

# Avaliação de Distorções Harmônicas e Desequilíbrios de Tensão e de Corrente na Subestação do IFSC Câmpus Florianópolis

Bruno S. Dupczak,  
Enio V. Kassick

*Depto. Acadêmico de Eletrotécnica*  
*Instituto Federal de Santa Catarina*  
Florianópolis, Brasil  
bruno.dupczak@ifsc.edu.br

Jackson Lago,  
Renata F. Cunha

*Depto. Acadêmico de Eletrotécnica*  
*Instituto Federal de Santa Catarina*  
Florianópolis, Brasil  
jackson.lago@ifsc.edu.br

Daniel G. Lúcio,  
Neissan de Alencastro

*Depto. Acadêmico de Eletrotécnica*  
*Instituto Federal de Santa Catarina*  
Florianópolis, Brasil  
sec.mpsee.fln@ifsc.edu.br

**Resumo**—Assegurar a qualidade da energia elétrica é garantir a comodidade e o desenvolvimento econômico de toda a sociedade. Para isso, é necessário evitar que problemas na tensão ou na corrente no sistema de alimentação venham a prejudicar a operação adequada dos equipamentos eletroeletrônicos. Assim, apresenta-se neste trabalho uma avaliação de alguns parâmetros relacionados a qualidade da energia no IFSC Câmpus Florianópolis, envolvendo a análise dos desequilíbrios de tensão e de corrente, bem como os níveis das componentes e distorções harmônicas presentes na instalação elétrica. As avaliações foram efetuadas com base em campanhas de medições, realizadas na subestação de energia da instituição, e considerando os indicadores propostos nas recomendações nacionais e internacionais.

**Palavras-chave**—Qualidade da Energia Elétrica, Campanha de Medição, Distorções Harmônicas, Desequilíbrio de Corrente.

## I. INTRODUÇÃO

O Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) possui 22 câmpus espalhados por todas as regiões do estado. O Câmpus Florianópolis é o maior deles, situado em uma área de 48 mil m<sup>2</sup>, onde são atendidos mais de 5 mil alunos, distribuídos em 47 cursos de nível técnico, superior e de pós-graduação.

Nos últimos anos, com o crescimento da infraestrutura da instituição, a demanda por energia elétrica tem aumentado significativamente. Isso ocorre principalmente devido à instalação de laboratórios de informática, máquinas e equipamentos didáticos para o ensino e aparelhos de condicionamento de ar. Além disso, a busca pela melhoria da eficiência energética da instalação, tem induzido a inserção massiva de iluminação a LED para os ambientes, juntamente com a implantação de um sistema de geração de energia elétrica fotovoltaica, que emprega inversores de tensão operando em alta frequência.

Com o objetivo de se obter sistema trifásico balanceado, é necessário que pelos menos as cargas monofásicas sejam distribuídas equilibradamente entre as fases do sistema de alimentação. Contudo, a falta de documentação das atividades passadas, realizadas na instalação elétrica local, interferem na conexão adequada de novos circuitos, os quais são instalados equivocadamente em fases com excesso de carga. Assim, cria-se um problema de qualidade da energia na instalação

elétrica, onde o desequilíbrio de corrente pode ocasionar um desequilíbrio de tensão de alimentação, afetando todos os circuitos conectados. A qualidade da energia também pode ser comprometida devido ao uso de cargas não-lineares, como reatores eletrônicos, fontes de computadores e inversores, os quais geram componentes harmônicas de corrente. Por sua vez, o crescimento do conteúdo harmônico de corrente ao longo do tempo, pode degradar a forma de onda da tensão, resultando em níveis de distorção harmônica que comprometam o correto funcionamento de equipamentos eletromecânicos.

Neste contexto, a proposta deste trabalho é avaliar indicadores da qualidade da energia elétrica da instituição, relacionados aos desequilíbrios e distorções harmônicas de tensão e de corrente. Para tanto, foram efetuadas medições no lado de baixa tensão da subestação do Câmpus, visando a obtenção de dados que possam ser comparados com os indicadores presentes no PRODIST-8 [1] e na IEEE 519 [2].

## II. INSTALAÇÃO ELÉTRICA AVALIADA

A infraestrutura do IFSC é alimentada por uma subestação abrigada de 13,8 kV, com potência instalada de 1,7 MVA. Essa potência é distribuída entre três transformadores trifásicos a seco de 500 kVA (380/220 V) e um transformador a óleo de 200 kVA (220/127 V), conforme visto na Fig. 1. A subestação conta também com quatro quadros gerais de baixa tensão (QGBT-1..4), sendo que os QGBT-3 e QGBT-4 possuem banco de capacitores automatizados para a correção de fator de potência. Ao QGBT-4 estão conectados 70,2 kVA de módulos fotovoltaicos, provenientes do sistema de microgeração de energia do Câmpus. Os locais onde foram executadas as medições dos parâmetros de qualidade de energia, estão indicados na Fig. 1, correspondendo aos QGBT-2, 3 e 4. O QGBT-1 não foi considerado, pois está sendo desativado. As medições de tensões e correntes de cada QGBT foram efetuadas durante um período de sete dias consecutivos. As medições em cada quadro foram executadas em 2018, nos seguintes períodos: QGBT-4 (19/02 a 26/02), QGBT-3 (27/02 a 06/03) e QGBT-2 (07/03 a 14/03).

