



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2022) v. 9, n. 1, pp. 32–39
<https://doi.org/10.21712/lajer.2022.v9.n1.p32-39>

A instalação de sistema fotovoltaico e o problema de afundamento de tensão em uma indústria

The installation of a photovoltaic system and the voltage sag problem in an industry

Gabriel Edgar Hermann^{1,*}, Andréa Teresa Riccio Barbosa²

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, MS, Brasil.

² Professora do Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, MS, Brasil.

*Autor para correspondência, E-mail: bielhermann@hotmail.com

Received: 03 August 2022 | Accepted: 16 August 2022 | Published online: 31 August 2022

Resumo: Diversos casos de problemas com energia em indústrias são registrados diariamente no Brasil. Muitos desses, apenas são notados quando testes para obtenção de parâmetros elétricos são realizados ou quando uma máquina mais sensível às oscilações de tensão é integrada na indústria. Este artigo apresenta um estudo de caso em uma indústria de beneficiamento de isopor, que após a instalação de um sistema fotovoltaico foram percebidos problemas na rede interna de energia da indústria, causado por uma máquina da linha de produção. Neste caso, depois de estudos e medições foi observado um afundamento de tensão, proveniente dessa máquina. Sendo assim, foi realizada toda a parametrização da máquina, desde seu transformador de alimentação, e também se observou o problema por meio de equações matemáticas. Depois de identificado o problema teoricamente e na prática, soluções foram pautadas e posteriormente instauradas, mostrando resultados significativos, e levando a conclusões interessantes, mostrando que em alguns casos pode-se utilizar equipamentos que não são desenvolvidos para determinada função e mesmo assim, obter resultados positivos.

Palavras-chave: afundamento de tensão, indutância de alisamento, regime transitório, CNC, sistema fotovoltaico.

Abstract: Several cases of energy problems in industries are recorded daily in Brazil. Many of these are only noticed when tests to obtain electrical parameters are performed or when a machine more sensitive to voltage fluctuations is integrated into the industry. This article presents a case study in a styrofoam processing industry, which after the installation of a photovoltaic system, problems were noticed in the internal energy network of the industry, caused by a machine on the production line. In this case, after studies and measurements, a voltage sag was observed, coming from that machine. Therefore, all the parameterization of the machine was carried out, from its power transformer, and the problem was also observed through mathematical equations. After identifying the problem theoretically and in practice, solutions were lined and subsequently established, showing significant results, and leading to interesting conclusions, showing that in some cases we can use equipment that is not made for a certain function and still obtain positive results.

key words: Voltage sags, smoothing inductance, transitional regime, CNC, Photovoltaic System.

1. Introdução

Muitos são os problemas elétricos existentes dentro de uma indústria, tais como: distorção harmônica, altas correntes de partida, correntes parasitas, baixa qualidade de energia, entre outros, conforme Figura 1 (Martins, 2003). Nota-se, entretanto, que quando há um correto dimensionamento das cargas antes da execução do projeto elétrico muitos dos problemas são sanados na fase inicial. No Brasil ainda é possível

verificar muitas instalações que são feitas sem o correto dimensionamento e previsão de instalação de futuras cargas, o que acarreta em vários problemas que são observados ao longo da vida útil da instalação.

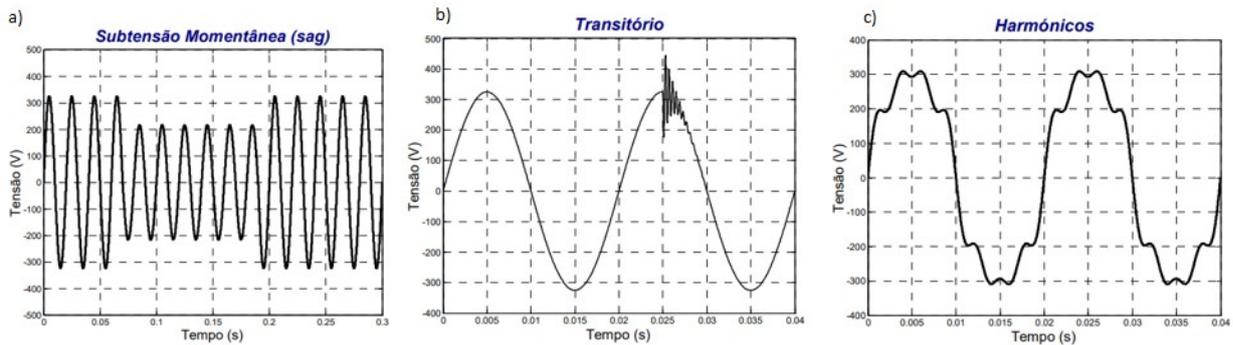


Figura 1. Problemas na rede elétrica a) subtensão momentânea; b) Transitório; c) Harmônicos. Fonte: Adaptado de Martins (2003).

