



ESTUDO DOS IMPACTOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO SOBRE UM FREEZER ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL

Daniel F. Barros^{*1}, Júlia F. P. Mendonça², Alessandro J. S. Ferreira³, Maria E. G. Veloso⁴, Diego L. Vilas Bôas⁵, Alexa B. Bonatto⁶, Ana F. S. Alves⁷ e Mikaelle O. Ribeiro⁸

¹⁻⁸UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

Resumo - A crescente dinâmica e o desenvolvimento do Sistema Elétrico de Potência afeta e aumenta a complexidade no controle e regulação da Energia Elétrica, assim faz-se necessário o estudo da qualidade de energia elétrica, a fim de analisar os efeitos causados pela rede elétrica em diversos âmbitos, sendo um deles o uso de equipamentos domésticos conectados a rede. Nesse sentido o presente artigo, estuda os efeitos de afundamentos de tensão em um compressor de um freezer doméstico. Com o auxílio do software RSCAD, foi possível simular distúrbios na tensão de alimentação, com intuito de representar as possíveis ocorrências dos afundamentos em um freezer. Assim, ao observar os resultados obtidos, nota-se que além dos prejuízos decorrentes das paralisações de máquinas, podem ocorrer sobrecorrentes, resultando em problemas como perda da vida útil do equipamento. Desse modo, nota-se que, para afundamentos de ordem e de intensidade moderadas, o compressor é capaz de suportar tais ocorrências sem comprometer seu funcionamento. O grau dos possíveis danos decorrentes é determinado de acordo com a sensibilidade da carga às variações de velocidade do compressor.

Palavras-Chave - Afundamentos de Tensão; Compressor; Qualidade de Energia Elétrica; RSCAD; VTCD.

STUDY OF VOLTAGE SAGS IMPACTS ON A FREEZER THROUGH REAL-TIME SIMULATIONS

Abstract - Due to the growing development and use of electronic equipment, of which a large part doesn't have a linear relationship between voltage and current, it's necessary to study the power quality in order to analyze the effects caused on the electrical network with the insertion of such equipment. In this manner, this work describes the effects of voltage sags in a compressor of a household freezer, based on the power supply network. With the assistance of RSCAD software, it was possible to simulate disturbances in the mains supply, in order to represent the possible occurrences of sags in the freezer. Therefore, observing the results obtained, it's noted that, besides the losses due

the machine stoppages, overcurrents may occur, resulting in problems such as reduction of the equipment's lifespan. Thus, the compressor is able to withstand moderate sags without compromising its operation. The level of possible damage is determined according to the sensitivity of the load to variations in speed.

Keywords - Compressor; Electric Power Quality; RSCAD; SDVV; Voltage Sag.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica (QEE) trata dos fenômenos eletromagnéticos que caracterizam as tensões e correntes em um local e tempo do sistema elétrico [1]. Os estudos de QEE consistem na análise e verificação dos distúrbios presentes no sistema, tais como harmônicos e variações de tensão, que aumentaram com a crescente inserção de equipamentos não-lineares no âmbito residencial [8].

As variações de tensão de curta duração são caracterizadas por apresentarem desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo, menores que 3 minutos [2] e são divididas em afundamentos, elevações e interrupções de tensão. Além disso, como possuem duração inferior a 3 minutos, não são contabilizadas nos indicadores de continuidade.

O foco deste trabalho são os afundamentos de tensão, os quais possuem uma redução do valor eficaz da tensão que varia de 0,1 a 0,9 p.u., com duração de $1/2$ ciclo a 3 minutos [3]. Esses distúrbios têm como causas curtos-circuitos no sistema, energização de grandes blocos de carga, incluindo a partida de grandes motores e provocam problemas como perda de dados e erros de processamento, desligamento de equipamentos, oscilações em motores e redução de sua vida útil.

Devido aos impactos que esses distúrbios podem gerar a diversos equipamentos, o presente artigo tem o intuito de demonstrar os estudos sobre afundamentos de tensão em um compressor de um freezer.