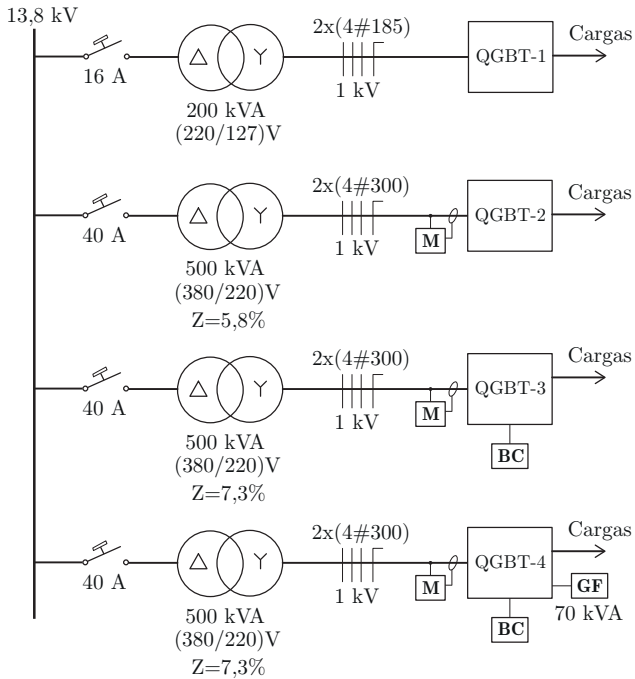


Fig. 1. Diagrama unifilar simplificado da subestação do IFSC Câmpus Florianópolis. As caixas com a letra M representam os locais onde foram realizadas as medições de tensão e corrente utilizadas no trabalho. A geração de energia fotovoltaica e os bancos de capacitores estão representados pelas caixas com as inscrições GF e BC respectivamente.

### III. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

Para a realização das medições na subestação do IFSC, utilizou-se o equipamento CW500 (*Power Quality Analyzer*) do fabricante Yokogawa [3]. Este instrumento atende à norma IEC 61000-4-30 (segundo a classe S), conforme recomendação de [1]. Foram empregadas quatro sondas de tensão de 600 V (para medições de tensão entre fase e neutro) e quatro sondas de corrente flexíveis de 1.000 A (para medições das corrente de fase e de neutro). O equipamento e as respectivas sondas são apresentados na Fig. 2. Seguindo a prescrição apresentada em [1], o equipamento foi configurado para efetuar o registro de 1.008 (mil e oito) leituras válidas, obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada.



Fig. 2. Analisador de qualidade da energia empregado (Yokogawa CW500 - Classe S), com as respectivas sondas de medição de tensão e de corrente. (Fonte: [3], adaptado).

### IV. DISTORÇÃO HARMÔNICA DA CORRENTE

Qualquer sinal de corrente (ou de tensão), cuja forma de onda não seja senoidal, pode provocar danos na instalação elétrica ou aos equipamentos que estão conectados a ela. Há vários efeitos provocados pelas componentes harmônicas, sendo os principais relacionados ao aquecimento excessivo de condutores, disparos indevidos de dispositivos de proteção, ressonâncias, vibrações mecânicas, entre outros. Como consequência, podem ocorrer problemas associados ao funcionamento de motores, cabos, capacitores, computadores e transformadores [4], [5].

Apesar da distorção harmônica da corrente não ser um parâmetro avaliado pela normativa nacional [1], pode-se recorrer a recomendação IEEE 519 [2] para se avaliar os níveis harmônicos de corrente na instalação elétrica. Dessa forma, verifica-se o conteúdo harmônico existente no ponto de acoplamento comum (PAC), que neste trabalho, será a entrada de alimentação de cada QGBT da subestação.

Segundo a IEEE 519, apresenta-se na Tabela I os limites das componentes harmônicas de corrente de ordem ímpar, para sistemas com tensão de 120 V a 69 kV. Observa-se que os limites dependem do parâmetro  $I_{SC}/I_L$ , onde  $I_{SC}$  corresponde à corrente de curto-circuito no PAC, e  $I_L$  a componente fundamental de corrente demandada. O valor de  $I_L$  deve ser calculado com base na média dos últimos doze meses de operação da instalação, considerando o valor eficaz máximo da componente fundamental de corrente, medido em cada mês. Os limites da Tabela I correspondem a um valor percentual da componente harmônica em relação a  $I_L$ . Para as harmônicas de ordem par, o limite a ser respeitado é de 25% dos limites previstos para as harmônicas ímpares. A IEEE 519 define ainda o indicador de Distorção da Demanda Total (TDD), que representa a razão entre a soma quadrática das harmônicas distintas da fundamental (até a 50ª ordem), e  $I_L$ .