Esse artigo apresenta um estudo de caso em uma indústria de beneficiamento de isopor situada em Campo Grande – MS. Após um Sistema de Geração Fotovoltaica (SFV) ter sido instalado, notou-se um afundamento de tensão gerado por uma máquina da instalação. O afundamento de tensão (*voltage dip*) é uma das perturbações principais em sistemas industriais e consiste na redução da tensão RMS (Valor Médio Quadrático) em um período curto de tempo ou na sua perda completa (Dugan et al., 2002). Para tal, foi realizado um dimensionamento e levantamento de parâmetros elétricos, além de se considerar vários aspectos da instalação, até o problema ser sanado.

A proposta de solução do problema foi a utilização de componentes comercializados para outra finalidade. Entretanto, em algumas situações práticas é possível uma adaptação do uso de componentes para se obter soluções, sempre respeitando os princípios básicos de funcionamento, boas práticas, melhor custo benefício e que fique viável para o cliente/prestador. Sendo assim, um componente comercialmente vendido para o qual foi desenvolvido, também poderá ser utilizado para solução do mesmo problema ocorrido nessa indústria. Espera-se, portanto, que as informações contidas nesse artigo possam auxiliar a comunidade na resolução de problemas semelhantes aos tratados, de maneira prática e eficiente.

2. Metodologia

Essa pesquisa é considerada aplicada (Gil, 2017), pois apresenta maneiras práticas e aplicadas de solução de um problema que pode existir em diversas instalações industriais ao redor do Brasil e do mundo. Além disso, trata-se de um estudo de caso do tipo qualitativo e quantitativo (Lopes, 2022). Qualitativo pois trata-se de uma solução estudada em caráter acadêmico, já disseminada ao longo dos anos para problemas desse tipo e, levada a campo por meio de uma análise crítica e criteriosa de cargas. Quantitativa porque além de instrumentos matemáticos para a análise e confirmação da resolução do problema, dados tabelados foram utilizados após valores terem sido encontrados por meio de aparelhos eletrônicos de medição.

A primeira etapa realizada foi o dimensionamento do sistema fotovoltaico para a indústria de beneficiamento de isopor, com a obtenção das faturas de um período de um ano e com o uso do programa livre *PVWatts®* do laboratório de pesquisa *National Renewable Energy Laboratory* (NREL).

A problemática foi que após a instalação desse sistema fotovoltaico, notou-se que o equipamento inversor solar desligava, periodicamente, de 8 a 10 minutos. Tal equipamento apresentava a seguinte mensagem “ESTADO 103” (Parâmetros de tensão de rede fora de conformidade). Um levantamento dos parâmetros de Corrente Contínua (CC) e Corrente Alternada (CA) foi realizado, além dos dados de tensão, frequência e simetria no sistema fotovoltaico.

Posteriormente, um estudo das cargas da edificação foi feito. Todas as máquinas foram avaliadas, até se descobrir a origem do surto de corrente. Dessa forma, foi realizada uma análise criteriosa nessa máquina que estava provocando a diferença de tensão na rede, e alguns de seus parâmetros elétricos foram medidos, possibilitando que uma solução prática para o problema fosse pautada e, posteriormente, testada. Utilizou-se para a medição desses parâmetros um alicate amperímetro da marca *Minipa* digital, modelo *ET3367C*, o medidor de energia da marca *Fronius* modelo *Smart Meter TS 65a-3* e o próprio inversor que apresenta os parâmetros elétricos da marca *Fronius* modelo *Symo 15kW* trifásico 220V. Todos os dados obtidos foram planilhados no aplicativo *excel* e a eficácia da solução comprovada.