II. METODOLOGIA APLICADA

A simulação foi realizada utilizando o software RSCAD da RTDS Technologies [4], principal interface que permite in-

*danielbarros8200@gmail.com

tegração com o *hardware* RTDS (*Real Time Digital Simulator*), no qual se realiza a simulação em tempo real de um sistema elétrico de potência (SEP), possibilitando a simulação de *hardware-in-the-loop*. Ambos são desenvolvidos pela empresa *RTDS Technologies*. A modelagem da rede de alimentação e do *freezer* foi realizada como apresentado na Figura 1.

Conforme a modelagem, a ocorrência dos distúrbios será simulada no primário do transformador através de uma fonte controlada, representando situações em que os mesmos ocorrem na rede. Com isso as formas de onda de tensão vistas no secundário apresentam uma queda de tensão provocada pela reatância do transformador. Os dados usados para a modelagem do transformador estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de Modelagem do Transformador

Potência Nominal Trifásica (kVA)	150
Frequência de Operação (Hz)	60
Indutância de Dispersão (p.u.)	0,0461
Perdas sem Carga (p.u.)	0,0064
Perdas no Cobre (p.u.)	0,0154
Tensão Primária (kV)	13,8
Tensão Secundária (V)	220
Conexão	Delta-estrela aterrado

A fim de simular e observar os efeitos do afundamento de tensão no *freezer*, foi modelado um circuito equivalente aproximado. Utilizaram-se os dados técnicos, presentes na parte traseira do *freezer*, assim como no Manual “*Freezer vertical F250*”, da *Electrolux*, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações Técnicas Nominais do Compressor

Tensão (V)	115
Corrente (A)	2,49
Potência (W)	197
Frequência (Hz)	60
Variação Admissível de Tensão (V)	103-135

Ao realizar a modelagem do circuito elétrico do *freezer*, seguiram-se as características e limitações do RSCAD:

- Termostato: a operação do dispositivo limitou-se à reprodução da partida do compressor;

- Relé de partida: representou-se através de um disjuntor, controlado através de um circuito comparador. Enquanto a rotação do compressor situa-se abaixo de 80% de seu valor nominal, o disjuntor permanece fechado; quando esta velocidade é atingida, o disjuntor se abre, cessando a circulação de corrente pelo enrolamento auxiliar;
- Compressor: seu controle foi efetuado através da definição do torque mecânico, a partir do quadrado da velocidade de rotação do compressor.

De acordo com [5], é possível variar a velocidade em que ocorre o torque máximo, ao inserir resistências externas no rotor, visto que a maior parte dos parâmetros elétricos do motor operam como constantes.

