instrumentos) e Salas de Aula Escolares	K-13
Fontes de circuitos para equipamentos de inspeção e testes em fábricas	K-13
Variador de Frequência	K-20
Alimentação de Áreas de Segurança, Salas Cirúrgicas e Salas de Recuperação Hospitalar	K-20

TABELA I. FATOR K SUGERIDO PARA DIVERSAS APLICAÇÕES

A potência nominal e o calor que um transformador dissipa em regime de plena carga são calculados com base de que o sistema é composto por cargas lineares, que por definição não produzem harmônicas. No entanto, se pelo transformador circular uma corrente que contenha harmônicas, ele pode ter um aumento da sua vibração, ruído e temperatura. No caso de sofrer um aquecimento adicional, o transformador pode sofrer uma avaria. As componentes harmônicas provocam uma redução de sua potência, gerando assim a sua desclassificação. O fator K é um fator de desclassificação para transformadores que indica quanto se deve reduzir a potência máxima de saída quando houver harmônicas (DIAS, 2015).

Portanto, caso o transformador tenha seu valor K e não atenda aos critérios estabelecidos pela IEEE C.57.110 o mesmo estará

desclassificado. Deverá ser substituído ou receber as devidas manutenções, conforme indicado na ABNT NBR-5356.

Exemplo de Desclassificação: Considere um fator K de 1,2 para um transformador de potência nominal de 1000 kVA. Logo, a potência máxima que esse equipamento pode fornecer sem sobreaquecimento seria de $1000 / 1,2 = 833$ kVA (MATTOS, 2011). Caso o transformador ultrapasse esse valor ele é desclassificado. Essa solução não é financeiramente benéfica, pois se perde uma parte da capacidade do transformador (CECATO e outros, 2007).

METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Para o estudo de caso descrito foi inserido um analisador de energia nas fases do transformador TR-B (como pode ser visto na

na Figura 1).

Neste trabalho, considerou-se um sistema composto por um forno a arco direto e um transformador de alimentação que opera na fusão de vidro.

Os equipamentos para o levantamento dos

dados foram:

- 1 – Analisador de Energia RE6081
- 2 – Transformador de 13,8 / 0,48 kV – 2 MVA (Transformador de alimentação)
- 3 – Computador com o software de análise ANL6000

