



MODELAGEM E SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL PARA ANÁLISE DOS EFEITOS DE ELEVAÇÕES DE TENSÃO SOBRE UM FREEZER

Mariany R. Carvalho*¹, Pedro S. Miller², João Luiz A. Santos³, Thallia Fernanda D. Fagundes⁴, Thaís R. Silva⁵, Matheus F. Alpoim⁶ e Gabriel S. G. Rossi⁷

¹PET Engenharia Elétrica da UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

Resumo - Em consequência da contínua inserção de dispositivos eletrônicos não-lineares nas instalações residenciais e industriais, o estudo da qualidade da energia mostra-se cada vez mais necessário para a investigação dos impactos que tais dispositivos podem causar na rede. Sob essa perspectiva, este artigo demonstrará as análises feitas sobre um compressor de um freezer doméstico submetido a uma elevação de tensão, utilizando a ferramenta computacional RSCAD. Através do software, com uma fonte controlada, foi possível simular as elevações no primário do transformador, com o propósito de analisar prováveis distúrbios na rede e seus impactos sobre o freezer modelado. A partir dos resultados obtidos, observa-se o aumento da potência ativa do compressor, tendo como consequência seu superaquecimento, o que pode ocasionar a redução de sua vida útil, assim como danos permanentes. Nota-se, ainda, em decorrência das oscilações de velocidade e torque mecânico, que a integridade dos mancais pode ser prejudicada, devido ao aumento das vibrações provenientes do distúrbio. Por fim, verifica-se o aumento da corrente do compressor, tanto no início quanto ao final da elevação de tensão. No entanto, essas variações de corrente não causam danos ao equipamento.

Palavras-Chave - Elevação de Tensão; Freezer; Qualidade de Energia Elétrica; RSCAD; VTCD.

REAL-TIME MODELING AND SIMULATION FOR ANALYSIS OF VOLTAGE SWELLS EFFECTS ON A FREEZER

Abstract - As a result of the continuous insertion of non-linear electronic devices in residential and industrial facilities, the study of power quality is increasingly necessary to investigate the impacts that such devices can cause on the network. Under this perspective, this article will demonstrate the analyses made on a compressor of a domestic freezer subjected to a voltage swell, using the computational tool RSCAD. Through the software, with a controlled source, it was possible to simulate the swells in the primary of the transformer, in order to analyze probable

disturbances in the network and its impacts on the modeled freezer. From the results obtained, an increase in the active power of the compressor can be observed, resulting in its overheating, which can lead to a reduction in its lifespan, as well as permanent damage. It is also noted, as a result of speed and mechanical torque oscillations, that the integrity of the bearings can be harmed, due to the increase in vibrations caused by the disturbance. Finally, there is an increase in the compressor current, both at the beginning and at the end of the voltage swell. However, these current variations do not cause damage to the equipment.

Keywords - Electric Power Quality; Freezer; RSCAD; SDVV; Voltage Swell.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica (QEE) refere-se aos fenômenos eletromagnéticos que caracterizam as correntes e tensões em um ponto e instante da rede elétrica [1]. As análises de QEE constituem-se do estudo e observação dos distúrbios presentes na rede, como variações de tensão e harmônicos, que cresceram com a incessante introdução de dispositivos eletrônicos, de característica não-linear, nas instalações residenciais e industriais.

Comumente, as variações de tensão de curta duração (VTCDs) originam-se pela ocorrência de faltas na rede elétrica e por energização de cargas que exigem elevadas correntes iniciais. Esses distúrbios caracterizam-se por desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo, inferiores a 3 minutos [2], e dividem-se em elevações, afundamentos e interrupções de tensão. Por apresentarem duração abaixo de 3 minutos, as VTCDs não interferem nos indicadores de continuidade, mas podem ter consideráveis impactos sobre equipamentos.

No estudo que engloba as VTCDs, o fenômeno de elevação de tensão classifica-se como qualquer acréscimo da tensão de 10% ou mais no valor nominal, com duração entre meio ciclo e 3 minutos [3]. Suas principais causas são curtos-circuitos monofásicos em sistemas isolados ou aterrados através de impedâncias de alto valor, o que provoca um aumento na tensão fase-neutro nas fases sãs.