#### A. Determinação do parâmetro $I_{SC}/I_L$

Para verificar a distorção harmônica de corrente na instalação elétrica, cada QGBT foi avaliado de forma independente, tendo em vista que estão associados a transformadores próprios. A fim de definir a linha da Tabela I a ser adotada,

TABELA I

LIMITES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DE CORRENTE DE ORDEM ÍMPAR ( $h$ ), E DA DISTORÇÃO TOTAL DA DEMANDA (TDD), PROPOSTOS PELA IEEE 519 PARA SISTEMAS DE 120 V A 69 kV.

$I_{SC}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

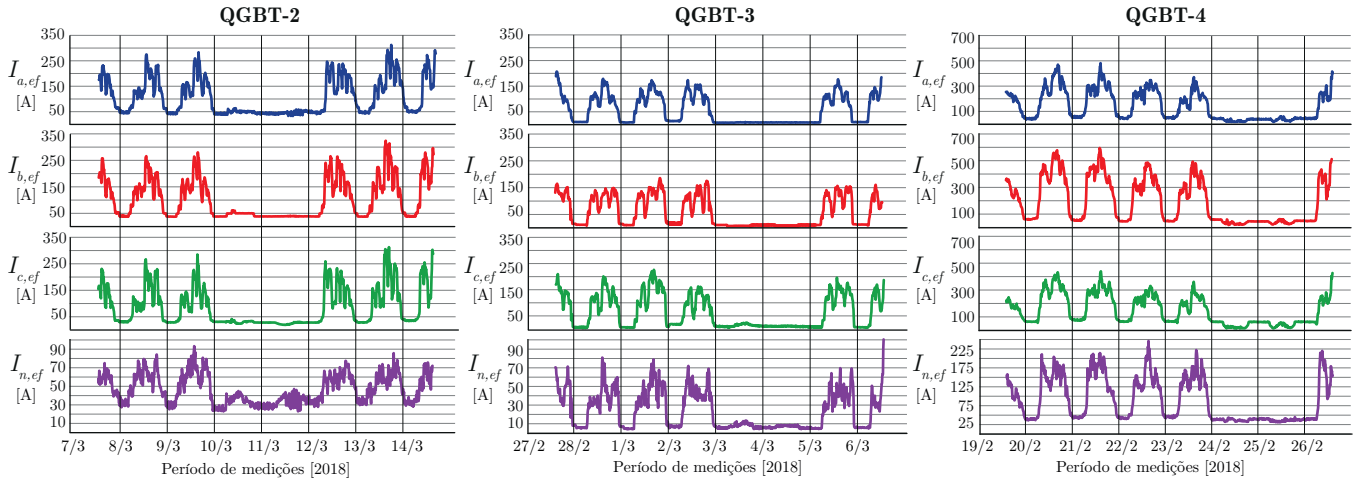


Fig. 3. Valores eficazes das correntes nos condutores de fase ( $I_{a,ef}$ ,  $I_{b,ef}$ ,  $I_{c,ef}$ ) e no condutor de neutro ( $I_{n,ef}$ ) de cada QGBT. Os dados apresentados foram obtidos durante sete dias de medições, compreendendo 1.008 amostras válidas. Observa-se que os valores das correntes no QGBT-4 são praticamente o dobro dos valores registrados no QGBT-2 e QGBT-3. O QGBT-4 apresenta também um significativo desequilíbrio de corrente entre as fases.

calculou-se o valor de  $I_{SC}$  a partir das equações em (1), considerando a corrente de curto-circuito trifásico simétrico.

$$Z_B = \frac{(V_L)^2}{S_T} \quad Z_T = Z_{T,\%} \cdot Z_B \quad I_{SC} = \frac{V_F}{Z_T} \quad (1)$$

Nas expressões em (1), os valores da impedância de base ( $Z_B$ ) e do transformador ( $Z_T$ ) foram calculadas a partir das informações disponíveis na Fig. 1, correspondendo a potência aparente total dos transformadores ( $S_T$ ), a impedância percentual do transformador ( $Z_{T,\%}$ ) e as tensões de linha e de fase ( $V_L$ ,  $V_F$ ) que alimentam os QGBTs. Na determinação de  $I_{SC}$  foi desconsiderada a impedância dos condutores, tendo em vista que o comprimento dos cabos (aproximadamente 15 m) resulta em uma impedância desprezível frente a impedância dos transformadores.

O resultado do cálculo de  $I_{SC}$  para os três QGBTs é apresentado na Tabela II, junto com os valores de  $I_L$  para cada fase. Para a determinação de  $I_L$ , devido a inexistência de valores documentados sobre a máxima corrente demandada dos últimos 12 meses, optou-se por utilizar os valores máximos medidos nos dias úteis de funcionamento da instituição, conforme os registros mostrados na Fig. 3. Assim, os valores de  $I_L$  apresentados correspondem a média aritmética dos cinco valores máximos de corrente em cada fase, registrados durante o período de medições de cada quadro.