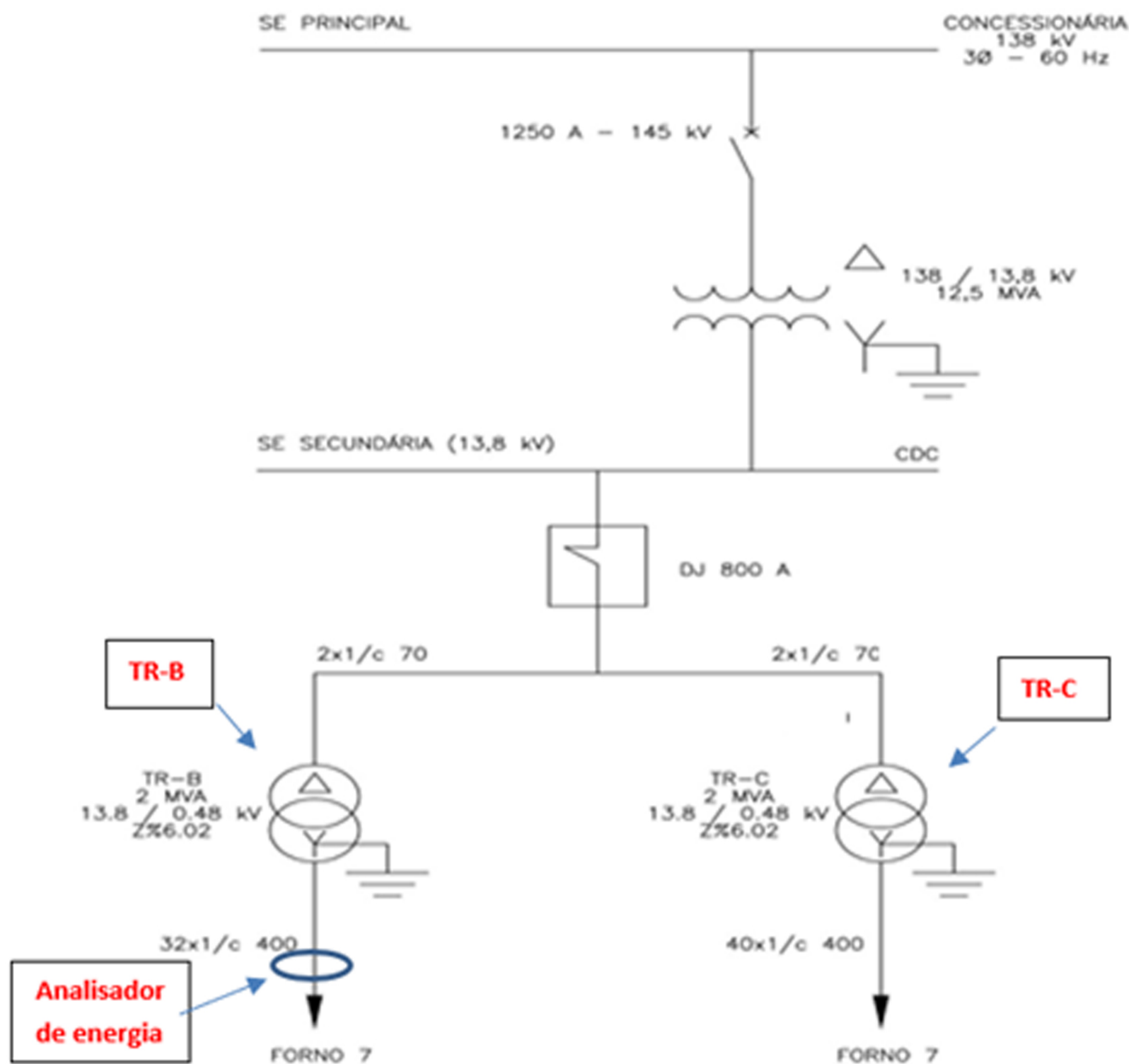


Figura 1. Diagrama Unifilar da Fábrica Estudada.

Para utilização do analisador de energia (RE6081) e realização das medições no transformador, foi necessária a instalação do software ANL 600 no computador e garantir a comunicação entre os equipamentos, para que os dados do analisador pudessem ser coletados e armazenados. A comunicação do analisador (RE6081) e do computador foi realizada através de um cabo de ethernet, sendo necessário configurar o IP do analisador (RE6081) com o IP do computador.

Garantida a comunicação entre o analisa-

dor e o computador, foi realizada a montagem das garras de jacaré e bobinas de Rogowski, apresentadas na Figura 2, a partir das quais foi realizada a coleta dos dados referentes a tensão e corrente, respectivamente. Os dados foram coletados na condição de plena operação do forno.



Figura 2. Foto de equipamentos utilizados: (a) bobina de Rogowski e (b) garra jacaré.

TR-B é um transformador bifásico, de 2MVA – 13,8/0,48 kV. A Figura 3 apresenta uma visão panorâmica do transformador uti-

lizado. Um esquemático mostrando como o analisador de energia foi conectado é apresentado na Figura 4.

