

Impactos do Desequilíbrio de Tensão na Operação de uma Planta Industrial de Conformação de Aço

Gabriel da Silva Lemos
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará - UFC
Fortaleza, CE, Brasil
gabriel.lemos0802@gmail.com

Bárbara Morais Giancesini
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia -
UFU
Uberlândia, MG, Brasil
barbara.giancesini@ufu.br

Raquel Cristina Filiagi Gregory
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará - UFC
Fortaleza, CE, Brasil
rgregory@dee.ufc.br

Resumo: O desequilíbrio de tensão e corrente em sistemas elétricos industriais pode comprometer a eficiência e confiabilidade da operação. Neste tocante, este trabalho tem como objetivo analisar o impacto do desequilíbrio de tensão sobre o fator de desequilíbrio de corrente e as distorções harmônicas em uma indústria do setor metalúrgico. Para isso, foram realizadas medições em campo utilizando um analisador de qualidade de energia e implementada a modelagem computacional da planta industrial no software MATLAB/Simulink. No primeiro estudo de caso, as simulações demonstraram que, à medida que o desequilíbrio de tensão aumenta, há um crescimento linear do desequilíbrio de corrente, o qual é, portanto, predominantemente provocado pelo desbalanceamento da tensão de suprimento. No segundo estudo de caso, avaliou-se a influência do desequilíbrio de tensão sobre as distorções harmônicas, constatando-se que os desequilíbrios provocaram a ocorrência de componentes harmônicas não características e um aumento da distorção harmônica total. Destaca-se que a modelagem computacional desenvolvida mostrou-se uma ferramenta robusta, podendo ser utilizada em estudos futuros da planta industrial.

Palavras-chave: desequilíbrio de tensão, desequilíbrio de corrente, distorção harmônica, modelagem computacional.

Abstract: Voltage and current unbalance in industrial electrical systems can compromise the efficiency and reliability of their operation. In this regard, this study aims to analyze the impact of voltage unbalance on the current unbalance and harmonic distortions in a metallurgical industry. For this purpose, field measurements were performed using a power quality analyzer and computational modeling of the industrial plant was implemented in MATLAB/Simulink software. In the first case study, the simulations demonstrated that, as the voltage unbalance increases, there is a linear increase in the current unbalance, which is predominantly caused by the unbalance of the supply voltage. In the second case study, the influence of voltage unbalance on harmonic distortions was evaluated, finding that the unbalances caused the occurrence of non-characteristic harmonic components and increased the total harmonic distortion. It is noteworthy that the computational modeling developed proved to be a robust tool and that it can be used in future studies of the industrial plant.

Keywords: voltage unbalance, current unbalance, harmonic distortion, computational modeling.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica é fundamental para o funcionamento eficiente e confiável de sistemas elétricos, especialmente no setor industrial, onde a continuidade e a estabilidade do fornecimento de energia são cruciais para a operação dos processos produtivos. De acordo com [1], a qualidade de energia elétrica pode ser definida como a adequação da tensão, frequência e continuidade do fornecimento, de forma que atenda às exigências dos equipamentos conectados ao sistema. Problemas relacionados, como quedas de tensão, harmônicos e desequilíbrios de tensão, podem acarretar perdas significativas de produtividade e custos operacionais elevados.

No Brasil, a qualidade do fornecimento de energia elétrica é regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional de Distribuição (PRODIST). Em seu 8º módulo, o PRODIST apresenta a caracterização dos fenômenos de regime permanente e transitório, bem como os indicadores e respectivos limites de conformidade associados [7]. As diretrizes estabelecidas são fundamentais para a garantia do suprimento de energia de acordo com padrões adequados, especialmente em sistemas industriais, nos quais a continuidade e a confiabilidade do serviço são requisitos obrigatórios para a manutenção dos processos de produção.

Dentre os fenômenos salientados no PRODIST, os desequilíbrios se destacam como uma das principais causas de degradação do desempenho de sistemas industriais, haja vista a característica predominante das cargas presentes nestes sistemas, como motores de indução e inversores de frequência, entre outros equipamentos/dispositivos de alta sensibilidade [1]. Os desequilíbrios ocorrem quando as diferentes fases do sistema apresentam valores de tensão ou corrente distintos em módulo, ou defasagem angular diferente de 120° elétricos entre si, podendo ocorrer de forma isolada ou simultânea [2].

Os desequilíbrios podem ter diversas origens, incluindo a distribuição assimétrica de cargas monofásicas em redes trifásicas, falhas ou desconexões em uma das fases do sistema, assimetrias nas impedâncias da rede elétrica, dentre outros [4]. Além disso, variações no consumo de grandes cargas industriais podem intensificar o desequilíbrio, resultando em impactos negativos como aumento das perdas elétricas, aquecimento excessivo dos equipamentos e redução da vida útil dos motores [10].

Nesse contexto, este trabalho tem o objetivo de avaliar os impactos dos desequilíbrios de tensão na operação de uma planta industrial de conformação de aço, situada no estado do Ceará. A planta industrial apresenta cargas com forte característica motriz, as quais podem ser acionadas de forma direta ou por inversores de frequência. A estratégia de avaliação é conduzida a partir da análise da operação da indústria no que tange os registros de falhas operacionais, bem como por meio de medições em campo para a apuração de indicadores de conformidade de acordo com as diretrizes estabelecidas no Módulo 8 do PRODIST. Além disso, realiza-se a modelagem computacional da indústria de forma a viabilizar um estudo computacional para análise da origem dos desequilíbrios e seu impacto sobre a geração de harmônicos não característicos.