*marianyp4@gmail.com

Considerando os Sistemas de Distribuição, quando há a paralisação ou desligamento de uma grande carga, também pode ocorrer uma elevação momentânea na tensão. Neste caso, deve-se avaliar a quantidade de ciclos ou minutos que ocorrem o fenômeno [4], a fim de obter informações da classificação. De forma geral, esses distúrbios podem danificar supressores de sobretensão e, até mesmo, romper o isolamento de equipamentos. Visto a importância deste tema para o estudo da qualidade de energia elétrica, o presente artigo irá demonstrar as análises feitas com elevação de tensão em um compressor de um freezer doméstico, utilizando a ferramenta computacional RSCAD, desenvolvida pela RTDS Technologies [5].

II. METODOLOGIA APLICADA

Efetuaram-se as simulações através do programa computacional RSCAD, principal interface para integração com o RTDS (*Real-time Digital Simulator*), que possibilita simulações em tempo real de sistemas elétricos de potência (SEP), inclusive com a aplicação de *hardware-in-the-loop*.

A Figura 3 apresenta a modelagem do sistema construído para os testes (fonte ideal, fonte controlada e transformador), compreendendo a rede de alimentação do laboratório onde se encontra o RTDS e o circuito do freezer a ser estudado.

De acordo com a Figura 3, simularam-se as elevações no lado primário do transformador, por meio de uma fonte controlada, de maneira a representar a ocorrência desses distúrbios na rede. A Tabela 1 expõe os dados adotados na modelagem do transformador.

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

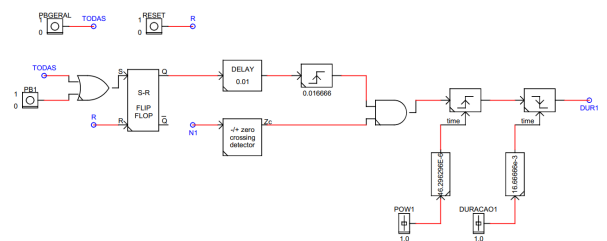
A lógica implementada para a realização das elevações momentâneas de tensão divide-se em duas partes: a primeira, re-

lacionada à duração do fenômeno e a segunda, referente à modulação do sinal aplicado no sistema.

1) Duração da Elevação

Na primeira parte da lógica, conforme ilustrada na Figura 1, o comando feito pelo usuário na interface do *software* para a ocorrência da elevação de tensão - podendo ser monofásico ou trifásico - gera um pulso com largura de um ciclo de onda. Este tempo em que o pulso se mantém é o necessário para que uma detecção da passagem da onda de tensão de referência pelo zero ocorra. De acordo com o ponto de incidência do fenômeno e a duração, ambos determinados pelo usuário no *software*, o sinal percorre para a segunda etapa da lógica.

Figura 1: Lógica de controle para a duração da elevação



2) Modulação do Sinal

Na segunda parte, mostrada na Figura 2, enquanto o sinal da elevação for "1", isto é, enquanto o distúrbio estiver sendo aplicado no sistema, aumenta-se a tensão de referência um valor pré-estabelecido pelo usuário no *software*. Por fim, a tensão resultante alimenta a fonte equivalente do sistema. É válido notar que, quando não há elevação de tensão no sistema, a tensão que alimenta a fonte equivalente equipara-se à da fonte ideal.