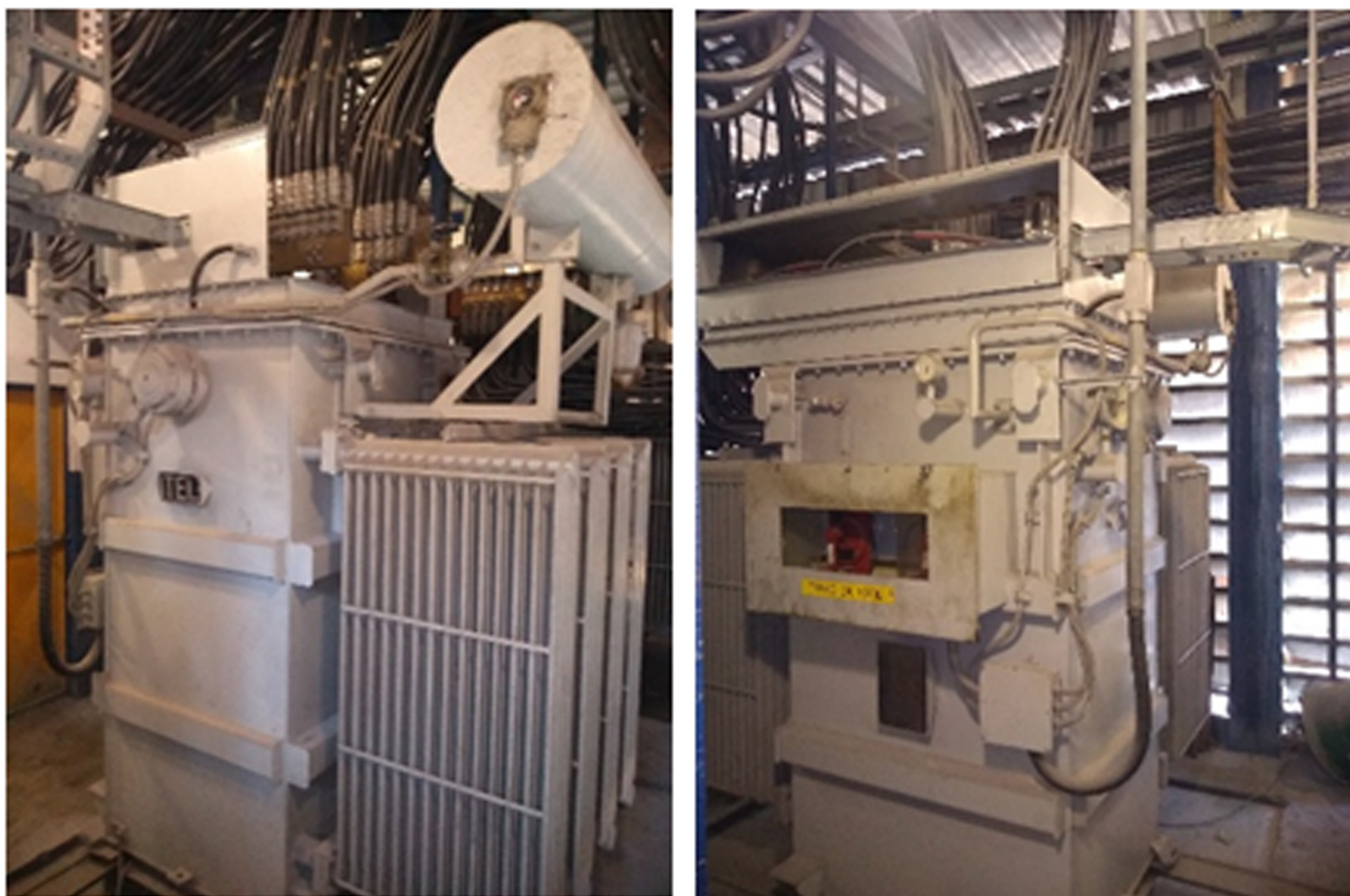


Figura 3. Visões panorâmicas do transformador utilizado.

Conforme descrito no manual Embrasul, revisão A03, o analisador RE6081 é um medidor registrador de grandezas elétricas em tempo real. O equipamento realiza medições e registros de tensão, corrente, potências e DHT de tensão. Possui entradas para tensão em três fases e neutro e de corrente através de sensores de corrente de 1.000 A, com ranges de 100A e 1.000 A. A medição de tensão é possível entre 80 e 300 V (fase/neutro). A alimentação do RE6081 é realizada

através da entrada de medição, entre o neutro e uma das fases, ou seja, a alimentação do RE6081 se dá por qualquer uma das três fases.

Ao realizar as medições (sistema bifásicos) foram utilizadas as entradas da fase A e B para as conexões de tensões e corrente. O neutro foi necessário como referência para fins de medição e/ou registro, conforme apresentado na Figura 4.