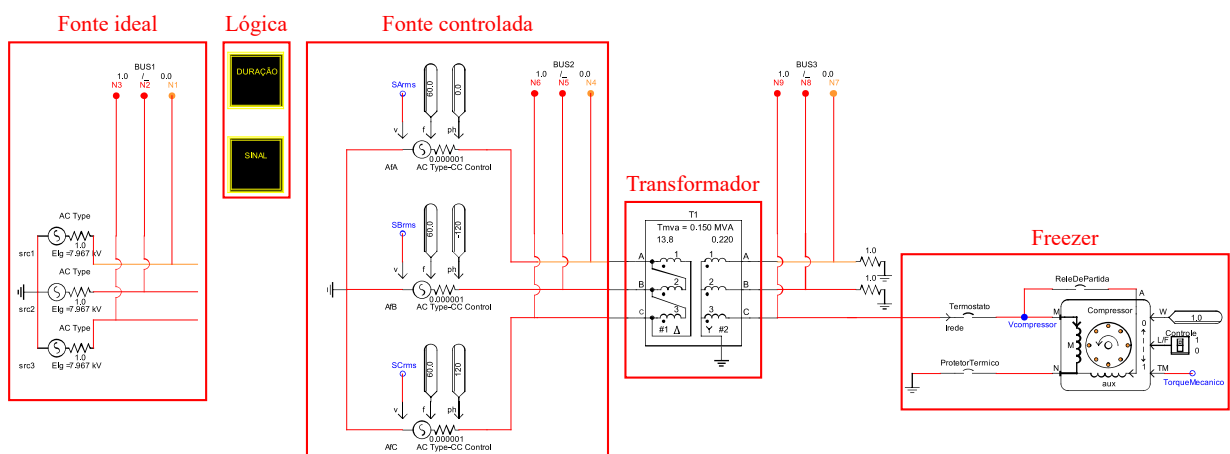
Partindo destes pressupostos e dos parâmetros apresentados por [6], foram realizadas diversas simulações modificando estas resistências e reatâncias a fim de encontrar uma resposta muito próxima dos valores nominais do refrigerador (corrente, potência ativa e potência aparente). Adotou-se, então, os valores das resistências e reatâncias dos enrolamentos como sendo os parâmetros elétricos dispostos na Tabela 3. Ademais, os parâmetros mecânicos constante de inércia e amortecimento de fricção, foram estipulados com base no exposto no trabalho de [7].

Tabela 3: Parâmetros Elétricos e Mecânicos

Resistência do enrolamento principal (Ω)	1,79
Reatância de dispersão do enrolamento principal (Ω)	9,95
Reatância de magnetização insaturada (Ω)	169,13
Resistência do enrolamento auxiliar (Ω)	6,67
Reatância de dispersão do enrolamento auxiliar (Ω)	3,59
Resistência do rotor (Ω)	3,51
Reatância de dispersão do rotor (Ω)	2,53
Proporção de espiras: auxiliar/principal (Ω)	1,91
Constante de inércia – H (MWS/MVA)	0,372
Amortecimento de fricção – D (p.u./p.u.)	0,1

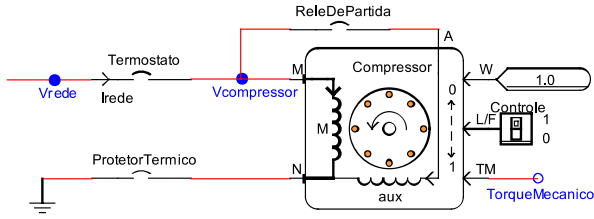
Fonte: Adaptado de [6] e [7]

Figura 1: Diagrama da rede e do *Freezer*



Assim sendo, por meio do circuito do *freezer* modelado apresentado na Figura 2, foi realizada a simulação no RSCAD:

Figura 2: Circuito do Freezer modelado no RSCAD



Os níveis de afundamento de tensão, bem como a duração dos distúrbios em ciclos, foram definidos, obedecendo a classificação de VTCDs conforme o Módulo 8 do PRODIST [3], de forma a conter diversas classes de afundamento entre os intervalos e durações variadas, como representado na Tabela 4.

Tabela 4: Níveis de tensão e duração utilizados nos ensaios de afundamento de tensão

Tensão (% V_n)	Duração (ciclos)
20	1
40	5
50	10
55	25
70	50

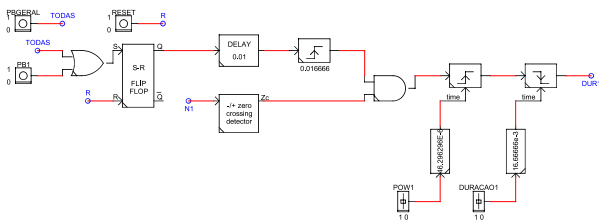
Fonte: Adaptado de [3] e [6]

A. Lógica de controle para a duração dos afundamentos momentâneos de tensão

Nessa parte da lógica, apresentada na Figura 3, o comando para a ocorrência do afundamento de tensão é feito pelo usuário na interface do *software*, podendo ser aplicado um afundamento tanto monofásico quanto trifásico.