Além desta seção introdutória, o trabalho apresenta uma segunda seção contendo os fundamentos teóricos sobre os desequilíbrios de tensão e corrente, abordando suas causas, efeitos e os requisitos normativos aplicáveis ao problema. Na terceira seção são detalhados os procedimentos experimentais, incluindo a obtenção de registros de campo e a implementação da modelagem computacional no software MATLAB/Simulink. Na quarta seção são discutidos os resultados obtidos, comparando medições reais e simulações para avaliar a influência do desequilíbrio de tensão sobre o desempenho das cargas industriais. Por fim, as conclusões do trabalho são sintetizadas na quinta seção, destacando as principais observações e contribuições do estudo.

II. FUNDAMENTOS SOBRE OS DESEQUILÍBRIOS EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Nesta seção, são apresentados os fundamentos sobre desequilíbrios em sistemas industriais, incluindo suas origens, indicadores utilizados para quantificação do fenômeno e os limites de conformidade estabelecidos pelo PRODIST. Por fim, discute-se os impactos dos desequilíbrios de tensão em complexos industriais, destacando seus efeitos no desempenho dos motores elétricos, na eficiência energética e na confiabilidade dos processos produtivos.

Conforme mencionado, os desequilíbrios ocorrem quando as tensões ou correntes das fases de um sistema elétrico trifásico apresentam diferenças em módulo ou defasagem angular [2]. De acordo com [5], esse fenômeno pode ser causado por uma série de fatores, com destaque aos seguintes:

- Distribuição irregular de cargas monofásicas entre as fases;
- Linhas de distribuição extensas, principalmente na área de distribuição rural;
- Numerosos conjuntos de usuários urbanos;
- Impedâncias assimétricas de linhas de transmissão;
- Transposição incompleta de linhas de transmissão;
- Banco de capacitores deteriorados e/ou com fusíveis de proteção rompidos;

Além disso, a presença de cargas não lineares, como inversores de frequência e retificadores, pode intensificar o desequilíbrio ao modificar os padrões de consumo de corrente nas fases do sistema [3].

A. Indicadores de conformidade

De acordo com módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [7], os níveis de desequilíbrio de tensão podem ser aferidos por meio do indicador definido como Fator de Desequilíbrio (FD), o qual pode ser obtido através do método das componentes simétricas. Nesse método, as tensões são decompostas em componentes fasoriais de sequência positiva, negativa e zero e o Fator de Desequilíbrio de Sequência Negativa pode ser obtido a partir de (1).

$$FDv\% = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde V_1 representa a componente de sequência positiva da tensão e V_2 a componente de sequência negativa. Esse indicador permite avaliar o impacto do desequilíbrio em qualquer barra de um sistema elétrico.

Ainda de acordo com o PRODIST, o FD pode ser calculado utilizando o método CIGRÉ, o qual se baseia no método das componentes simétricas. No entanto, esse método é mais prático e simplificado, uma vez que utiliza apenas as informações dos módulos das tensões de linha do ponto de monitoramento, sendo enunciado por (2) e (3).

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3)$$

A preocupação com os desequilíbrios nas redes elétricas e seus impactos na operação de equipamentos, motivaram os órgãos reguladores de diversos países a estabelecer níveis de conformidade. Para garantir a qualidade dos suprimentos, o módulo 8 do PRODIST define os limites para o fator de desequilíbrio de tensão de acordo com a Tabela 1.

TABELA I
LIMITES DE CONFORMIDADE DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO. FONTE: MÓDULO 8 - PRODIST

INDICADOR	TENSÃO NOMINAL	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0 %	2,0 %

Nota-se, portanto, que os indicadores e limites estabelecidos referem-se meramente às tensões de suprimento. No tocante aos desequilíbrios de corrente, embora possam ser prontamente obtidos pelas expressões (1) e (2), não são estabelecidos valores de referência ou limites de conformidade.

Outro fato relevante se trata dos requisitos de medição para a apuração do indicador FD95%. De acordo com o PRODIST, para as medições, podem ser utilizados analisadores Classe A ou Classe S de acordo com a IEC 61000-4-30 [11]. Para a avaliação de conformidade, devem

ser realizadas medições durante o período de 7 dias consecutivos, a fim de compor um conjunto de 1008 leituras válidas, com agregação temporal de 10 minutos. Dessa forma, o indicador FD95% é apurado aplicando-se o percentil 95% ao conjunto de 1008 leituras válidas.

Quanto aos efeitos nos sistemas industriais, os desequilíbrios de tensão podem provocar impactos expressivos na operação de equipamentos típicos desses sistemas, como transformadores, motores elétricos e inversores de frequência.

No tocante aos transformadores, os desequilíbrios de tensão geram correntes de sequência negativa circulantes nos enrolamentos de fase do transformador, podendo provocar sobrecargas, aumento de perdas e aquecimento [12].

Em motores de indução, a presença de pequenos desequilíbrios de tensão podem provocar a circulação de corrente sequência negativa de elevada magnitude, uma vez que a impedância de sequência negativa destes equipamentos é expressivamente menor que a de sequência positiva. Adicionalmente, as correntes de sequência negativa induzem um campo magnético girante em sentido contrário ao campo principal, gerando torques pulsantes que provocam vibrações, aquecimento excessivo, perdas adicionais e, consequentemente, reduzem a vida útil do equipamento [4], [12].

Outro efeito importante está relacionado à operação de conversores eletrônicos alimentados por tensões desequilibradas. De acordo com [6], a interação entre o desequilíbrio de tensão e cargas não lineares pode resultar no surgimento de harmônicos de ordens não convencionais, denominados por harmônicos não característicos. Esse fenômeno pode afetar o desempenho de dispositivos sensíveis e conectados à mesma rede, ampliando os impactos negativos na indústria [13].