Com base em uma consulta realizada à concessionária de energia local, verificou-se que, historicamente, o período quando foram efetuadas as medições corresponde a época de maior demanda de energia da instituição. Fato este atribuído as altas temperaturas registradas no verão, associado ao retorno pleno das aulas, quando é praticamente constante o uso de aparelhos de condicionamento de ar. Portanto, os valores de  $I_L$  apresentados correspondem a situação de pior caso no funcionamento da instalação elétrica ao longo do ano.

### B. Análise dos Dados

Os valores das componentes harmônicas das correntes e da TDD, medidas nas três fases de todos os QGBTs, são apresentadas na Tabela III. Para compor a Tabela III, foi calculado previamente a TDD e a distorção individual para cada componente harmônica, referente a todos os pontos de medição. Posteriormente, obteve-se o valor percentil de 95% para cada conjunto de dados. Visando simplificar a exibição, o valor apresentado na Tabela III corresponde ao maior valor percentil de 95% medido entre harmônicas de cada faixa. Conforme exposto na Tabela II, a avaliação das medidas do QGBT-2 e QGBT-4 deve ser feita em função da faixa de  $I_{SC}/I_L$  entre 20 e 50 da Tabela I. No caso do QGBT-3, os limites estão relacionados a faixa de  $I_{SC}/I_L$  entre 50 e 100.

A partir da análise dos dados da Tabela III, constata-se que o QGBT-2 e QGBT-3 estão em conformidade com os limites sugeridos pela IEEE 519, enquanto que o QGBT-4 extrapola os valores propostos. Em duas fases do QGBT-4, o valor máximo de 8% de TDD é excedido, assim como o limite de 7% para as componentes harmônicas de ordem ímpar

TABELA II  
VALORES DE IMPEDÂNCIA ( $Z_T$ ), CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ( $I_{SC}$ ) E CORRENTE  $I_L$  EM CADA FASE DOS QGBTs.

QGBT	$Z_B$ [mΩ]	$Z_T$ [%]	$Z_T$ [mΩ]	$I_{SC}$ [kA]	$I_L$ [A]	$I_{SC}/I_L$
2	289	5,80	16,8	13,1	282	46,6
					286	45,9
					285	46,1
3	289	7,30	21,1	10,4	182	57,3
					166	62,9
					199	52,4
4	289	7,30	21,1	10,4	417	25,0
					515	20,3
					398	26,2

TABELA III  
PERCENTUAIS DE HARMÔNICAS E DA DISTRORÇÃO TOTAL DA DEMANDA DE CORRENTE, MEDIDOS EM CADA FASE DOS QGBTs.

QGBT	$3 < h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
2	4,3%	0,3%	0,2%	0,0%	0,0%	4,8%
	6,2%	0,5%	0,1%	0,1%	0,0%	6,4%
	4,3%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	4,5%
3	7,1%	0,4%	0,2%	0,0%	0,0%	8,0%
	7,0%	0,3%	0,1%	0,0%	0,0%	8,1%
	5,8%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	7,2%
4	9,3%	0,7%	0,4%	0,0%	0,0%	9,8%
	7,4%	0,5%	0,1%	0,0%	0,0%	7,8%
	10,4%	0,6%	0,2%	0,0%	0,0%	10,7%

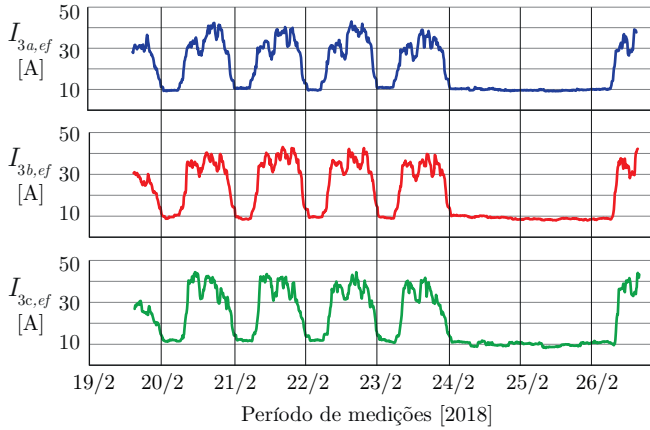


Fig. 4. Valores eficazes da terceira harmônica de corrente nas três fases do QGBT-4. A respectiva harmônica é a principal responsável pelo valor de TDD deste quadro exceder o limite previsto na IEEE 519.

entre 3 e 11. Especificamente, verifica-se que a componente harmônica de terceira ordem é a principal responsável pelos resultados de distorção harmônica de corrente no QGBT-4, indicando a presença de uma elevada quantidade de cargas não lineares monofásicas conectadas a este quadro. A evolução da componente harmônica de terceira ordem no QGBT-4, ao longo do período de medição, está representada na Fig. 4.

Apesar de não estar quantificado na Tabela III, todas as harmônicas de ordem par estão em conformidade com [2].