Esse comando gera um sinal que é mantido pelo período de um ciclo de onda, tempo suficiente para que seja detectada uma passagem pelo zero da tensão de referência. Por fim, na parte final da lógica, determina-se o ponto da onda de tensão em que o fenômeno será aplicado e a sua duração em ciclos.

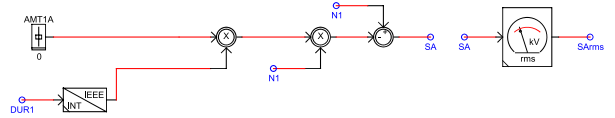
Figura 3: Lógica de controle para a duração



B. Lógica de controle para o valor da tensão dos afundamentos momentâneos

Já na lógica do valor da tensão, ilustrada na Figura 4, enquanto o distúrbio estiver ocorrendo, é reduzido da tensão de referência um valor determinado pelo usuário. A tensão resultante é responsável por alimentar o sistema. Observa-se que, quando não há o fenômeno, a tensão implementada na fonte equivalente da rede equipara-se à tensão da fonte ideal.

Figura 4: Lógica de controle para o valor da tensão dos afundamentos momentâneos



III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Afundamentos na rede com carga puramente resistiva

A fim de se validar o comportamento do sistema modelado frente à lógica implementada, colocou-se uma carga puramente resistiva no secundário do transformador e simulou-se um afundamento de tensão trifásico na rede, com duração de três ciclos e tensão remanescente de 0,7 p.u. As Figuras 5 e 6 mostram a ocorrência do distúrbio tanto no primário quanto no secundário do transformador.

Figura 5: Afundamento para 0,7 p.u. – Primário

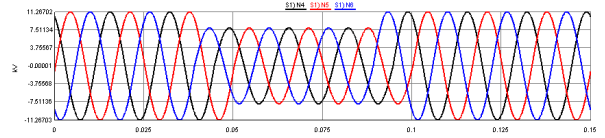
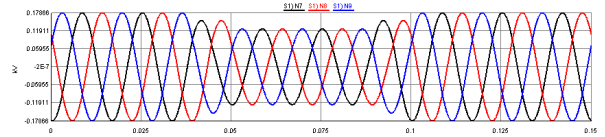


Figura 6: Afundamento para 0,7 p.u. – Secundário



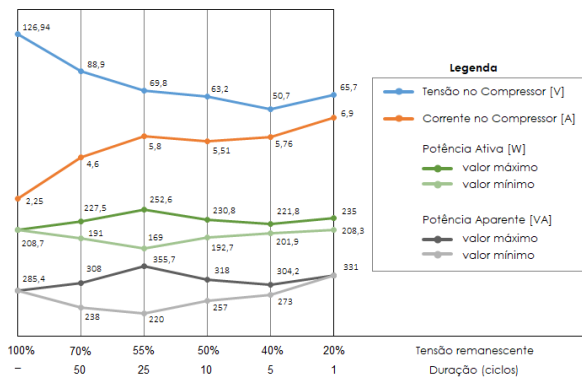
Nota-se que o sistema se comportou conforme o esperado, isto é, com as ondas de tensões variando conforme o fenômeno. Destaca-se que a diferença na magnitude no início e no final do distúrbio é decorrente da ligação Dy_{n1} do transformador.

B. Afundamentos na rede com o freezer

Apesar de terem sido realizadas simulações para diversas condições de afundamento, para tornar os resultados mais sucintos, foram expostas apenas as curvas que se mostraram mais danosas à integridade do compressor, considerando as condições observadas da corrente.

Analisando a Figura 7, nota-se que houveram três condições de afundamento com os maiores valores de pico para a corrente no compressor. Contudo, ressalta-se que no caso do afundamento para 0,2 p.u., a duração de apenas 1 ciclo não permitiu que a tensão alcançasse o valor de afundamento esperado devido ao transitório inerente, não apresentando grandes riscos ao compressor. Dessa forma, escolheram-se os afundamentos para 0,55 p.u. e 0,4 p.u. com o intuito de aprofundar a análise.