Dessa forma, compreender a origem e os impactos do desequilíbrio de tensão em sistemas industriais é essencial para garantir a operação eficiente e confiável das instalações. Medidas como a compensação de carga, reconfiguração da distribuição de cargas monofásicas, uso de reguladores monofásicos e o uso de compensadores passivos ou ativos podem ser implementados para mitigar os efeitos do desequilíbrio e melhorar a qualidade da energia da planta industrial [5].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi organizada em diferentes etapas objetivando avaliar detalhadamente os impactos dos desequilíbrios de tensão da operação da planta industrial.

Primeiramente, foi realizado o levantamento de cargas, no qual foram coletados e analisados os dados de placa dos motores e transformadores, além das características de acionamento e operação das cargas no processo produtivo da indústria. Além disso, foram avaliados os registros de interrupção da indústria, e também foram realizadas medições em campo utilizando um analisador de energia elétrica. Esse levantamento inicial teve como propósito gerar insumos para a avaliação dos impactos dos desequilíbrios de tensão sobre a operação da planta, bem

como fornecer informações para a modelagem computacional do sistema.

Com base nas informações coletadas, cada carga foi caracterizada individualmente e, em seguida, aquelas com características semelhantes foram agregadas e modeladas no software MATLAB/Simulink®, de forma a garantir que o modelo representasse o comportamento do sistema real da forma mais fidedigna possível.

A. Caracterização da Planta Industrial de Conformação de Aço

Os estudos presentes neste trabalho foram realizados em uma indústria de grande porte do setor metal-mecânico, localizada no estado do Ceará, voltada para a conformação de aço. A planta industrial é alimentada em 13,8 kV pela concessionária de energia local. A indústria conta com duas subestações, sendo uma composta por 3 transformadores e outra por 4 transformadores de 13,8kV/380V, totalizando uma potência de 5,5 MVA. O sistema é destinado a suprir a demanda por energia elétrica de diferentes setores da indústria. A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar simplificado da planta industrial analisada.

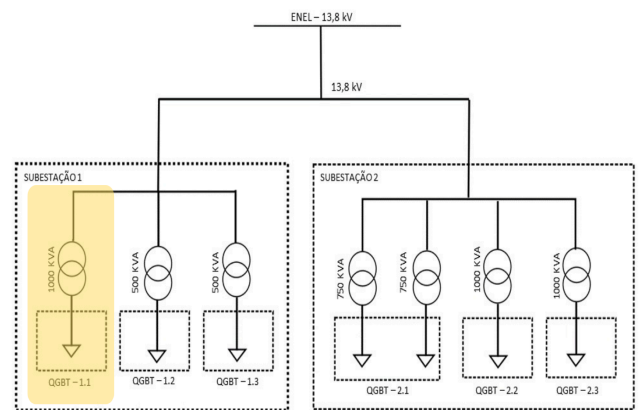


Figura 1. Diagrama unifilar simplificado da planta industrial

O objeto de estudo deste trabalho se tratou do QGBT-1.1 desta indústria, o qual é responsável pela alimentação do setor de laminação e dos compressores industriais. Os compressores desempenham um papel essencial nesta planta, pois fornecem ar comprimido para as máquinas e equipamentos utilizados nos processos produtivos, sendo imprescindíveis para o funcionamento contínuo da indústria.

É válido mencionar que o motivo da escolha do QGBT-1.1 como foco para o estudo realizado, deve-se à sua importância estratégica para o processo produtivo da indústria. Como a maioria das máquinas utiliza acionamentos pneumáticos, ou seja, empregam ar comprimido para gerar movimento mecânico em máquinas e equipamentos, qualquer desequilíbrio que afete a alimentação elétrica desse QGBT pode comprometer o funcionamento dos compressores e, consequentemente, interromper o fornecimento de ar comprimido para a fábrica. Essa interrupção é extremamente prejudicial e impacta diretamente o funcionamento da planta, visto que sua operação depende essencialmente do fornecimento de ar comprimido.

B. Registros em campo

Com o intuito de investigar perturbações frequentes na indústria, primeiramente, foram avaliados os registros de interrupções ocorridas ao longo de seis meses de operação da planta, para o ano de 2024.

A Figura 2 ilustra o quantitativo mensal das paradas de processo devido a falhas nos compressores, totalizando 38 falhas para o período. Os dados demonstram que as falhas no fornecimento de ar comprimido, provocadas por anomalias no suprimento de energia, estão sofrendo um aumento ao longo do tempo, com destaque ao mês de agosto no qual registrou-se 16 ocorrências.

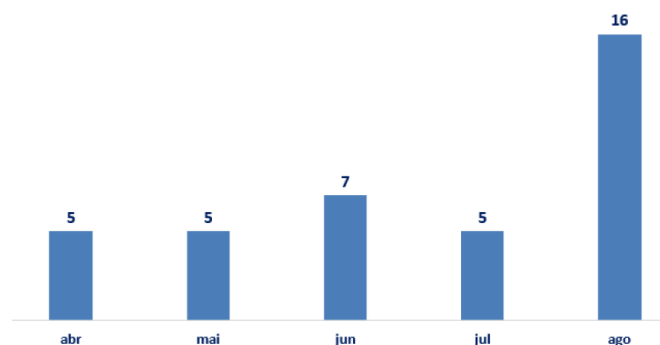


Figura 2. Registros do quantitativo das paradas de processo devido a falhas nos compressores

Além dos registros dos registros das interrupções, foram realizadas medições em campo para verificar a qualidade da energia elétrica à luz do Módulo 8 do PRODIST.