Figura 2: Lógica de controle para o valor da tensão durante a elevação

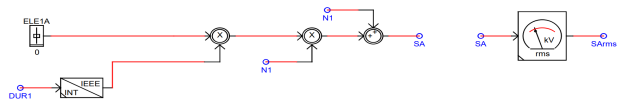
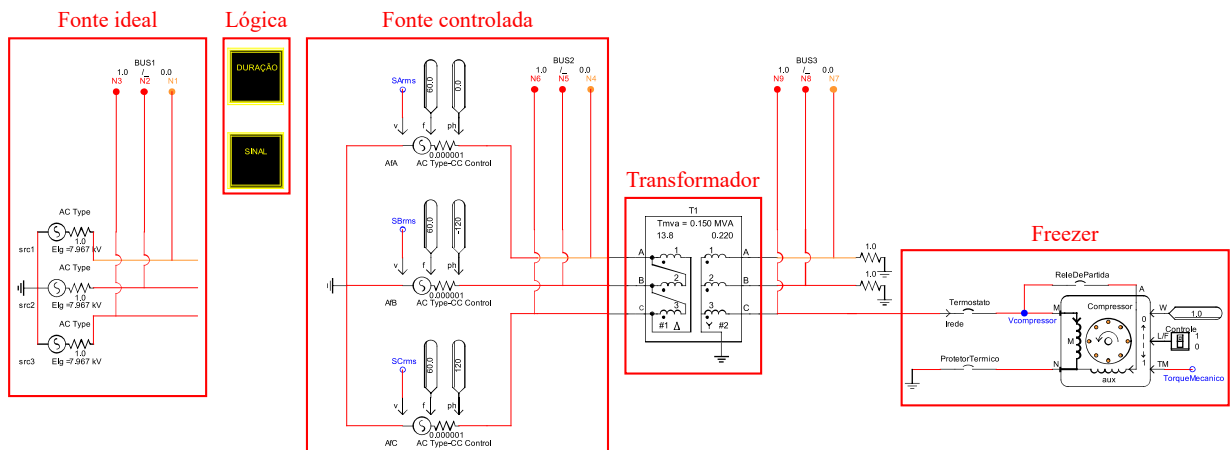
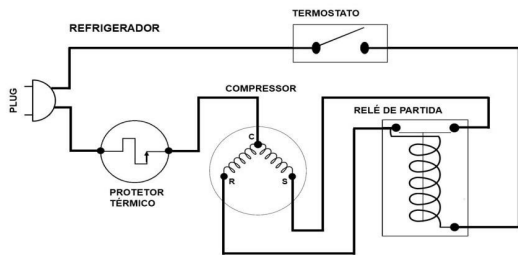


Figura 3: Diagrama da rede e do Freezer



Para avaliação do distúrbio de elevação de tensão há a necessidade de fazer a modelagem do circuito equivalente do compressor do *freezer*, ilustrado na Figura 4. A dificuldade, neste caso, encontra-se no modelo do compressor hermético, visto que não é possível o acesso ao seu circuito interno devido à junção fechada das partes mecânica e elétrica. Em função disso, foi utilizada a modelagem proposta em [6] de um circuito de motor de indução monofásico e parametrizado para o software RSCAD.

Figura 4: Esquema Elétrico de Motor de Indução do refrigerador



Inicialmente, foram utilizados os principais dados técnicos, presentes na parte traseira do *freezer*, assim como no Manual “Freezer Vertical F250”, da Electrolux. Tais dados encontram-se sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações Técnicas Nominais do Compressor

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

Durante a modelagem do circuito equivalente, percebeu-se algumas limitações por parte do software na criação de elementos que compõem o *freezer*, sendo assim, foram tomadas algumas medidas. Para o termostato, desconsiderou-se a operação deste dispositivo com base na temperatura medida. Dessa forma, o modelo atuou apenas para possibilitar a partida do compressor. Por outro lado, o relé de partida foi representado por meio de um disjuntor controlado por comparação direta, com a condição de permanecer fechado se a rotação do compressor atingisse um valor menor que 0,8 p.u., e aberto, caso contrário. Assim, foi possível realizar o controle de acionamento do enrolamento auxiliar. Para o compressor, seu controle foi efetuado através da definição do torque mecânico, a partir do quadrado da velocidade de rotação.

Segundo [7], para obter um torque mais elevado e, conseqüentemente, alterar os outros valores da resposta do *freezer*, podem ser adicionadas resistências externas ao rotor ou diminuir a sua impedância. Dessa forma, partindo destes pressupostos e dos parâmetros apresentados [6], foram realizadas diversas simulações, modificando estas resistências e reatâncias, a fim de encontrar uma resposta muito próxima dos valores nominais do refrigerador. Adotou-se, então, os valores das resistências e reatâncias dos enrolamentos como parâmetros elétricos. Os valores para a constante de inércia e amortecimento de fricção, foram estipulados com base em [8]. Os parâmetros considerados estão dispostos na Tabela 3.