Figura 7: Panorama geral dos resultados



C. Afundamento para 0,55 p.u.

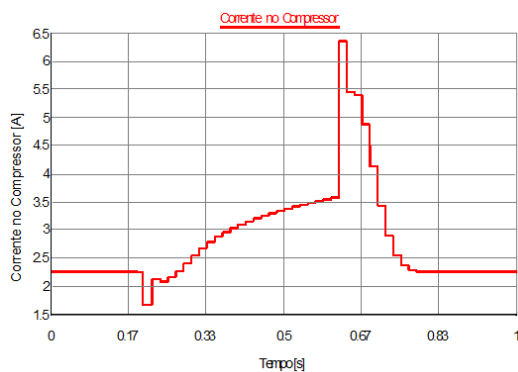
- Tensão no Compressor (V)

Primeiramente, simulou-se um afundamento para 0,55 p.u., com duração de 25 ciclos. Obteve-se uma tensão mínima no compressor de 69,85 V, que equivale a aproximadamente 55,03% da V_n .

- Corrente do Compressor (A)

Quanto à corrente do compressor, mostrada na Figura 8, pode-se observar que também houve um aumento excessivo, sendo o seu valor RMS máximo correspondente a 281,1% da corrente nominal. Analisando esse ponto, observa-se que na condição de afundamento, enquanto a tensão atingiu valores mínimos, a corrente atingiu elevado valor.

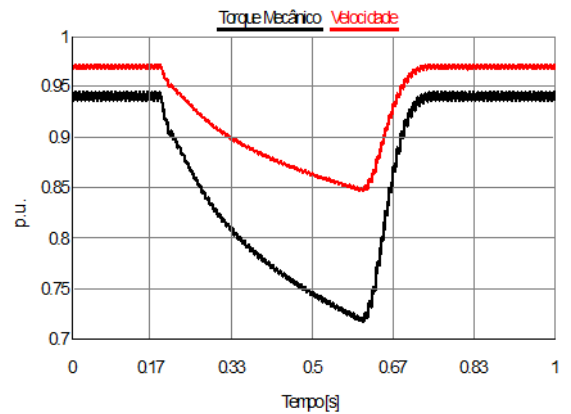
Figura 8: Comportamento da corrente durante o afundamento para 0,55 p.u.



- Torque Mecânico e Velocidade do Compressor

O torque mecânico e a velocidade do compressor tiveram uma queda acentuada no instante de início do distúrbio. Comparando-se os valores nominais com os obtidos através da simulação, verifica-se que houve uma queda máxima de 28,4% para o torque mecânico e 14,1% para a velocidade, vide Figura 9.

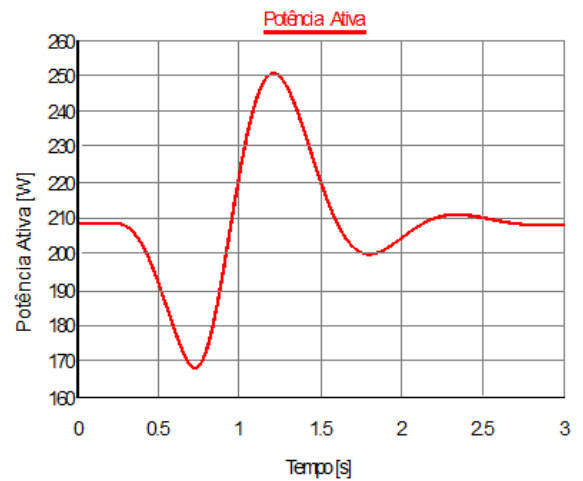
Figura 9: Comportamento do torque mecânico e da velocidade durante o afundamento para 0,55 p.u.