## V. DISTRORÇÃO HARMÔNICA DA TENSÃO

A distorção da forma de onda da tensão está associada à presença de componentes harmônicas de corrente, e a queda de tensão que elas ocasionam sobre a impedância do transformador. Reflete também a característica não linear do transformador, que por razões econômicas, normalmente é dimensionado para operar próximo da condição de saturação do material magnético.

Para mensurar os níveis de distorção harmônica da tensão, o PRODIST-8 apresenta indicadores, sendo eles a distorção individual de ordem  $h$  ( $DIT_h$ ), distorção total ( $DTT$ ), distorção para as componentes pares não múltiplas de 3 ( $DTT_p$ ), para as componentes ímpares não múltiplas de 3 ( $DTT_i$ ) e distorção

total para as componentes múltiplas de 3 ( $DIT_3$ ). As equações para cálculo destes indicadores estão disponíveis em [1].

Da mesma forma, a IEEE 519 propõe métodos para avaliar os níveis de distorção harmônica da tensão, envolvendo indicadores por harmônica individual ( $H_h$ ) ou de conteúdo harmônico total ( $THD$ ). A formulação de cálculo dos parâmetros  $H_h$  e  $THD$  da IEEE 519 são respectivamente as mesmas que são empregadas para a determinação dos valores de  $DIT_h$  e  $DTT$  do PRODIST-8. O valor limite para cada indicador, previsto em [1], [2], é mostrado na Tabela IV.

## A. Análise dos Dados

Para todos os pontos registrados, foram calculados os indicadores de distorções harmônicas da tensão, conforme as equações previstas em [1], [2]. Posteriormente, obteve-se o valor percentil de 95% para cada conjunto de dados, sendo que estes resultados estão expostos na Tabela V, e condizentes para a avaliação frente os limites da Tabela IV.

Observa-se que com relação a este quesito de qualidade da energia, todos os QGBTs possuem tensões dentro dos limites de distorção previstos pelo PRODIST-8 e IEEE 519. A componente harmônica medida, com amplitude mais significativa, foi a de quinta ordem ( $H_5$ ), correspondendo a apenas 3,9% da componente fundamental de tensão no QGBT-4.

## VI. DESEQUILÍBRIO DE CORRENTE

O desequilíbrio de corrente ocasiona a sobrecarga nos enrolamentos dos transformadores e condutores, resultando na subutilização do sistema de energia e na elevação das perdas elétricas. Está relacionado também ao surgimento (ou

TABELA IV  
LIMITES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO, PROPOSTOS NO PRODIST-8 E NA IEEE 519.

Tensão de Operação	PRODIST-8				IEEE 519	
	$DTT_p$	$DTT_i$	$DTT_3$	$DTT$	$H_h$	$THD$
$V_n \leq 1,0$ kV	2,5%	7,5%	6,5%	10,0%	5,0%	8,0%
$1$ kV $< V_n < 69$ kV	2,0%	6,0%	5,0%	8,0%	3,0%	5,0%
$69$ kV $\leq V_n \leq 161$ kV	1,0%	4,0%	3,0%	5,0%	1,5%	2,5%
$161$ kV $< V_n \leq 230$ kV	1,0%	4,0%	3,0%	5,0%	1,0%	1,5%

TABELA V  
PERCENTUAIS DE HARMÔNICAS E DA DISTRORÇÃO TOTAL DA TENSÃO, MEDIDOS EM CADA FASE DOS QGBTs.

QGBT	PRODIST-8				IEEE 519	
	$DTT_p$	$DTT_i$	$DTT_3$	$DTT$	$H_5$	$THD$
2	0,1%	3,0%	0,4%	3,0%	2,8%	3,0%
	0,1%	2,9%	0,5%	3,0%	2,6%	3,0%
	0,1%	3,3%	0,5%	3,3%	3,0%	3,3%
3	0,1%	3,0%	0,5%	3,0%	2,8%	3,0%
	0,1%	2,9%	0,5%	2,9%	2,6%	2,9%
	0,1%	3,2%	0,4%	3,2%	2,9%	3,2%
4	0,1%	3,8%	1,5%	3,8%	3,3%	3,8%
	0,1%	4,0%	1,6%	4,1%	3,6%	4,1%
	0,1%	4,2%	1,3%	4,2%	3,9%	4,2%

elevação) das correntes no condutor de neutro, além de contribuir para o desequilíbrio de tensão na instalação elétrica.