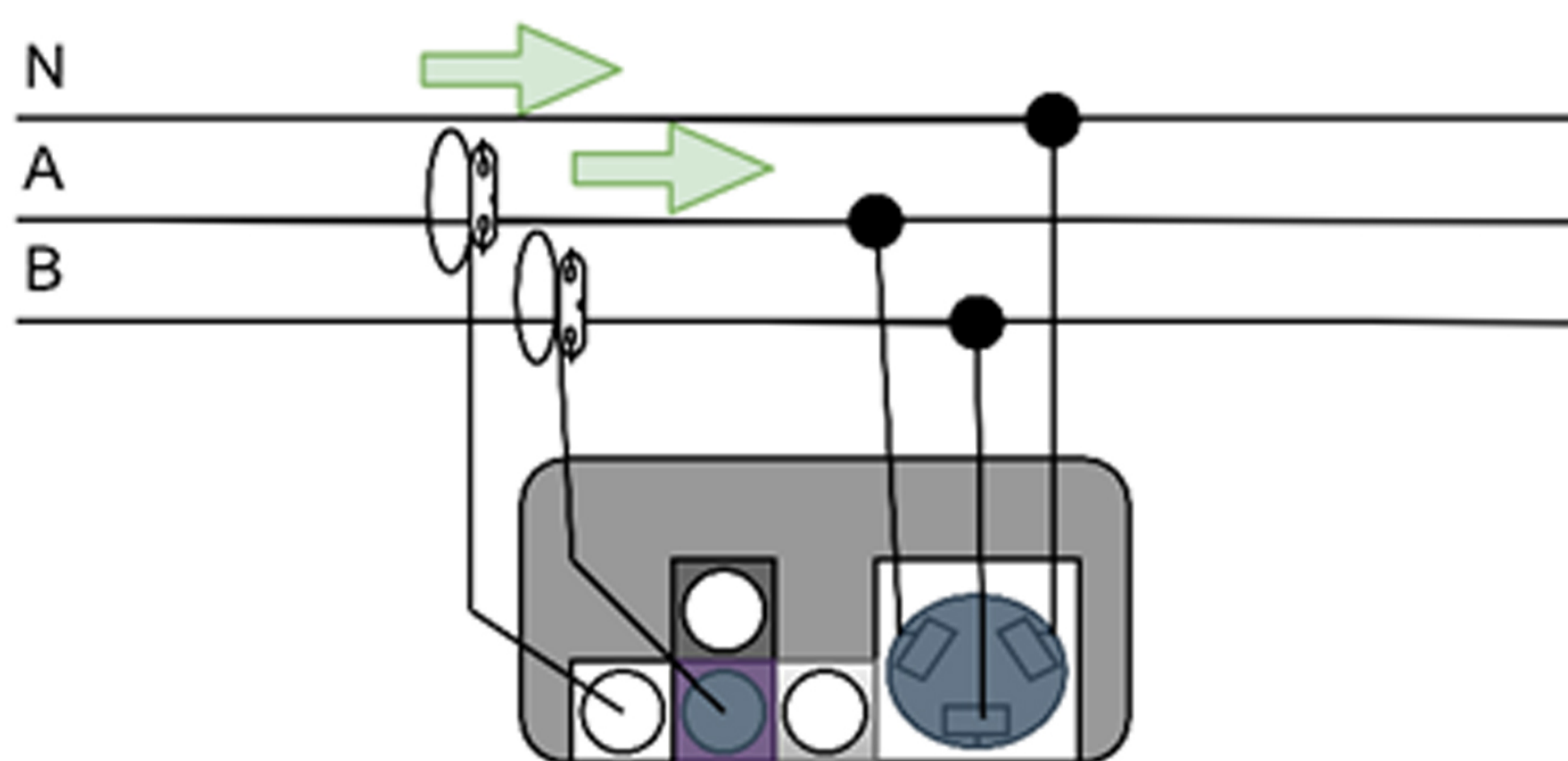


Figura 4. Esquema de ligação do analisador de energia.

RESULTADOS

Neste tópico apresentam-se os resultados levantados no estudo do artigo, para os quais seguem os gráficos de distribuição de harmônicos e o quadro de valores, para

ambas as fases (A e B). O analisador de energia permaneceu no transformador por 30 minutos, fazendo a medição e obtendo os seguintes dados:

- Distribuição dos harmônicos das correntes da fase A: Ver Figura 5 e Tabela II. O THD calculado foi de 2,729 %.