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 [8]

Definiram-se os níveis de elevação de tensão com base no Módulo 8 do PRODIST, informados na Tabela 4. O escopo deste estudo visa analisar os efeitos que seriam observados na prática em um compressor.

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

Tensão (% V_n)	Duração (ciclos)
180	1
160	5
150	10
145	25
130	50

Fonte: Adaptado de [3]

III. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A. Elevações na rede com carga puramente resistiva

Para validar a resposta do sistema elaborado em relação à lógica desenvolvida, aplicou-se uma carga puramente resistiva no lado secundário do transformador e foi simulada uma elevação de tensão trifásica no lado primário, com aumento para 130% na amplitude e duração de três ciclos. A resposta obtida encontra-se nas Figuras 5 e 6.

Figura 5: Elevação para 130% de V_n – Primário

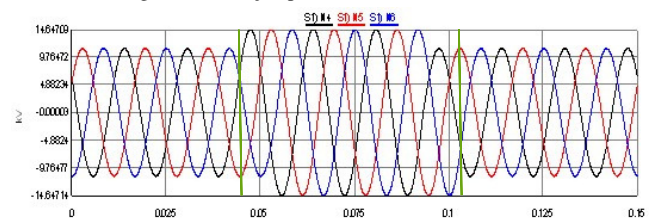
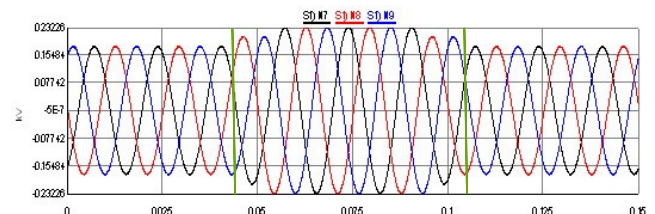


Figura 6: Elevação para 130% de V_n – Secundário



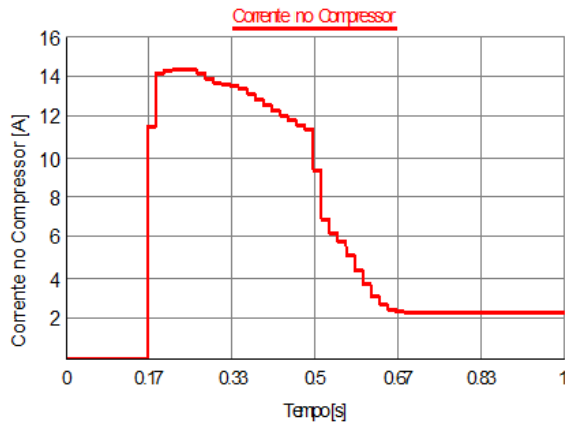
Observando a Figura 5, nota-se que as ondas de tensão no lado primário e secundário do transformador comportaram-se de acordo com o fenômeno aplicado. Ressalta-se que as tensões do lado secundário apresentaram uma intensidade diferente de tensão causada pela reatância do transformador.

Contudo, houve uma pequena discrepância na amplitude no começo e no final de aplicação do distúrbio no secundário, fato justificado pela ligação Dy_{n1} do transformador.

B. Condição de partida do compressor

Com o intuito de verificar a aderência do modelo do compressor com a realidade, simulou-se a condição de partida, conforme o resultado apresentado na Figura 7. A resposta alcançada condiz com o comportamento previsto, com uma corrente de partida cerca de 6,5 vezes superior à nominal.