Para realização da análise, foi utilizado um analisador de qualidade, modelo RE6000 da EMBRASUL, o qual foi instalado no barramento do QGBT-1.1. As medições foram realizadas ao longo de um período de 7 dias consecutivos, entre 03/09/2024 e 10/09/2024, com integralização de 10 minutos, de forma a se obter os 1008 registros.

C. Modelagem computacional

Neste trabalho, o *software* MATLAB/Simulink foi empregado para a modelagem do sistema industrial e para os estudos computacionais. A ferramenta foi escolhida por ser amplamente difundida no meio científico, proporcionando uma base sólida e confiável para a validação dos resultados e a realização das análises propostas.

Primeiramente, pondera-se que a indústria é predominante formada por cargas motrizes, contendo um grupo ínfimo de cargas alimentadas por circuitos auxiliares, como iluminação geral, climatização, equipamentos de escritório, entre outros. Ressalta-se, portanto, que esse grupo de cargas não foi representado na modelagem, uma vez que sua influência é desprezível.

Com o intuito de reduzir o esforço computacional ao realizar a modelagem do sistema, os motores com características semelhantes foram agregados em blocos maiores de cargas. Esse agrupamento foi realizado considerando-se os parâmetros de eficiência, potência, escorregamento, fator de potência e forma de acionamento.

Na Tabela II, apresenta-se o agrupamento de cargas do QGBT 1.1, contendo as informações de potência nominal equivalente e a forma de acionamento (direta ou via inversores de frequência).

TABELA II
AGRUPAMENTO DAS CARGAS

	CARGA	INVERSOR	POTÊNCIA TOTAL (kW)
QGBT-1.1	Endireitadeira 3 e 4	NÃO	110
	Torre de osmose – Bomba 1	NÃO	7,5
	Torre de osmose – Bomba 2	NÃO	11
	Torre de osmose – Bomba 3	NÃO	3,7
	Trefila 4 – Motor 1	SIM	36,8
	Trefila 4 – Motor 2	SIM	44,1
	Gerador de Espiras	SIM	180
	Monobloco 3 – Motor 1	SIM	75
	Monobloco 2, trefila 3 e 2, e monobloco 1	SIM	330
	Compressores 1 e 2	NÃO	74
	Compressor 3	SIM	75
	TOTAL		947,1

A modelagem das cargas da planta industrial foi desenvolvida com o objetivo de simular, por meio da ferramenta computacional, o comportamento do sistema frente ao desequilíbrio de tensão.

Para o desenvolvimento da modelagem computacional, utilizou-se o Simulink, na versão R2024b do MATLAB, em conjunto com a biblioteca *Simscape Electrical*. Nos parâmetros de configuração da simulação, utilizou-se o solver *discrete*, no modo *no continuous states*, do tipo *fixed-step*.

Para modelar a rede de média tensão, foi implementado o circuito equivalente de Thévenin nos termos apresentados em [8], ou seja, foi incluída uma fonte de tensão em série com uma impedância. Essa associação permite representar o nível de de curto-circuito do sistema, tal como enunciado em (4):

$$S_{cc} = \sqrt{3} * V * I_{cc} \quad (4)$$

Onde V representa a tensão nominal fase-fase do barramento de entrada da indústria (13,8 kV) e I_{cc} corresponde à corrente de curto-circuito trifásica informada (1,18 kA). A partir dessa equação, obteve-se o valor de 28,2 MVA para a potência de curto-circuito, a qual foi inserida ao bloco do equivalente de rede.

Para realizar a modelagem do transformador, os valores inseridos na simulação foram obtidos a partir dos dados de placa do equipamento. Dessa forma, a modelagem do equivalente do sistema e do transformador de entrada foi inserida no Simulink, conforme ilustra a Figura 3.

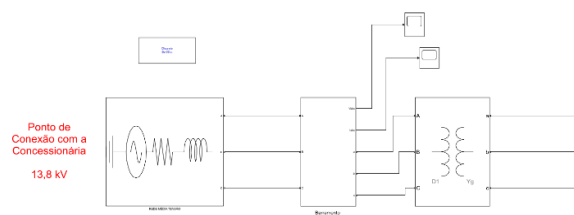


Figura 3. Modelagem da rede de média tensão

Para realizar a modelagem das cargas no Simulink, utilizou-se o bloco de máquina assíncrona disponibilizado na biblioteca da ferramenta. A modelagem computacional dos compressores e demais motores que operam em velocidade fixa, ou seja, sem controle de velocidade por inversores, é representada na Figura 4.

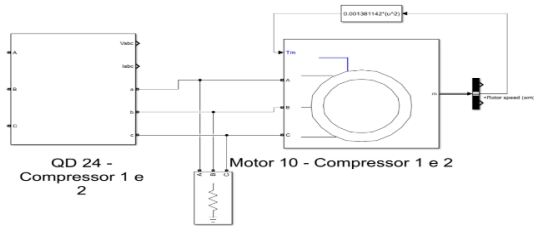


Figura 4. Modelagem das cargas sem controle de velocidade

Para realizar a modelagem dos motores que possuem controle de velocidade, utilizou-se o modelo previsto em [9]. A modelagem do inversor de frequência baseia-se em três etapas principais. A primeira etapa realiza a retificação da tensão alternada, convertendo-a em tensão contínua através de tiristores em ponte. Na segunda etapa, para estabilizar a tensão contínua, é inserido um capacitor no link DC, o qual atua como um filtro para minimizar oscilações. Na terceira etapa é realizada a inversão da tensão contínua em alternada, utilizando a técnica PWM (Modulação por Largura de Pulso). A modelagem das cargas acionadas por inversores de frequência é ilustrada na Figura 5.