Figura 5. Distribuição de harmônicos – Fase A

Registro: 1
 RMS: 1,590 (A)
 Componentes: 4
 DHT: 2,729 %
 Fundamental: 60,00 Hz

A fase é exibida em graus

IMPAR	RMS(A)	%FUND
1	1,589	100,00
3		
5	0,028	1,73
7	0,024	1,48
9		
11	0,024	1,48
13		
15		
17		
19		
21		

TABELA II. DISTRIBUIÇÃO DE HARMÔNICOS – FASE A

• Distribuição dos harmônicos das corrente da fase B: Ver Figura 6 e Tabela III. O THD calculado foi de 49,288 %.

Gráfico de distribuição de harmônicos - Fase B:

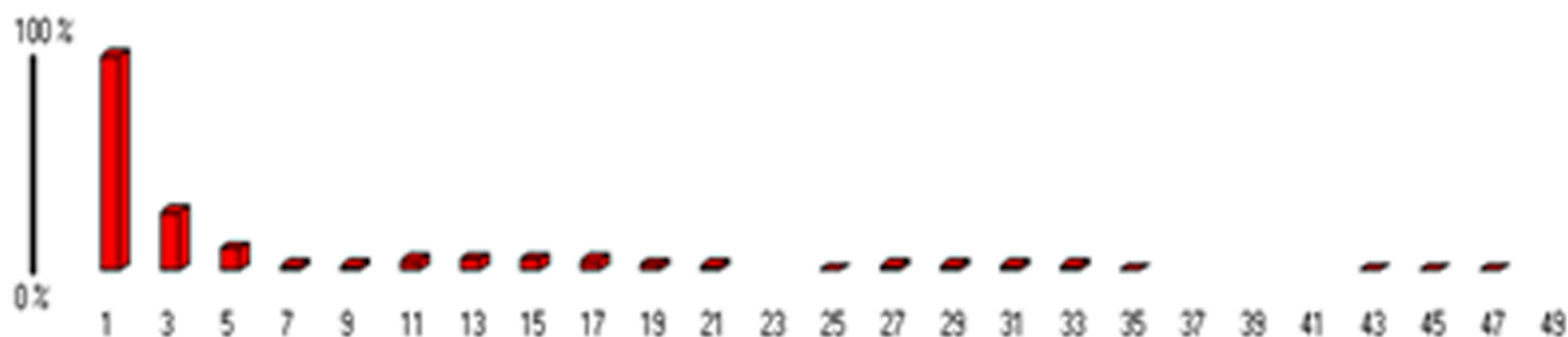


Figura 6. Distribuição de harmônicos – Fase B.

Registro: 1
 RMS: 184,760 (A)
 Componentes: 38
 DHT: 49,288 %
 Fundamental: 60,00 Hz

A fase é exibida em graus

IMPAR	RMS(A)	%FUND
1	165,724	100,00
3	46,142	27,84
5	17,779	10,72
7	3,574	2,15
9	4,646	2,80
11	9,145	5,51
13	10,932	6,59
15	10,607	6,40
17	8,829	5,32
19	6,148	3,71
21	3,135	1,89
23		
25	2,030	1,22
27	3,598	2,17
29	4,321	2,60
31	4,248	2,56
33	3,517	2,12
35	2,396	1,44
37		
39		
41		
43	1,852	1,11
45	2,071	1,24
47	1,884	1,13

TABELA III. DISTRIBUIÇÃO DE HARMÔNICOS – FASE B

Os dados coletados mostram que em ambas as fases existem distorções harmônicas, porém a fase B se caracteriza como uma fase muito mais afetada, apresentando uma distorção de harmônicos muito mais acentuada, tendo registro de harmônicos até a 47ª ordem.

Foram medidos pelo analisador de energia e pela fórmula mencionada na norma IEEE C57.110 – 2018, dessa forma foi obtido como resultado do cálculo para determinação do Fator K, o valor máximo de 8,77, o que indica um transformador com fator K igual a 9. A Tabela 4 indica este cálculo.