Este parâmetro de qualidade da energia não é abordado em [1], não sendo previsto indicadores a serem observados. Além disso, não foram identificados estudos ou publicações relevantes, onde fossem propostos métodos de quantificação ou limites para o desequilíbrio de corrente em transformadores. Sabe-se que a concessionária de energia local (Celesc), para avaliar o nível de desequilíbrio de corrente em transformadores da rede de distribuição, faz uso da equação (2). Esta definição de fator de desequilíbrio ( $FD_i$ ) é derivada do método NEMA para cálculo de desequilíbrio de tensão em motores [6]. Baseado na experiência e conhecimento empírico do corpo técnico da Celesc, a concessionária considera  $FD_i$  aceitável até 15% (para situação de maior demanda do transformador), sendo que valores superiores a 25% implicam na redistribuição das cargas entre as fases. Outra forma de cálculo, empregada pela CEMIG [7], utiliza a equação (3). Neste caso, adota-se o limite de 20% de desequilíbrio no horário de carga máxima. Em (2) e (3),  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  são os valores eficazes das correntes nas fases dos transformador, cujo ponto médio define  $I_m$  (4).

$$FD_i = \frac{\max(|I_a - I_m|, |I_b - I_m|, |I_c - I_m|)}{I_m} \quad (2)$$

$$FD_i = \frac{\sqrt{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) - (I_a I_b + I_b I_c + I_c I_a)}}{I_m} \quad (3)$$

$$I_m = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (4)$$

#### A. Análise dos Dados

Tendo em vista a ausência de critérios normativos relevantes, para a verificação do desequilíbrio de corrente, considerou-se inicialmente as formulações (2) e (3) na análise dos dados da instalação elétrica em estudo. Contudo, observou-se que os fatores de desequilíbrio, calculados para cada ponto de medição, eram pouco representativos. Isso se deve ao fato que os valores de  $FD_i$  são relativos a  $I_m$  (4), que possui uma ampla variação ao longo do período de medições. Com isso, obteve-se em diversas situações, valores relativos de  $FD_i$  superiores a 50%, mas que do ponto de vista absoluto, representavam uma corrente de valor pouco significativo frente a capacidade do transformador. Em outras ocorrências,  $FD_i$  apresentou valores similares, porém para situações com desequilíbrio absoluto de corrente muito distintos.

Frente ao exposto, optou-se por quantificar o desequilíbrio de corrente em função de valores absolutos, conforme a equação (5). Dessa forma, representa-se na Fig. 5 a maior diferença absoluta de corrente entre as três fases ( $\Delta I_{mx}$ ), para cada ponto de medição. Assim, fica evidente a amplitude de desequilíbrio existente, permitindo a real comparação com a capacidade de corrente do transformador.

$$\Delta I_{mx} = \max(|I_a - I_b|, |I_b - I_c|, |I_c - I_a|) \quad (5)$$

Seguindo a abordagem presente em [1], obteve-se o valor percentil de 95% ( $\Delta I_{mx,P95}$ ), o qual está representado na Fig. 5 e informado na Tabela VI.

TABELA VI  
FATORES DE DESEQUILÍBRIO E CORRENTES NOS CONDUTORES DE NEUTRO DE CADA QGBT.

QGBT	$I_{L,md}$ [A]	$I_{T,n}$ [A]	$\Delta I_{mx}$ [A] (P95%)	$FD_{i,a}$ [%]	$FD_{i,b}$ [%]	$I_{n,ef}$ [A] (P95%)	$I_{n,1h}$ [A] (P95%)	$I_{n,3h}$ [A] (P95%)
2	284	760	50,6	17,8%	6,7%	73,2	62,4	41,1
3	182	760	59,7	32,8%	7,9%	62,9	53,5	36,0
4	443	760	171,3	38,7%	22,5%	192	158,0	115,8

A partir de  $\Delta I_{mx,P95}$  propõe-se duas formas para determinar o fator de desequilíbrio de corrente. A primeira abordagem ( $FD_{i,a}$ ) compara o desequilíbrio de corrente ao valor médio da corrente demandada ( $I_{L,m}$ ), conforme a equação (6). Os valores das correntes demandadas para as três fases de cada QGBT ( $I_L$ ) foram apresentadas na Tabela II. A outra alternativa seria expressar o fator de desequilíbrio ( $FD_{i,b}$ ) em relação a corrente nominal do transformador ( $I_{T,n}$ ), conforme (7).

Os valores de  $FD_{i,a}$  e  $FD_{i,b}$  calculados são apresentados na Tabela VI. Observa-se que  $\Delta I_{mx,P95}$  do QGBT-4 é praticamente três vezes maior que o desequilíbrio do QGBT-3. Contudo, reflete-se em uma diferença de apenas 6% no indicador  $FD_{i,a}$  proposto, ou seja, avaliar o desequilíbrio em relação a demanda de corrente do transformador continua sendo pouco representativo.

Por outro lado,  $FD_{i,b}$  deixa evidente que o transformador do QGBT-4 é o que possui maior desequilíbrio de corrente entre as fases, tornando esta figura de mérito mais clara e objetiva para se quantificar este tipo de problema de qualidade da energia.

$$FD_{i,a} = \frac{\Delta I_{mx,P95}}{I_{L,m}} \quad I_{L,m} = \frac{I_{L,a} + I_{L,b} + I_{L,c}}{3} \quad (6)$$

$$FD_{i,b} = \frac{\Delta I_{mx,P95}}{I_{T,n}} \quad I_{T,n} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot V_L} \quad (7)$$

#### B. Corrente no condutor de neutro

O desequilíbrio das correntes nas fases possui contribuição significativa na corrente do condutor de neutro. Isso fica claro observando a componente fundamental da corrente de neutro ( $I_{n,1h}$ ) na Fig. 5. Nota-se que a envoltória de  $\Delta I_{mx}$  praticamente se reproduz no comportamento de  $I_{n,1h}$ .