3. Resultados

3.1 O sistema fotovoltaico

Analisando as faturas de energia dos últimos 12 meses da instalação, foi observada a necessidade de uma produção de 1.800 kWh/mês, para atender a indústria em questão. Sendo assim, projetou-se a instalação de um sistema sobre dimensionado (1.950 kWh/mês) e com possibilidade de expansão (inversor solar com fator de sobrecarga 1). Simulações no programa livre *PVwatts* foram realizadas e a potência de 15 kWp foi determinada para atendimento ao cliente, visto o azimute de 15° graus Norte e angulação de 14° graus de telhado. Na Figura 2 é apresentado o quanto deveria ser gerado de energia em cada mês do ano, conforme dados obtidos do programa *PVwatts*.

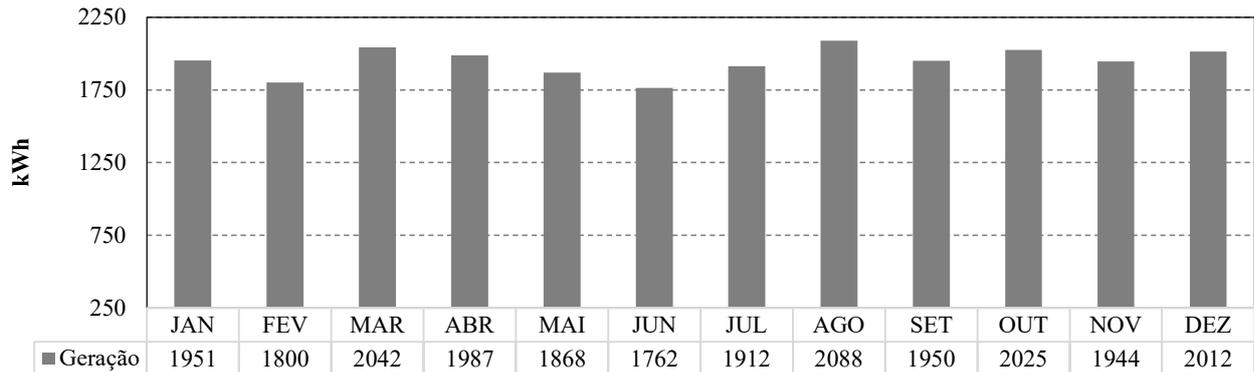


Figura 2. Geração média mensal do sistema fotovoltaico. Fonte: adaptado por Hermann e Barbosa do simulador *PVwatts* National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Sendo assim, para o sistema foi dimensionado 40 painéis da marca Trinasolar de 375 W *Tallmax* Monocristalinos (totalizando 15 kWp), ligados em duas *strings* de 20 painéis cada e um inversor *on-grid* da marca *Fronius* modelo *Symo* 15 kW com 1 *maximum power point tracking*¹ (mppt) de 220V (Figura 3 e Figura 4). O sistema fotovoltaico foi instalado, além de um sistema de aterramento que não tinha na edificação e foi providenciada a documentação com a concessionária, no que diz respeito a projetos e execução.



Figura 3. Instalação dos painéis fotovoltaicos em Campo Grande MS.



Figura 4. Instalação do inversor fotovoltaico e *string* box em Campo Grande MS.

3.2 Problemática

No momento da ligação do sistema fotovoltaico para teste, depois de um período de tempo o inversor solar apresentou mensagem de que havia parâmetros da rede fora de conformidade, o que provocou o desligamento do inversor. Testes foram repetidos e o equipamento continuava desligando, com a frequência de 8 a 10 minutos após ligado. Testes na parte do sistema que trabalha em corrente contínua foram realizados e verificou-se que não havia problema nessa parte. O teste em circuito aberto resultava em cerca

¹ rastreamento do ponto de máxima potência

de 750 V (valor esse esperado para o total de 20 painéis em cada *string*). A Figura 5 apresenta o valor de medição obtido no voltímetro.



Figura 5. Tensão CC por *string* medido com multímetro.

Sendo assim, como o inversor solar detectou que os parâmetros da rede estavam fora de conformidade, foi medida a tensão da concessionária na instalação elétrica interna na indústria, em vários locais:

- a) na entrada de energia;
- b) no Quadro de Distribuição Geral (QDG);
- c) na saída do disjuntor, pertencente ao equipamento solar; e
- d) na entrada do inversor.