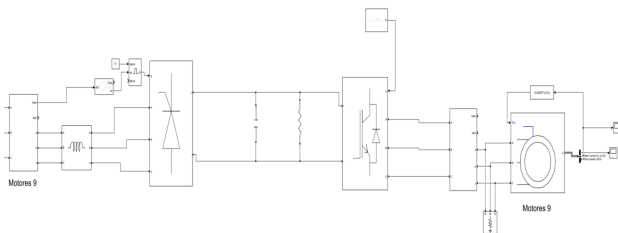


Figura 5. Modelagem de uma das cargas acionadas por inversor

Para avaliar os parâmetros elétricos, utilizou-se um bloco de medição de potência. Na Figura 6, verifica-se o modelo utilizado, no qual a média dos valores das potências instantâneas alimenta o blocos de cálculo da potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência a cada ciclo de 16,67 ms.

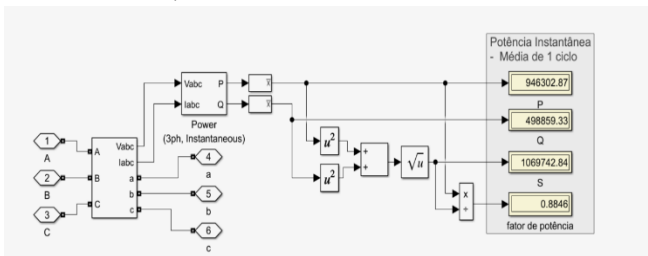


Figura 6. Medidor de potência empregado

D. Validação da modelagem computacional

A modelagem desenvolvida em ambiente computacional foi validada com base nos valores nominais das cargas

conectadas ao QGBT-1.1. Com o objetivo de verificar a precisão da modelagem, realizou-se uma análise quantitativa, comparando-se os valores de potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência obtidos na simulação com os valores nominais extraídos das placas de identificação dos motores. A Tabela III apresenta os valores medidos e simulados, os quais demonstram elevada similaridade. Essa constatação ratifica a aderência da modelagem às características do sistema implementado.

TABELA III
VALORES SIMULADOS E MEDIDOS NO BARRAMENTO DO QGBT-1.1

PARÂMETRO	NOMINAL	SIMULADO
Potência Ativa (kW)	947,10	946,30
Potência Aparente (kVA)	1091,37	1069,74
Potência Reativa (kVAr)	540,47	498,86
Fator de Potência	0,87	0,88

Por fim, a Figura 7 e a Figura 8 ilustram, respectivamente, as formas de onda de corrente e tensão simuladas, obtidas no barramento do QGBT 1.1. De acordo com as figuras, nota-se a presença de distorções harmônicas de corrente e tensão, as quais se manifestam devido à operação dos inversores de frequência que apresentam características não-lineares.

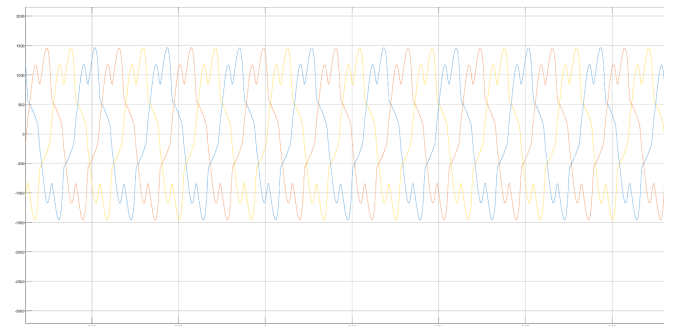


Figura 7. Forma de onda de corrente no barramento do QGBT 1.1

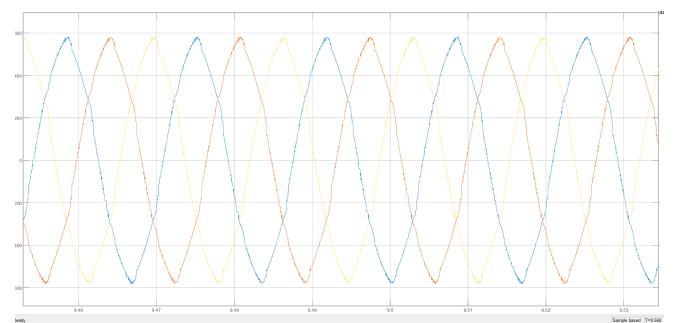


Figura 8. Forma de onda de tensão no barramento do QGBT 1.1

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa, objetivando avaliar os impactos dos desequilíbrios de tensão sobre a operação da planta industrial de conformação de aço. Nesse contexto, foram realizados dois estudos de caso de acordo com o seguinte:

- Caso 1 - Impacto dos desequilíbrios de tensão na operação da planta industrial;
- Caso 2 - Impacto dos desequilíbrios de tensão sobre as distorções harmônicas.

A. Caso 1 – Impacto dos desequilíbrios de tensão na operação da planta industrial

No Caso 1, buscou-se avaliar, primeiramente, o fenômeno do desequilíbrio de tensão a partir dos resultados das medições realizadas, através da apuração do indicador FD95% e da comparação desse valor com os limites estabelecidos no PRODIST. Posteriormente, foram realizadas simulações computacionais para verificar a origem dos desequilíbrios. Nesse aspecto, investigou-se as variações dos desequilíbrios de corrente a partir de diferentes valores de desequilíbrios de tensão impostos à fonte de suprimento. Os resultados foram, então, comparados aos resultados da medição, de forma a ratificar as hipóteses de origem do problema.

Portanto, no tocante às medições em campo, a Figura 9 e a Figura 10 apresentam os registros de corrente e tensão obtidos para o período avaliado.