Figura 7: Comportamento da corrente de partida



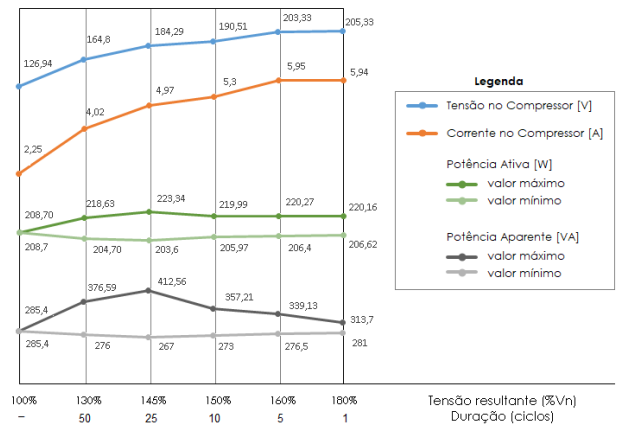
C. Elevações na rede com o freezer

A fim de 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 no compressor.

Analisando a Figura 8, nota-se que houve 3 condições de elevação com os maiores valores para a corrente no compressor, porém, dois deles possuem o mesmo valor, 160% e 180% de V_n . Ressalta-se que para esse último, mesmo com um tempo de distúrbio bem menor, o efeito é quase equivalente ao de 160%, em termos de danos ao compressor, devido ao máximo valor alcançado pela corrente no compressor.

Considerando que as características e a maneira de construção do compressor o torna resistente às variações temporárias de tensão e, julgando ser mais prejudicial o tempo do distúrbio do que o módulo da tensão, escolheu-se as condições de 150% e 160% de V_n para a tensão de alimentação. Dessa forma, serão apresentadas as curvas mais relevantes obtidas para as duas condições de distúrbios.

Figura 8: Panorama geral dos resultados



3) Elevação para 150% da tensão de alimentação

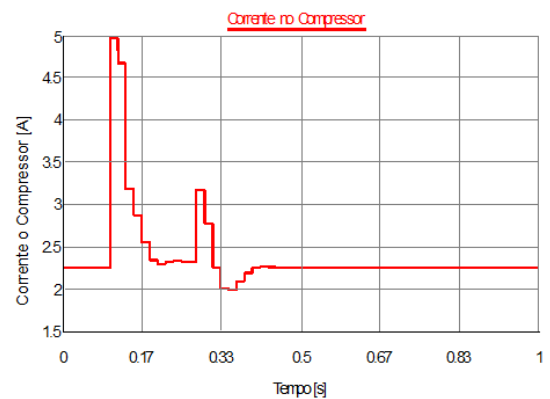
• Tensão no Compressor (V)

Primeiramente, simulou-se uma elevação para 150% de V_n , com duração de 25 ciclos. A modelagem na tensão no compressor obteve o valor correspondente a 190,51V.

• Corrente do Compressor (A)

Ao observar a corrente do compressor, ilustrada na Figura 9, tem-se que o valor da corrente apresentou um aumento excessivo, atingindo um valor máximo equivalente a 222% da corrente nominal.

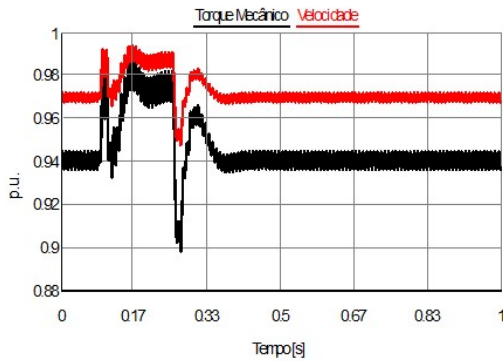
Figura 9: Resposta da corrente sob elevação para 150% V_n .



• Torque Mecânico e Velocidade do Compressor

Conforme apresentado na Figura 10, o torque mecânico e a velocidade do compressor aumentaram durante o período do distúrbio, ocorrendo variações tanto no início quanto no final do evento. Dessa forma, ao comparar os valores nominais com os obtidos através da simulação, pode-se observar que o aumento em relação ao torque mecânico foi de 3,2%, e em relação a velocidade foi de 2,1%, aproximadamente.