- Potência Ativa (W)

Analisando o gráfico da potência ativa, Figura 10, observa-se que há uma queda e, logo após, um aumento do seu valor. Mais detalhadamente, após a potência ativa atingir o valor mínimo (cerca de 75,8% do nominal), esta demonstra um crescimento elevado, alcançando um valor máximo de 19,7% superior ao obtido em condição de alimentação nominal.

Figura 10: Comportamento da potência ativa durante o afundamento para 0,55 p.u.



De forma análoga ao comportamento da potência ativa, a potência aparente apresenta uma queda acentuada logo após o início do distúrbio, atingindo um valor mínimo. Em seguida, a potência aparente apresenta um aumento, fazendo com que o valor máximo seja 24,2% maior em comparação com o valor da potência aparente em condições nominais.

D. Afundamento para 0,4 p.u.

- Tensão no Compressor (V)

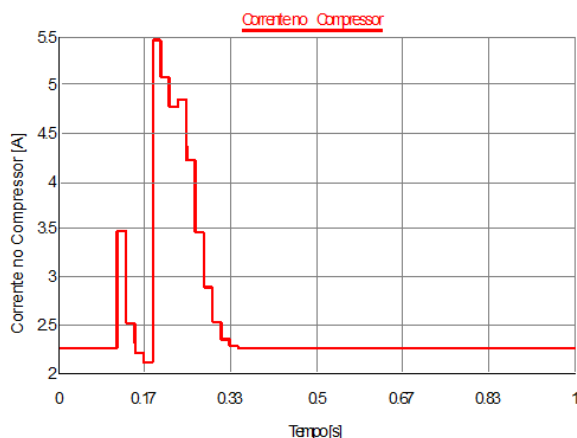
Para um afundamento para 0,4 p.u. e duração de 5 ciclos, a tensão no compressor modelado chegou no valor

mínimo de 50,7 V, correspondente a 40 % da tensão nominal (V_n).

- Corrente do Compressor (A)

Já no caso da corrente demandada pelo compressor, conforme ilustrado na Figura 11, o valor RMS máximo foi na ordem de 244% da corrente nominal.

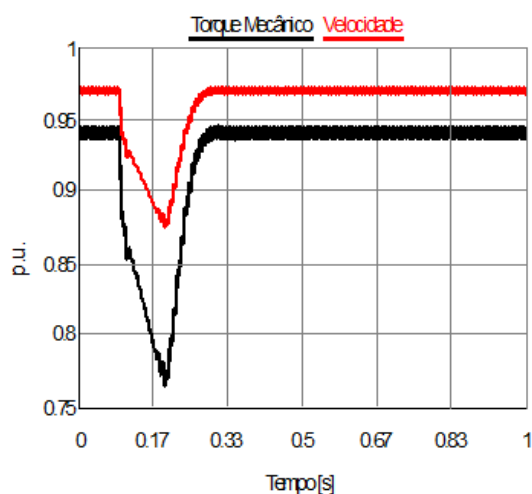
Figura 11: Comportamento da corrente durante o afundamento para 0,4 p.u.



- Torque Mecânico e velocidade do Compressor

Como esperado, o torque mecânico e a velocidade apresentaram uma queda considerável, não sendo maior devido à curta duração do afundamento causado, vide Figura 12. Desse modo, ressalta-se que a queda nas grandezas observadas ocorreu quase ao mesmo tempo do início do distúrbio. A velocidade apresentou uma queda máxima de 10,2%, enquanto o torque mecânico chegou a ter uma queda de 22,0%.

Figura 12: Comportamento do torque mecânico e da velocidade durante o afundamento para 0,4 p.u.