Os parâmetros de tensão medidos foram inicialmente satisfatórios, dentro dos 5% para mais e para menos que a concessionária é obrigada a entregar ao consumidor, conforme norma concessionária local *Energisa NDU 001*. O inversor opera em uma faixa de tensão de 194 V – 242 V, sendo assim, para um desligamento acontecer a tensão deveria chegar abaixo de 194 V ou estar acima de 242 V. A frequência da rede também foi medida e apresentou dados muito satisfatórios, estando em 60 Hz, como pode ser observado na Figura 6 e Figura 7.



Figura 6. Parâmetros de frequência CA (rede), medidos com o aparelho inversor *on-grid* da marca *Fronius* modelo *Symo* 15 kW.



Figura 7. Parâmetros de Tensão CA (rede), medidos com o aparelho inversor *on-grid* da marca *Fronius* modelo *Symo* 15 kW.

Verificou-se que como o problema não era na parte do equipamento solar, foi observado a dinâmica de funcionamento da indústria e de suas máquinas. Mediu-se a corrente no QDG com um alicate amperímetro por cerca de uma hora, e notou-se que a corrente em alguns momentos aumentava cerca de 40 A em 2 fases da instalação, quase que instantaneamente. Dessa forma, foi feita análise para verificar qual máquina estava em funcionamento, quando ocorria o aumento de corrente nas duas fases do QDG. Para tal, foram identificados o circuito e o disjuntor da carga e descoberto qual era a máquina em questão. E, por conseguinte, verificou-se que os momentos em que essa carga era acionada eram os mesmos em que o equipamento inversor solar desligava.

3.3 Programação CNC (Controle Numérico por Computador) da máquina cortadora de isopor

A máquina cortadora de isopor utiliza um CNC em seu processo de trabalho, que nesse caso atua no processo de criação de um componente ou peça, através da remoção de material (Figura 8). A máquina trabalha aquecendo fios de níquel-cromo por efeito joule. Quem determina, portanto, todo o trajeto de corte é um controlador via computador. Para passagem da corrente que esquentava o fio é introduzida uma Diferença de Potencial (DDP) em duas chapas condutoras, que tem a função de serem os “polos” da máquina.



Figura 8. Máquina cortadora de isopor que trabalha com CNC.

Nota-se que quando essa DDP ocorre, também há uma diferença abrupta na corrente. O controlador via computador não só comanda o trajeto em que a máquina deve fazer para obter o corte pretendido, como também envia um sinal em CC a um relé de estado sólido, quando é o momento de colocar a DDP nos polos da máquina, que por sua vez aciona a tensão nos terminais da máquina como um “interruptor”. No entanto, não possui comandos como rampa de tensão e nenhum outro método de controle que seja ligado a tensão nos terminais. É também importante ressaltar que as correntes de partida em máquinas fresadoras a seco, é maior que em máquinas que possuem um fluido de corte (Gimenez, 2020).

Verificando a dinâmica da máquina que estava desligando o inversor, foram medidas as tensões da instalação no momento de sua partida. Com o auxílio do equipamento inversor *Fronius* modelo *Symo* 15kW trifásico 220V que mede as mínimas tensões momentâneas foram feitas 10 medições, e a média das medições foi de 181,4 V, valor abaixo da faixa permitida pelo inversor solar, o que explicava o desligamento do equipamento.

Vários métodos de partida foram propostos ao cliente para que não acontecesse mais o problema. No entanto, ele argumentava que o processo nunca acarretou problemas na instalação, até a colocação do inversor solar. Sendo assim, um estudo mais criterioso foi realizado. Pensou-se em usar a indutância de bobinas para controlar a passagem abrupta de corrente no equipamento.