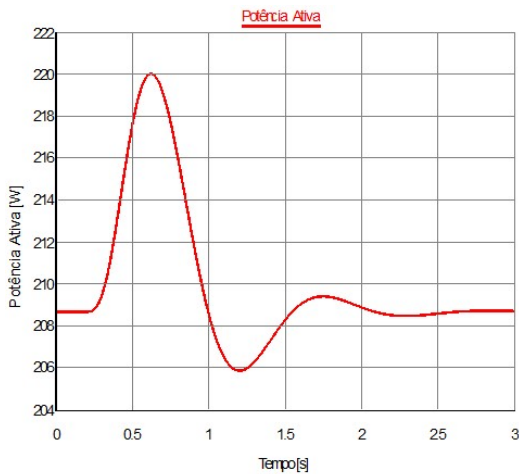
Figura 10: Comportamento do torque mecânico e da velocidade sob elevação para 150% de V_n .



- Potência Ativa (W)

A partir da análise do gráfico da potência ativa, Figura 11, percebe-se que houve uma elevação, seguida de uma queda em seu valor e na sequência a estabilização da curva. Em outras palavras, tem-se que após a potência ativa alcançar o valor máximo (5,41% maior que o valor nominal), esta apresenta um decrescimento, atingindo um valor 1,85% menor em relação à nominal.

Figura 11: Comportamento da potência ativa sob elevação para 150% de V_n .



Analisando o comportamento da potência aparente, observa-se que é análogo ao da potência ativa, com um crescimento elevado, atingindo um valor máximo de 25,3% em relação ao nominal, seguido de uma queda acentuada, com um decrescimento de 4,2% em relação ao valor nominal.

4) Elevação para 160% da tensão de alimentação

- Tensão no Compressor (V)

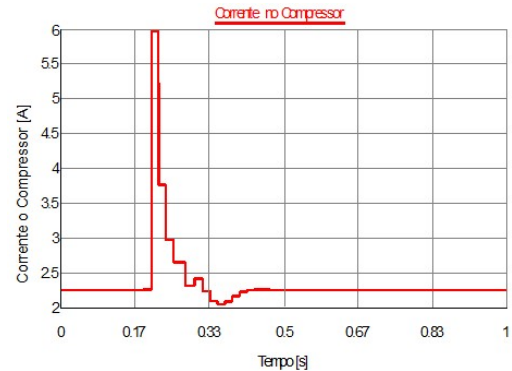
Com uma elevação para 160% de V_n e duração de 5 ciclos, a tensão no compressor modelado chegou no valor de 203,33V.

- Corrente do Compressor (A)

Observando o comportamento da corrente demandada pelo compressor, mostrado na Figura 12, percebe-se que

houve um aumento considerável. Dessa forma, na condição de elevação, o valor de pico foi na ordem de 264,44% da corrente nominal.

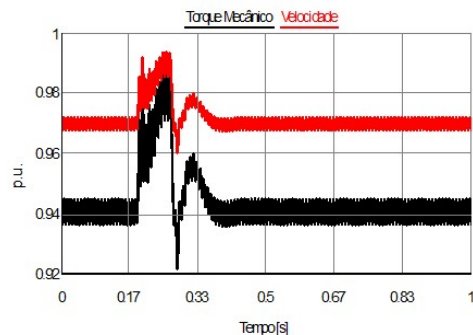
Figura 12: Resposta da corrente sob elevação para 160% de V_n .



- Torque Mecânico e Velocidade do Compressor

Conforme esperado, nota-se, a partir da Figura 13, que o torque mecânico e a velocidade, tiveram um aumento considerável devido ao distúrbio causado. Ressalta-se que o aumento relativo das grandezas observadas ocorreu quase simultaneamente ao tempo em que o evento teve início. Tomando os respectivos valores nominais do torque mecânico e da velocidade como referência, foi possível quantificar os aumentos de 4,79% e 2,47%.