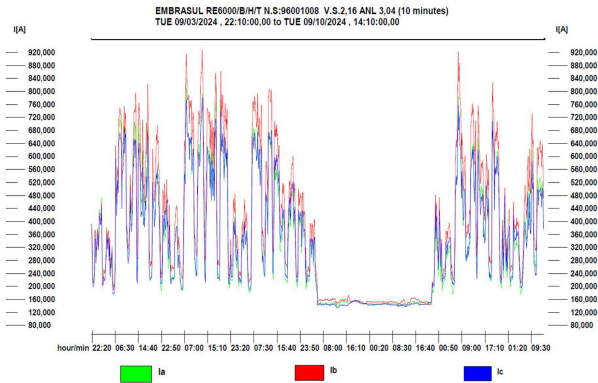


Figura 9. Corrente medida no barramento do QGBT 1.1

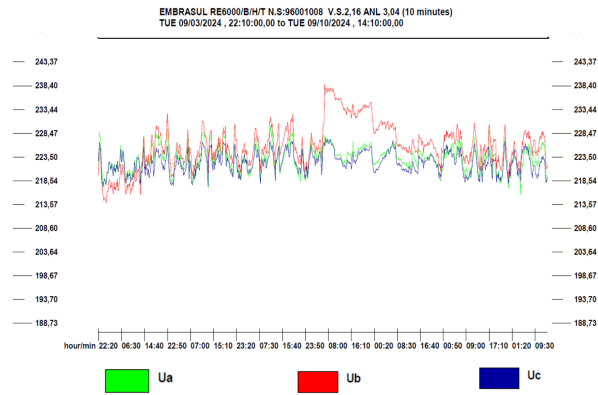


Figura 10. Tensão medida no barramento do QGBT 1.1

A Tabela IV sintetiza os dados agregados ao longo do período de 7 dias de medição, bem como os indicadores FD apurados para o período.

TABELA IV
VALORES MEDIDOS DE FATORES DE DESEQUILÍBRIOS

FASE	TENSÃO EFICAZ (V)			CORRENTE EFICAZ (A)		
	MÉDIA	MIN	MAX	MÉDIA	MIN	MAX
A	223,21	215,77	233,97	339,22	139,5	808,8
B	225,82	213,89	238,57	391,65	142,2	779,1
C	222,29	217,2	229,4	339,22	142,2	779,1
FD95%	1,57%			17,34%		

Com base nas informações supracitadas, o fator de desequilíbrio de tensão apurado foi igual a 1,57%. Além disso, o fator de desequilíbrio de corrente, apurado nos mesmos termos que o de tensão, obteve um valor igual a 17,34%. Nesse sentido, nota-se que, embora o desequilíbrio de tensão corresponda a, aproximadamente, metade do limite indicado na Tabela 1 (3%), esse valor não é desprezível, o que pode provocar efeitos indesejados à operação do sistema.

Um fato interessante se trata do desequilíbrio de corrente identificado. O complexo industrial implementado apresenta cargas majoritariamente equilibradas, visto que se tratam de motores de indução trifásicos. Logo, a hipótese considerada é que os desequilíbrios de corrente sejam originados pelos desequilíbrios de tensão pré-existente na rede de suprimento (condição de *background*).

Para verificar a condição de *background*, recorreu-se aos estudos computacionais, nos quais foi possível manipular os desequilíbrios impostos à tensão de suprimento e verificar sua influência sobre a origem dos desequilíbrios de corrente. Nesse contexto, foram impostos desequilíbrios de tensão de 0% a 5%, com degraus de 0,5%, e verificados os desequilíbrios de corrente resultantes do processo. Os resultados desse estudo são sintetizados na Tabela V.

TABELA V
FATORES DE DESEQUILÍBRIOS SIMULADOS

FDv	FDi
0%	0,02%
0,5%	3,82%
1,0%	7,82%
1,5%	15,54%
2,0%	17,31%
2,5%	20,08%
3,0%	24,05%
3,5%	27,99%
4,0%	31,98%
4,5%	35,91%
5,0%	39,83%

Desta forma, verifica-se que, para a condição na qual o desequilíbrio de tensão é nulo, o desequilíbrio de corrente também o é. Por outro lado, conforme aumenta-se o desequilíbrio de tensão, o desequilíbrio de corrente aumenta de forma praticamente linear. A Figura 11 ilustra, em termos gráficos, o comportamento mencionado.

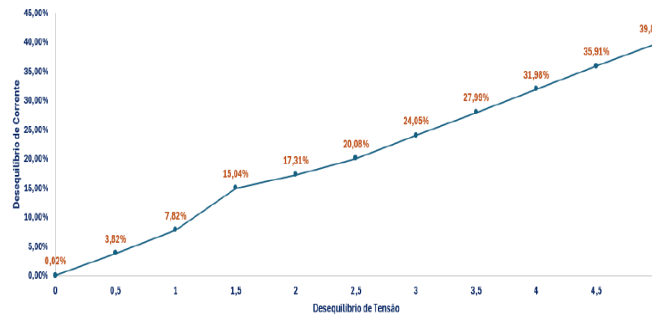


Figura 11. Influência do FDv% sobre o FDi%

Adicionalmente, a Tabela VI apresenta o comparativo entre os valores medidos e simulados na condição exata em que a fonte de suprimento apresenta um desbalanceamento de 1,57%.