Foi calculado o valor de K através dos va-

FATOR K - MEMÓRIA DE CÁLCULO

ORD. IMPAR	RMS (A)	%FUND	FASE
1	165,724	100	220,82
3	46,142	27,84	147,74
5	17,779	10,72	76,37
7	3,574	2,15	5,49
9	4,646	2,8	110,69
11	9,145	5,51	37,61
13	10,932	6,59	326,11
15	10,607	6,4	253,6
17	8,829	5,32	182,1
19	6,148	3,71	109,55
21	3,135	1,89	35,59
23			
25	2,03	1,22	67,5
27	3,598	2,17	358,18
29	4,321	2,6	287,75
31	4,248	2,56	211,64
33	3,517	2,12	142,64
35	2,396	1,44	72,99
37			
39			
41			
43	1,852	1,11	320,88
45	2,071	1,24	245,87
47	1,884	1,13	179,29

$$\text{Definição UL - K} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h(\text{pu})^2 h^2}$$

$I_h(\text{pu})^2$	h^2	$I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2$
1	1	1
0,077507	9	0,69755904
0,011492	25	0,287296
0,000462	49	0,02265025
0,000784	81	0,063504
0,003036	121	0,36735721
0,004343	169	0,73393489
0,004096	225	0,9216
0,00283	289	0,81793936
0,001376	361	0,49688401
0,000357	441	0,15752961
0	529	0
0,000149	625	0,093025
0,000471	729	0,34327881
0,000676	841	0,568516
0,000655	961	0,62980096
0,000449	1089	0,48944016
0,000207	1225	0,254016
0	1369	0
0	1521	0
0	1681	0
0,000123	1849	0,22781529
0,000154	2025	0,311364
0,000128	2209	0,28206721

k= 8,77

TABELA IV. MEMÓRIA DE CÁLCULO

CONCLUSÃO

Com base nas informações teóricas estudadas e nos resultados obtidos pelo analisador de energia, verificou-se que o transformador TR-B está sendo seriamente afetado pela distorção harmônica, o que pode gerar distúrbios na rede elétrica e sobreaquecimento, ruídos audíveis e vibrações no transformador. Considerando que o transformador analisado foi fabricado em 1984, quando o

fator K ainda não era empregado na fabricação de transformadores, esse transformador não possui uma desclassificação tabelada.

Nessa condição, este transformador se encontra desclassificado pelos seguintes dados abaixo:

1° - A IEEE C57-110-2018 (em sua Tabela 3), define o cálculo de cada para Harmônico correspondente ao Fator K igual a 9.

Ordem do Harmônico	Valor Calculado	Valor da Medição
3ª Harmônica	27,22%	46,14%
5ª Harmônica	16,3%	17,77%
7ª Harmônica	11,57%	3,57%
9ª Harmônica	9,12%	4,64%

TABELA V. TABELA COMPARATIVA DO VALOR DA DISTORÇÃO

2° - As fases do transformador estão desbalanceadas, acarretando com isso, distúrbios na rede elétrica e na alimentação do forno.

3° - Conforme ABNT NBR 5356-1:2007 (Transformadores de potência Parte 1 (ABNT, 2010) e ABNT NBR 10295-2013 (Transformadores de potência secos –Especificação) (ABNT, 2013), o transformador estaria desclassificado por não atender as especificações destas normas.

Com isso este estudo de caso cumpre o seu objetivo inicial, com a comprovação prática da presença de harmônicos no barramento do transformador, transmitido pela rede elétrica, a partir do Forno a Arco em operação. O que pode acarretar uma série de efeitos, não desejados, conforme apresentado.

Adicionalmente, foi identificado o desbalanceamento entre as fases A e B, que eventualmente pode desequilibrar o fluxo de

potência na rede de distribuição.

Abstract: For the use of electricity in a simple and everyday way, consumer in general are abstracted from the complex system that makes their distribution possible. However, the increased use of non-linear loads, such as computer, inverters and many other industrial controls, has generated harmonic distortions that potentially affect electrical equipment. In order to verify the presence of harmonics in practice, the energy quality data were collected with the aid of an analyser (RE8061), in a glass melting system formed by an direct arch oven and its two-phase oil transformer (TR-B – 2MVA – 13,8 / 0,48 KV). The result showed the presence the harmonic generated from the direct arch oven operations in both phases of transformer. The existing harmonics in the system alert us to the possible impacts, presented in the article through the bibliography studied, such as increased power loss, overheating and, ultimately, reduced equipment life. Additionally, the significant imbalance between phase A (THD of 2.729%) and Phase B (THD of 49.288%) was identified, possibly representing potential power flow imbalance.