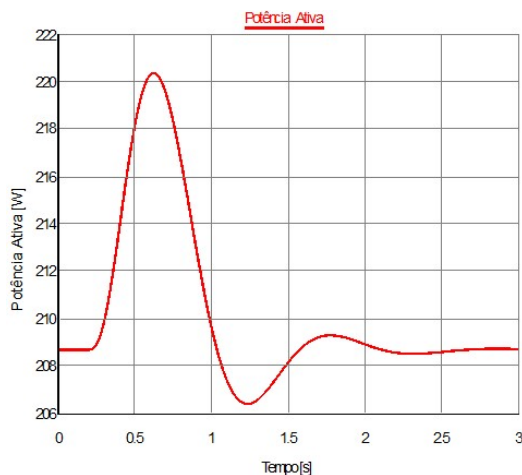
Figura 13: Comportamento do torque mecânico e da velocidade sob elevação para 160% de V_n .



- Potência Ativa (W)

Com base na Figura 14, é possível observar um aumento da potência ativa, atingindo um valor de pico máximo de 5,54% em relação ao valor nominal. Em seguida, o valor da potência apresentou uma queda, com valor 1,1% menor em relação às condições nominais.

Figura 14: Resposta da potência ativa para a elevação de 160%.



De forma semelhante ao observado para a potência ativa, a potência aparente apresentou o mesmo comportamento. No entanto, o valor de pico máximo atingido foi de 18,9% em relação à condição normal e seguindo de uma queda de 3,1% da potência aparente nominal.

IV. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Avaliando os resultados obtidos nas simulações, percebe-se que, nas curvas do torque mecânico e da velocidade, há variações acentuadas no início e no final da aplicação do distúrbio. Além disso, um dos fatores de maior destaque consistiu no aumento da corrente do compressor no início e no fim da elevação de tensão, já que o comportamento esperado era exatamente o oposto. Por fim, nota-se grande aumento da potência ativa no período inicial do fenômeno.

V. CONCLUSÕES

Com base nos resultados alcançados, tornou-se possível avaliar os impactos mais significativos de uma elevação de tensão temporária sobre as grandezas elétricas do compressor do freezer. Primeiramente, as oscilações de velocidade e torque mecânico se mostraram relativamente pequenas, na ordem de 5%, contudo, distúrbios com durações maiores que 25 ciclos podem permitir o aumento dessas variações, e somado a contínua reincidência de tais eventos, prejudicar a integridade mecânica do motor. Inevitavelmente, há vibrações durante o funcionamento desses equipamentos, que podem ser ampliadas mediante a recorrência desse tipo de distúrbio, apresentando como consequência a diminuição de sua vida útil.

As variações de corrente observadas, apesar de apresentarem valores consideráveis, não são capazes de provocar danos ao equipamento, visto que são inferiores à corrente verificada durante a partida do compressor. Além disso, essas elevações de corrente mantiveram-se em seus valores máximos durante intervalos de tempo muito reduzidos.

Já a elevação temporária do patamar de potência ativa pode gerar superaquecimento, principalmente caso esse comportamento tenha duração prolongada. Isso pode trazer consequências negativas para o equipamento, como a redução de sua vida útil e, até mesmo, danos permanentes.

Portanto, o estudo indicou o aumento das vibrações e a ascensão da temperatura do compressor como os principais malefícios que podem surgir graças à ocorrência de elevações de tensão na rede de alimentação. Os resultados atingidos poderão contribuir com pesquisas futuras, sobretudo aquelas que envolvam a implementação do *hardware-in-the-loop*, permitindo a validação do modelo do compressor e de seus efeitos sob distúrbios de QEE com relação a um freezer real. Dessa forma, possibilitar-se-á a realização de comparações entre os resultados simulados e aqueles obtidos por meio de ensaios.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, S. Santoso, M. F. McGranaghan, and W. Beaty, *Electrical power systems quality*. 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] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, in IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009), p. 23, DOI: 10.1109/IEEEESTD.2019.8796486.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, pp 20. 2021.
- [5] “Home - RTDS Technologies”. Acedido em: 22 de Agosto de 2021, em: <https://www.rtds.com/>
- [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] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley-Blackwell, 2a Edição, Nova Iorque, 2002.
- [8] C. Mardegan, “Interface com a Concessionária”, *O Setor Elétrico*, Edição 63, pp. 22-36, Maio de 2011.