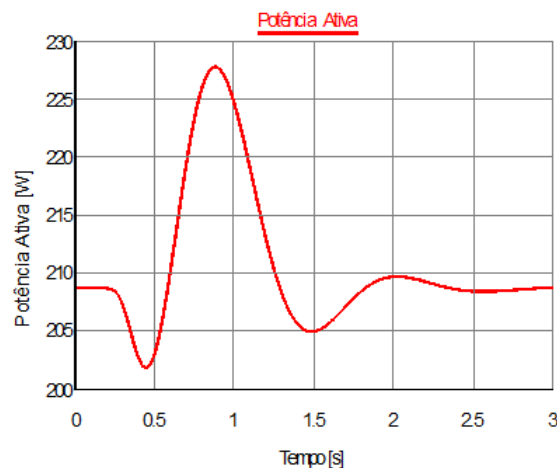


- Potência Ativa (W)

De forma similar ao gráfico da Figura 10, a potência ativa teve o mesmo comportamento, porém, agora com um valor máximo 9,2% maior que a potência ativa em

condição normal, conforme a Figura 13. A potência aparente também apresentou a mesma característica de resposta.

Figura 13: Comportamento da potência ativa durante o afundamento para 0,4 p.u.



Observando os resultados obtidos nas simulações, é possível verificar que os afundamentos de tensão, além de trazerem prejuízos decorrentes da paralisação das máquinas, podem também causar sobrecorrentes de até 3 vezes a corrente nominal. Por conta disso, diversos problemas podem surgir com a frequente reincidência do evento, como, por exemplo, o aquecimento das bobinas do compressor, que acarretam na diminuição da vida útil do equipamento.

Além disso, ao aplicar o distúrbio, percebe-se nos gráficos de torque mecânico e de velocidade que há uma queda e na sequência, a reaceleração do compressor hermético, sendo assim, o contator e a proteção de subtensão devem ser adequadamente coordenados para suprimir os piores casos desses fenômenos e evitar possíveis condições de estresse térmico do motor, e até mesmo para cargas sensíveis próximas.

IV. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pôde-se analisar o impacto de um afundamento de tensão momentânea nas grandezas elétricas do compressor do freezer. Sabe-se que esses equipamentos podem suportar a maioria dos afundamentos de tensão sem comprometer seu funcionamento, desde que a duração e a intensidade do distúrbio sejam moderadas. Nesse sentido, o grau dos danos devido aos afundamentos será determinado pela sensibilidade da carga às variações de velocidade.

No entanto, as variações da corrente provenientes das quedas repentinas de tensão podem vir a comprometer o isolamento dos motores, por conta da reincidência do afundamento. Além disso, essa característica causa altos impulsos transitórios dos torques eletromagnéticos, resultando na avaria do eixo e de certos tipos de cargas acopladas. Portanto, a investigação apontou as variações abruptas de corrente como os principais problemas que podem ser originados por conta desse distúrbio.

Como próximos desenvolvimentos, pretende-se incorporar as análises destes distúrbios sobre o equipamento real, considerando a modelagem do sistema de fornecimento de energia

e utilizando a montagem *hardware-in-the-loop* no laboratório. Assim, poder-se-á comparar os resultados simulados com os alcançados através de ensaios.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, S. Santoso, M. F. McGranaghan, and W. Beaty, *Electrical power systems quality*. New York: McGraw-Hill Education, 2012.
- [2] T. M. Galvão, F. N. Belchior, P. R. M. Silveira, M. C. Filho, and L. C. Romaro, “Análise Comparativa entre Resultados de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica”, *XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE)*, 2015.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, p. 20. 2021.
- [4] “Home - RTDS Technologies”. Acedido em: 22 de Agosto de 2021, em: <https://www.rtds.com/>
- [5] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 2th ed. New York: Wiley-Blackwell, 2002.
- [6] A. C. Azevedo, “Desempenho de Aparelhos Refrigeradores no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002. Acedido em 23 de fevereiro de 2021, Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2002.34>
- [7] C. Mardegan, “Interface com a Concessionária”, *O Setor Elétrico*, Edição 63, pp. 22-36. Maio de 2011.
- [8] K. Nikum, R. Saxena and A. Wagh, "Effect on power quality by large penetration of household non linear load,"2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-5.