TABELA VI
COMPARAÇÃO ENTRE OS FATORES DE DESEQUILÍBRIO
MEDIDOS E SIMULADOS

FATORES DE DESEQUILÍBRIOS	MEDIDO (P95)	SIMULADO
FDv	1,57%	1,57%
FDi	17,34%	15,54%

Portanto, comparando o valor medido (17,34%) ao simulado (15,54%) ratifica-se que o desequilíbrio de corrente identificado tem origem no desbalanceamento da tensão de suprimento, a qual é responsabilidade da concessionária de energia local. Além disso, a proximidade entre esses valores comprova a robustez da ferramenta computacional desenvolvida.

B. Caso 2 – Impacto dos desequilíbrios de tensão sobre as distorções harmônicas

Neste estudo de caso, analisou-se a influência do desequilíbrio de tensão sobre os níveis de distorção harmônica no industrial. Inicialmente, a partir das medições realizadas em campo, foi possível identificar os níveis de distorção harmônica do período monitorado.

A partir dos registros obtidos, foi realizado o cálculo das distorções harmônicas totais de corrente (DTI) e tensão (DTT) por fase, aplicando o percentil 95% sobre os 1008 registros apurados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela VII.

TABELA VII
DISTORÇÕES HARMÔNICAS MEDIDAS POR FASE

FASE	DTT P95%	DTI P95%
A	5,60%	37,49%
B	6,13%	34,40%
C	5,60%	36,97%
MÉDIA	5,78%	36,29%

De acordo com o PRODIST, os valores apurados estão abaixo do limite de 10%, estabelecido para as distorções harmônicas totais de tensão (DTT) em sistemas com tensão nominal inferior a 2,3kV. Salienta-se que as distorções harmônicas individuais não foram registradas devido às limitações do analisador utilizado no estudo, visto que o dispositivo não permite agregar as ordens individuais para a apuração do indicador estatístico.

Diante dessa limitação e tendo em vista os impactos que os desequilíbrios de tensão podem provocar na geração de harmônicos da indústria, foram conduzidos novas simulações computacionais utilizando a ferramenta desenvolvida, visando verificar o impacto dos desequilíbrios de tensão na geração de harmônicos da indústria.

Inicialmente, no ambiente computacional, realizou-se a simulação do sistema considerando um cenário ideal, ou seja, quando as tensões de suprimento são completamente simétricas. Em seguida, a segunda simulação foi realizada por meio da imposição de um desequilíbrio de tensão de 1,57% à fonte de suprimento. Esse valor foi escolhido por se tratar do FD95% apurado a partir das medições em campo.

Dessa forma, para a condição na qual a fonte é equilibrada, a Figura 12 e a Figura 13 apresentam, respectivamente, as distorções harmônicas totais de tensão e corrente obtidas via simulação, bem como o espectro harmônico contendo as ordens predominantes.

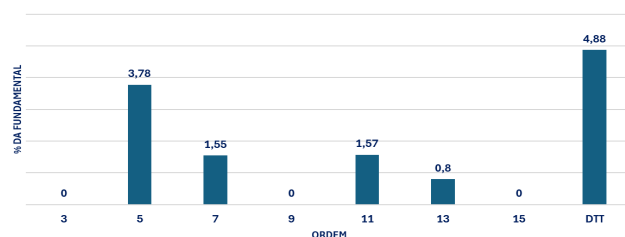


Figura 12. Espectro harmônico de tensão no barramento no QGBT-1.1 obtido via simulação - fonte equilibrada

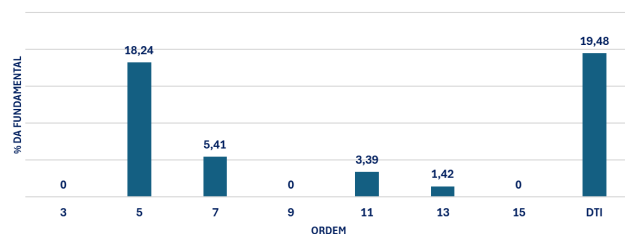


Figura 13. Espectro harmônico de corrente no barramento no QGBT-1.1 obtido via simulação - fonte equilibrada

Nota-se, portanto, que para a condição na qual a rede de suprimento é equilibrada, se fazem presentes as distorções harmônicas de tensão e corrente de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens, com predominância da 5ª ordem, a qual atinge valores de 3,78% de distorção de tensão e 18,24% de distorção de corrente. A média quadrática das ordens individuais resulta na distorção harmônica total, a qual atingiu valores de 4,88% para as distorções de tensão e 19,48% para as distorções de corrente. De fato, esse comportamento é esperado, uma vez que a indústria modelada apresenta diversos inversores de frequência de 6 pulsos (carga não linear), cuja operação leva ao surgimento de harmônicos característicos ($6k \pm 1$).

Na sequência, são evidenciados os resultados de simulação para a condição na qual a fonte de suprimento apresenta um desequilíbrio de tensão de 1,57%. A Figura 14 e a Figura 15 ilustram essa situação mediante a apresentação dos espectros harmônicos e distorções harmônicas totais de tensão e corrente, respectivamente.