A corrente do condutor de neutro também possui forte influência das componentes harmônicas ímpares múltiplas de três (chamadas de homopolares ou de sequência zero). Essas componentes harmônicas, por apresentarem o mesmo deslocamento angular nas três fases, acabam somando-se algebricamente no condutor de neutro. No caso avaliado, constatou-se que a componente harmônica de terceira ordem ( $I_{n,3h}$ ) é mais significativa, estando representada na Fig. 5. Como exemplo, verifica-se que nos pontos de maior amplitude de  $I_{n,3h}$  do QGBT-4, o valor correspondente equivale a soma das componentes de terceira ordem mostradas na Fig. 4.

Calculando o valor percentil de 95%, apresenta-se na Tabela VI as amplitudes de corrente no condutor de neutro.

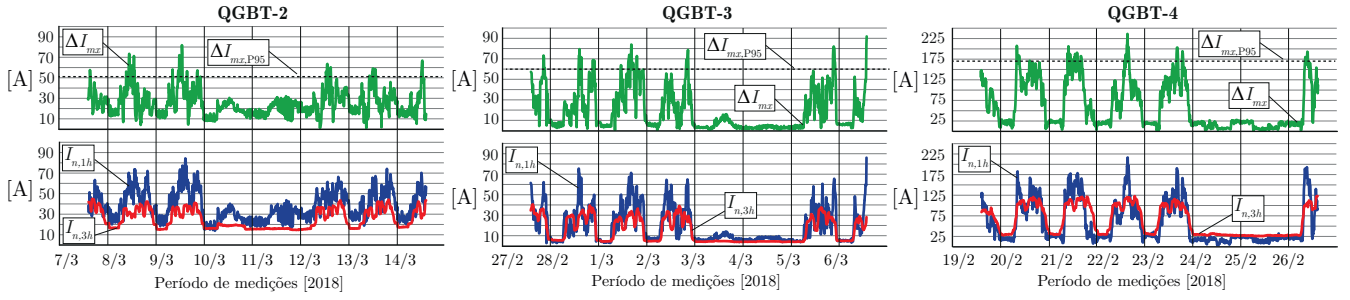


Fig. 5. Representação do desequilíbrio de corrente ( $\Delta I_{m,x}$ ), considerando o valor máximo das diferenças de corrente obtidas entre as três fases. Observa-se que o comportamento de  $\Delta I_{m,x}$  reflete-se na componente fundamental da corrente de neutro ( $I_{n,1h}$ ). Além disso, a componente de terceira harmônica da corrente de neutro ( $I_{n,3h}$ ) é o resultado do somatório das harmônicas de terceira ordem presentes em cada fase dos QGBTs (fato este que fica evidente comparando  $I_{n,3h}$  do QGBT-4 com o somatório das correntes vistas na Fig. 4).

Muitas vezes, os condutores são dimensionados considerando uma situação que envolve baixo desequilíbrio de corrente e ausência de componentes harmônicas. Assim, as informações da Tabela VI podem ser de interesse futuro, caso seja necessário avaliar se a seção dos condutores de neutro estão adequadas para a realidade da instalação elétrica.

## VII. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Ao contrário do desequilíbrio da corrente, o desequilíbrio de tensão é um problema de qualidade da energia bem caracterizado na literatura [8], [9]. Tensões desequilibradas afetam principalmente motores elétricos, causando ondulações de torque e elevação de temperatura acima do esperado. Por sua vez, a elevação de temperatura afeta diretamente a vida útil do motor, sendo que [6] recomenda uma redução de 20% na potência de operação da máquina, quando alimentada com tensões desequilibradas em até 5%. O desequilíbrio de tensão afeta também a operação correta das pontes retificadoras a diodos, causando sobreaquecimento nos semicondutores e elevação da ondulação da tensão retificada [10].

Para o PRODIST-8, o desequilíbrio de tensão pode ser quantificado a partir da equação (8), que corresponde ao método proposto pela CIGRE [11]. Da mesma forma, o equipamento de medição empregado [3] faz uso de (8) para determinar o fator de desequilíbrio de tensão ( $FD_v$ ).

Os valores de  $FD_v$ , calculados pelo equipamento de medição, são apresentados na Fig. 6. Para avaliar o desequilíbrio de tensão frente ao PRODIST-8, foi determinado o valor percentil de 95% ( $FD_{v,P95}$ ) para cada QGBT. Para a instalação elétrica avaliada, observa-se na Tabela VII que os valores de  $FD_{v,P95}$  estão dentro do limite proposto por [1].