Keywords: Harmonics; Transformer; Factor K; Oven; Arch.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Transformadores de potência Parte 1: Generalidades**, NBR 5356-1, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Transformadores de potência secos - Especificação**, NBR 10295, 2013.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. 2017, acessado no dia 05/12/2018 através do link: <http://www.aneel.gov.br/prodist>

BOLLEN, M.H. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**, IEEE – 2000

CECATO, L.P.D.; MINATO, R.F.; ROCHA, J.E. **Comparação de Transformadores com Fator K e Convencionais Alimentando Cargas Não Lineares**, 2007.

DIAS, C.F.J.M. **Estudo Comparativo da Desclassificação de Transformadores de Distribuição**, Lisboa, Dissertação de Mestrado, 2015.

ELETRIC – CONSULTORIA PARA O SETOR ELÉTRICO. **Fator K – 2018**, acessado no dia 05/12/2018 através do link <https://electricsservice.com.br/medicoes/qe/fator-k/>

ELMOUDI, A.; LEHTONEN, M.; NORDMAN, H. **Effect of Harmonics on Transformers Loss of Life**, IEEE - 2006.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**, 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FRANK, J.M. Origin, **Development, and Design of K-Factor Transformers**, IEEE, 1997.

GARCIA, F. R.; PAULILLO, G.; ARAÚJO, R.; NAVES, A. C. **Impacto de Interharmônicos Gerados pela Operação de Fornos a Arcos em Filtros de Harmônicos: Caso Real**, 2003, acessado no dia 05/12/2018 através do link: <http://docplayer.com.br/50258184-Estudo-do-impacto-dos-interharmonicos-gerados-pela-operacao-de-fornos-a-arco-em-filtros-de-harmonicos-caso-real.html>

IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying No sinusoidal Load Currents**, Std. C57.110-2018, 2018.

IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Recommended Practice for Establishing Liquid Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability when Supplying No sinusoidal Load Currents**, Std. C57.110-1998, 1998.

IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System**, Std. 519-1992, 1992.

JAYASINGHE, N.R.; LUCAS, J.R; PERERA, K.B.I.M. **Power System Harmonic Effects on Distribution Transformers and New Design Considerations for K Factor**, IEE Sri Lanka, 2003.

JAYASINGHE, N.R.; LUCAS, J.R; PERERA, K.B.I.M. **Power System Harmonic Effect on Distribution Transformers and New Design Considerations for K Factor Transformers**, IEEE Sri Lanka Annual Sessions, September 2013.

MASOUM M.A.S.; FUCHS, E.F. **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**, Elsevier Academic Press, California, 2008.

MATTOS M.M. **Estudo do Fator K em Transformador a Seco**, UFRGS, 2011.

MORAES, P.N.T. **Estudo do Efeito das Harmônicas em Transformadores de Média Tensão**, FURB, 2013.

PHIPPS, J.K.; NELSON, J.P. PANKAJ, S.K. **Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems**. IEEE, 1994.

SOUSA, J. P. M. **Aplicação das Técnicas de Identificação de Sistemas Não-Lineares à Modelagem de Fornos Elétricos à Arco**, Dissertação de Mestrado, PUCMG, 2005.

TAHER, M.A.; KAMEL, S.; ALI, Z.M. **K-Factor and Transformer Losses Calculations under Harmonics**, IEEE, 2016.

TAMURA INDUSTRIAL, TRNAQSFORMADORES INDUSUL. – **Transformadores, Fator K** – 2016, acessado no dia 03/11/2018 através do link http://www.indusul.com/pt_br/produ-tos/transformadores-fator-k/25/

TEIXEIRA, D.A. Análise das Distorções Harmônicas – **Estudo de um Caso de um Sistema Industrial**, Dissertação de Mestrado – UFMG – 2009, acessado no dia 01/12/2018 através do link <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/308M.PDF>

XITRON TECHNOLOGIES, **Manufacturers of Engineering and Production Test Equip-ment.K-Factor Defined**, 2016. Acessado no dia 03/11/2018, através do link: <http://xitron-tech.com/assets/002/5787.pdf>

Submetido em:17/11/2019

Aceito em: 17/02/2020