3.4 Parametrização

Um método muito usado em indústrias para controlar o nível da corrente de energização do banco de capacitores, é utilizar uma bobina em série. Em muitas instalações industriais a bobina é feita a partir do próprio cabo que alimenta o circuito. Quando se coloca o indutor L_o no circuito, impede-se uma variação abrupta na corrente (Pomilio, 2013). Sendo assim, realizou-se uma parametrização completa do circuito de ligação da máquina

3.4.1 Máquina cortadora de isopor controlada por CNC

A máquina possuía 2,70 m de comprimento e 20 fios de Níquel-Cromo de 33 awg. Consultou-se a tabela do fabricante para se obter o valor da resistência e da indutância. A corrente total medida no multímetro foi de 37,2 A. Supondo que cada fio tenha a resistência $119,34\Omega$, a resistência equivalente do circuito fica em torno de $5,967\Omega$. Para a tensão de 220V tem-se 36,87A em teoria, o que é compreensível visto as outras perdas no circuito.

3.4.2 Sistema de ligação

O transformador que atendia o cliente era de 75 kVA e a tensão de 127/220V. A concessionária informou que a potência de curto circuito no local era de 100 MVA. A resistência antes do transformador foi considerada nula, por ser muito inferior a reatância (Mamede, 2015). Foram então calculadas as impedâncias nos seguintes locais:

- a) antes do transformador;
- b) no transformador;
- c) no cabo de alimentação do QDG;
- d) do QDG até a máquina com CNC.

Para uma melhor compreensão do problema, foi desenvolvido um estudo de parametrização de todo o circuito de ligação da CNC, desde o transformador da concessionária até a máquina. As bases do cálculo foram feitas em (p.u.) com a tensão (V_b), potência (P_b) e corrente (I_b) baseadas no transformador de 75kVA da concessionária. A resistência (R_{us}) e reatância (X_{us}) do sistema de média tensão foram estimadas de acordo com a corrente de curto circuito antes do transformador. A resistência (R_{ut}) e reatância (X_{ut}) do transformador foram estudadas a partir das perdas a vazio (P_{av}), no cobre (P_{cu}) e na impedância percentual (Z_t). Os dois circuitos que alimentam a máquina foram designados (c1) e (c2), e para eles também foram calculados a resistência (R_{c1}) e (R_{c2}) e a reatância (X_{1c}) e (X_{2c}). Por fim, foi parametrizada a resistência (R_m) e a reatância (X_m) da máquina e somando todos os valores, foi realizado o cálculo da corrente de partida (I_s). Os resultados obtidos foram tabelados (Tabela 1) para uma melhor organização.

Tabela 1. Cálculo da impedância para corrente de partida.

Potência base (P_b), Tensão base (V_b) e Corrente base (I_b)				Impedância do QDG até a máquina			
P_b (kVA)	75	I_b (A)	196,82	R_{c1} (Ω)	0,022221	Cabo 6 MM	
V_b (kV)	0,22			R_{c1} (pu)	0,459112	R+	3,7035
Impedância na média tensão (13,8 kV)				X_{c1} (pu)	0,015186	Lc	6
X_{us} (pu)	0,00075			Impedância da máquina CNC			
Impedância do transformador				R_m (pu)	0,33287	R1 fio	119,34
Rpt(%)	1,6	P_{cu}	1200	X_m (Ω)	0,001296	R_m (Ω)	5,967
R_{ut} (pu)	0,016	P_{av}	390	X_m (pu)	0,026777	X_m	0,1296
X_{ut} (pu)	0,03848			TOTAL			
Impedância do transformador ao QDG				X total	0,15094		
R_{c1} (Ω)	0,0257839	Cabo 25 MM		Z total(pu)	1,3492	I_s (A)	145,8845
R_{c1} (pu)	0,5327252	R+	0,8891				
X_{c1} (Ω)	0,0033756	X+	0,1164				
X_{c1} (pu)	0,0697438	Lc	29				

3.5 Indutância de alisamento

Uma solução viável seria a inserção de uma bobina anti-surto, também chamada de reator de alisamento. No entanto, duas máquinas de solda antigas foram usadas visto que possuem em seu interior um transformador de tensão. Para tal, foram usados seus núcleos no secundário, porque os cabos da bobina são mais grossos e compatíveis com os cabos dos circuitos.

Sendo assim, foi calculada a Indutância induzida L_{ind} . O valor A refere-se a área no núcleo de ferro da bobina, sendo que a altura da bobina (0,15 m), e B (0,16 m) corresponde a largura e o comprimento da bobina, ambos em metros. Foi usada para cada fase o secundário do transformador de corrente em série. Com a Eq. (1) é possível calcular a indutância da bobina.

$$L_{ind} = N^2 A \frac{\mu}{l}, \quad (1)$$

sendo N o número de espiras, A a área da seção do núcleo (m^2), l o comprimento (m), μ a permeabilidade do material.