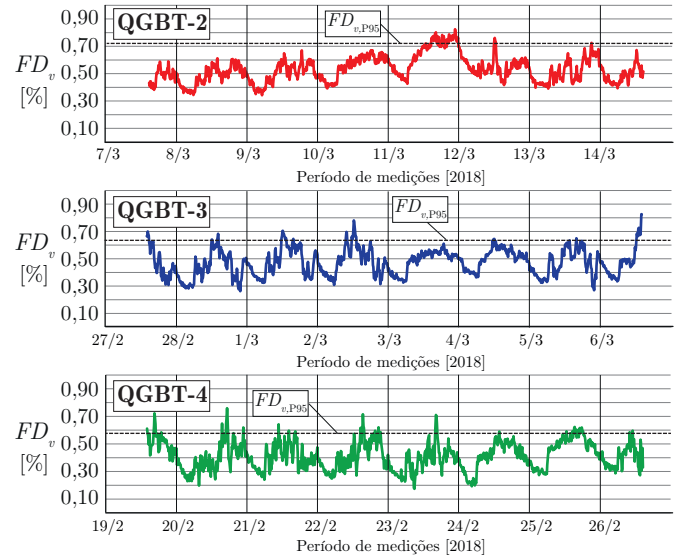


Fig. 6. Desequilíbrio de tensão medido nos três QGBTs, considerando o indicador  $FD_{v,P95}$ . Para todos os quadros, os valores de desequilíbrio de tensão medidos foram inferiores ao limite de 3% previsto em [1].

$$FD_v = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad \beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (8)$$

## VIII. CONCLUSÕES

O estudo de qualidade da energia na subestação do IFSC, mostra que o QGBT-4 merece atenção por parte da equipe de manutenção do Câmpus, tendo em vista que o nível da componente harmônica de terceira ordem e da distorção total de corrente, ultrapassam os valores recomendados pela IEEE 519. Apesar de não existir relatos de problemas relacionados ao QGBT-4, seria adequado evitar a adição de novas cargas (especialmente não-lineares) a este quadro, buscando inclusive redistribuir as cargas existentes entre os QGBTs 2 e 3. Dessa forma, além de dividir o conteúdo harmônico com os outros transformadores, melhora-se o nível de desequilíbrio de corrente existente.

TABELA VII

FATOR DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO OBTIDO PARA CADA QGBT, FRENTE AO LIMITE TOLERÁVEL PELO PRODIST-8 PARA SISTEMAS QUE OPERAM COM TENSÃO ATÉ 1 KV.

QGBT	$FD_{v,P95}$	PRODIST-8
2	0,72%	3,0%
3	0,63%	
4	0,58%	

O fator de desequilíbrio de corrente proposto em (7) representa uma forma objetiva de quantificar o problema, relacionando o desequilíbrio com a capacidade de corrente do transformador. Contudo, para esta nova métrica, são necessários maiores estudos que possibilitem definir limites toleráveis de desequilíbrio de corrente, buscando correlacionar essa informação com a elevação da temperatura das bobinas, o rendimento e a vida útil do transformador.

Em face da expansão da instituição e da crescente demanda por energia elétrica, torna-se necessário a avaliação periódica dos indicadores de qualidade, visando manter a segurança e a operação adequada dos equipamentos eletroeletrônicos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Engenharia do IFSC Câmpus Florianópolis (COENG), em especial ao engenheiro Flávio M. Schmidt, pelo suporte técnico na realização das medições na subestação da instituição. Os autores agradecem também a Yokogawa do Brasil e OKK Soluções Tecnológicas, pelo empréstimo do equipamento CW500, empregado no levantamento dos dados utilizados neste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, Rev. 10, <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>, 2018.
- [2] IEEE, “Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems;” *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992) - Redline*, pp. 1–213, June 2014.
- [3] Yokogawa, *CW500 Power Quality Analyzer - Getting Started Guide*, <https://cdn.tmi.yokogawa.com/IMCW500-02EN.pdf>, 2017.
- [4] H. Moreno, “Harmônicas nas instalações elétricas,” Instituto Brasileiro do Cobre (PROCOBRE), 2001.
- [5] R. C. DUGAN, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. McGraw-Hill, 2003.
- [6] NEMA, “Motors and generators,” *NEMA Standards Publication MG-1*, pp. 1–670, 2009.
- [7] CEMIG, “Projetos de redes de distribuição aéreas urbanas,” *Manual de Distribuição - ND-3.1*, pp. 1–124, 2014.
- [8] V. Gosbell, “Voltage unbalance - technical note 6;” *University of Wollongong*, pp. 1–10, 2002.
- [9] P. Pillay, P. Hofmann, and M. Manyage, “Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over or undervoltages,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, no. 4, pp. 485–491, Dec 2002.
- [10] B. Bennett, “Unbalanced voltage supply,” ABB, New Zealand, Tech. Rep., 2018.
- [11] A. Robert and J. Marquet, “Assessing voltage quality with relation to harmonics, flicker and unbalance,” *CIGRE WG 36.05*, 1992.