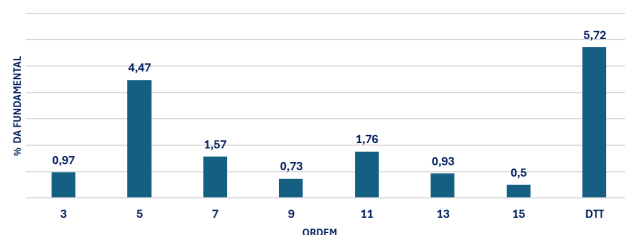


Figura 14. Espectro harmônico de tensão no barramento no QGBT-1.1 obtido via simulação - fonte desequilibrada

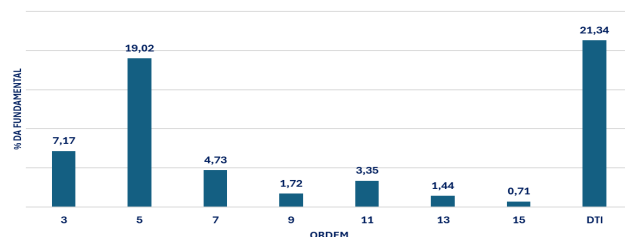


Figura 15. Espectro harmônico de corrente no barramento no QGBT-1.1 obtido via simulação - fonte desequilibrada

As figuras supracitadas evidenciam o impacto do desequilíbrio de tensão nas distorções harmônicas do sistema. Ao comparar ambos cenários do Caso 2 (fonte equilibrada versus desequilibrada), verifica-se o surgimento de outras ordens harmônicas além daquelas originalmente presentes. As ordens 3ª, 9ª e 15ª são, portanto, “não características” por não estarem presentes na condição ideal de operação dos conversores. Como resultado, a distorção harmônica total de corrente sofre um aumento de 19,48% para 21,34%, o que também impacta na distorção de tensão, com acréscimo de 4,88% para 5,72%.

Por fim, comparando-se a DTT obtida via simulação (5,72%), com a DTT95% apurada pelos registros de medição, considerando a média entre as fases (5,78%), nota-se a elevada similaridade entre os valores medidos e simulados. As diferenças manifestadas, principalmente com relação às distorções totais de corrente (21,34% simulado e 36,29% medido), se justificam pela presença de distorções de *background*, as quais não foram consideradas na análise.

Dessa forma, conclui-se que os resultados obtidos via simulação estão aderentes às condições evidenciadas na prática, cujos estudos computacionais permitiram identificar a origem dos desequilíbrios da indústria, seu impacto na geração de harmônicos não característicos e também no aumento das distorções harmônicas.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou o impacto dos desequilíbrios de tensão na operação de uma planta industrial de conformação de aço, destacando seus efeitos na qualidade da energia elétrica do complexo industrial.

Inicialmente, a partir das medições em campo, verificou-se um fator de desequilíbrio de tensão de 1,57%, abaixo do limite indicado no PRODIST. Todavia, a manifestação de expressivos desequilíbrios de corrente (17,34%) levantou um questionamento com relação à origem do distúrbio. Para aprofundar nessa análise, foram realizadas simulações computacionais, variando-se os desequilíbrios de tensão da fonte de suprimento e verificando-se os desequilíbrios de corrente resultantes desse processo. Os resultados indicaram um crescimento praticamente linear do fator de desequilíbrio de corrente em função do aumento do desequilíbrio de tensão. Além disso, foi constatado que o desequilíbrio de corrente da indústria é predominantemente provocado pelo desbalanceamento da tensão de suprimento.

No tocante ao impacto dos desequilíbrios de tensão sobre a geração de harmônicos da indústria, os registros de campo detectaram a presença de distorções harmônicas totais de tensão, com valor médio entre as fases na ordem de 5,78%. Embora esse valor esteja abaixo dos limites recomendados, os resultados computacionais indicaram que essa distorção sofre influência direta do suprimento desequilibrado, o qual provoca o surgimento de componentes harmônicas não características e o aumento da distorção harmônica total de corrente e tensão.

Por fim, ressalta-se que a modelagem computacional desenvolvida mostrou-se uma ferramenta robusta para a análise dos fenômenos aqui tratados, permitindo avaliar diferentes cenários operacionais e suas consequências. Para estudos futuros, recomenda-se a aplicação da ferramenta

desenvolvida para investigação de soluções que minimizem as perturbações evidenciadas.

REFERÊNCIAS

- [1] ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R.; CHEN, S. Power System Quality Assessment. New York: Wiley, 2000.
- [2] Gosbell, V., Perera, S., Smith, V. (2002). Voltage Unbalance. Technical Note 06, Integral, Energy Power Quality Centre, University of Wollongong, School of Electrical, Computer & Telecommunications Engineering.
- [3] DUGAN, Roger C. et al. Electrical Power Systems Quality. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002. 525 p. Electrical Power Systems Quality, Second Edition.
- [4] LIMA, E. C. Diagnóstico de Motores de Indução Trifásicos Operando em Redes Desequilibradas e Distorcidas. 2016. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- [5] Beneteli, Tatiana Aparecida Pereira. Métodos para limitação de índices de desequilíbrio de máquinas elétricas trifásicas em sistemas de distribuição. 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.
- [6] P. Gnancinski. 'Effect of unbalanced voltage on windings temperature, operational life and load carrying capacity of induction machine, Energy Convers. Manag. 49 (April (4)) (2008) 761–770.
- [7] Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8, 07/12/2021. Resolução 956/2021 da Aneel.
- [8] Giancesini, Barbara Moraes. Compartilhamento de responsabilidades harmônicas: implementação de benchmark do IEEE e aplicação de metodologias. 2020. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020
- [9] Gonçalves, Amanda Sousa. Modelagem computacional e análise das distorções harmônicas em um complexo industrial. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- [10] Ando Junior, Oswaldo Hideo. Desenvolvimento de uma metodologia para identificar e quantificar distúrbios da qualidade de energia elétrica. 2009. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [11] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-4-30: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. 3rd ed. Geneva: IEC, 2015.
- [12] JOUANNE, A. VON; BANERJEE, B. (BEN). Assessment of Voltage Unbalance. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 16, n. 4, p. 782–790, 2001. <https://doi.org/10.1109/61.956770>
- [13] NASCIMENTO, C. F. et al. Analysis of Noncharacteristic Harmonics Generated by Voltage-Source Converters Operating Under Unbalanced Voltage. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 32, n. 2, p. 951–961, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2593684>