Consultando os fabricantes dos transformadores, ambos informaram que o secundário dos transformadores possuía 35 espiras, padrão por utilizarem a mesma tensão nos secundários, sendo para os dois um total de 70 espiras. Usando a Eq. (1) obtém-se $L_{ind} = 0,092H$.

Com a nova indutância temos uma nova impedância no cabo de alimentação da máquina, conforme mostra a Tabela 2.

A nova corrente de surto absoluta tornou-se 23% menor que a anterior e se comparada relativamente (não levando em conta o regime permanente) 31% menor que quando não havia as bobinas dos transformadores em série.

Tabela 2. Cálculo da impedância com nova indutância para corrente de partida.

Impedância do QDG até a máquina			Total		
Rc1(Ω)	0,022221	CABO 6 MM	R total	1,340707	Is(pu) 0,571205
Rc1(pu)	0,45911157	R+ 3,7035	X total	1,12579	
Xc1(Ω)	0,20868338	X+ 34,78056	Z total(pu)	1,7507	Is(A) 112,4268
Xc1(pu)	0,99003693	Lc 6			

Depois de colocadas as bobinas dos transformadores em série na máquina (Figura 9), novas medições foram realizadas, e depois de 10 amostras chegou-se a média de 207 V, dentro dos parâmetros do equipamento na partida da máquina. Com essa nova configuração o inversor solar funcionou sem novos alertas e sem desligar.



Figura 9. Introdução de bobinas de transformadores na máquina CNC (parte inferior da imagem).

4. Conclusões

Vários são os problemas elétricos que ocorrem nas indústrias. Estas podem ser relacionados com fator de potência, afundamento de tensão, harmônicos, entre outros. Para todos os casos, o engenheiro responsável deve buscar a melhor alternativa, e se não a melhor, a mais viável de acordo com os requisitos técnicos e do cliente.

Uma outra solução para o caso tratado nesse estudo seria usar um reator de alisamento, que funciona com o mesmo princípio de geração de uma indutância em série e é vendido comercialmente com essa finalidade.

Após a instalação do sistema fotovoltaico, que inicialmente, parecia que seria simples, como outros projetos realizados, houve o desafio de identificar o que estava causando desligamento do inversor solar, por problemas de tensão na rede elétrica e o solucionar. Esse problema poderá ocorrer em outras instalações. Espera-se que a experiência vivenciada e a metodologia proposta possa contribuir com outros profissionais da área.

Referências bibliográficas

- Dugan, RC et al (2002) '*Electrical Power Systems Quality*'. 2 ediction. McGraw-Hill. EUA.
 Martins, JSC, Afonso, JL (2003) '*Qualidade de Energia Eléctrica*'. Portugal.
 Gil, AC (2017) '*Como elaborar projetos de pesquisa*'. 6. ed. São Paulo-SP: Atlas.

Lopes, JCJ (2022) ‘*Check-list dos elementos constituintes dos delineamentos das pesquisas científicas*’. Campo Grande – MS: Revista desafio online. <<https://desafioonline.ufms.br/index.php/deson/article/view/14846>> (accessed 6 July 2022).

Mamede Filho, J (2010) ‘*Instalações Elétricas Industriais*’. 8.ed. Rio de Janeiro.

Pomilio, JA (2015) ‘*Qualidade de Energia Elétrica em Ambiente Aeronáutico*’. Unicamp – São Paulo.

Simulador PVWatts® The National Renewable Energy Laboratory is a national laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy LLC. Disponível em: <<https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>> (accessed 6 July 2022).

Norma de Distribuição Unificada. ‘*NDU 001: Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária*’ <www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%c3%a9cnicas/NDU%20001%20%20Fornecimento%20de%20energia%20el%c3%a9trica%20a%20edifica%c3%a7%c3%b5es%20individuais%20ou%20agrupadas%20at%c3%a9%203%20unidades%20consumidoras.pdf> (accessed 6 July 2022).

Gimenez, MF. ‘*Monitoramento do comportamento da corrente elétrica durante o processo de fresamento*’ (2020) Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina.