

APLICAÇÃO DE UM MÉTODO ESTATÍSTICO PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Antônio A. A. Freitas, José S. Lima, José I. V. Silva

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA)
Mossoró, Brasil
alisson.freitas@ufersa.edu.br, jlima@ufersa.edu.br,
jivan_sfc@hotmail.com

Fernando L. M. Antunes

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará (UFC)
Fortaleza, Brasil
fantunes@dee.ufc.br

Abstract— O fator de potência é um indicador da qualidade e eficiência energética da rede elétrica. Os impactos da má qualidade são convertidos em multas para as organizações. O tratamento de *outliers*, definidos como dados dispersos do conjunto, é uma importante ferramenta utilizada para o aprimoramento dos instrumentos de medição. Nesse sentido, o presente estudo objetiva desenvolver a simulação de um sistema de medição e correção do fator de potência, implementando os princípios da análise de *outliers*. Quanto aos resultados da simulação, verificou-se o significativo grau de exatidão do sistema de medição com o método estatístico e a suave otimização em relação ao procedimento convencional.

Keywords— *Outliers, fator de potência, eficiência energética, estatística, instrumentação.*

I. INTRODUÇÃO

No ambiente da Engenharia Elétrica, o fator de potência é um dos parâmetros mais estudados na análise de sistemas de potência. Tal indicador é uma medida que indica o quanto de potência elétrica fornecida ao circuito está de fato sendo transformada em trabalho útil [1-4]. Portanto, tal parâmetro é um indicador da qualidade e eficiência energética da rede elétrica.

Em projetos que apresentam cargas em regimes de utilização distintos para diferentes intervalos de tempo, a implementação de sistemas automáticos de correção do fator de potência possui considerável relevância, já que é imprescindível a execução de uma regulação constante e periódica. Para as organizações, os impactos de uma má qualidade energética são refletidos em prejuízos financeiros (multas nas faturas de energia) [5,6].

Para corrigir o problema, existem bancos de capacitores automatizados no mercado que, ao serem instalados na rede elétrica, realizam as medições e corrigem periodicamente o fator, que deve estar acima de um limite definido pelo órgão regulador. Assim, devido à sua relevância, é imprescindível que tais dispositivos de mensuração e correção do fator de potência apresentem exatidão e precisão na coleta dos dados de análise, de modo a permitirem o ajuste apropriado [5].

Tendo em vista que as incertezas e os erros de medição são parâmetros inerentes à instrumentação, a utilização da estatística descritiva auxilia a busca pela otimização da exatidão e precisão dos instrumentos de medição [7]. A utilização de medidas de tendência central, a definição da incerteza-padrão e a análise

qualitativa dos dados são exemplos de aplicações comumente empregadas na área da instrumentação.

A média aritmética de valores experimentais para a obtenção da grandeza física desejada é um exemplo convencional de aplicação estatística. Este tipo de abordagem é sensível às oscilações das medições e requer uma elevada quantidade de leituras para minimizar os erros aleatórios presentes no sistema de medição, como verificado em [8].

Um outro método de tratamento estatístico bastante conhecido no universo acadêmico é o método de detecção de *outliers*, definidos como dados que apresentam grande afastamento dos demais. Eles são também designados como observações anormais [9,10].

A identificação dos dados definidos como discrepantes da tendência central é importante, principalmente, para instrumentos de medição em que a medida da grandeza física é dada pela média aritmética de várias leituras realizadas. Nesses sistemas de medição, a não-identificação de *outliers* pode resultar em medições distorcidas, comprometendo a precisão e exatidão do equipamento.

Os dados considerados anormais podem ser identificados pela análise estatística. Com a obtenção da série amostral, eles são definidos a partir de seu distanciamento da mediana do conjunto. Assim, se um dado qualquer estiver acima de uma distância pré-definida da mediana, ele será considerado um *outlier*. Ao identificá-los, existe a possibilidade de rejeitá-los da análise estatística ou elaborar um estudo especial sobre os mesmos [10-12].

A partir dos conceitos relacionados ao método de identificação de *outliers* e da necessidade de correção do fator de potência em redes de distribuição elétrica, o presente estudo objetiva desenvolver a simulação de um sistema de medição e otimização da eficiência energética em circuitos de baixa potência, implementando os princípios do tratamento de *outliers*. Nesse contexto, pretende-se verificar os níveis de precisão e exatidão do dispositivo, além da comparação com o método convencional.

II. ANÁLISE MATEMÁTICA

Com a obtenção da série de dados, os *outliers* podem ser identificados pelo seu distanciamento da mediana do conjunto.

Cruz Júnior et. al (2017) explanam que, para determinar se um dado caracteriza-se como um *outlier*, ele deve ser menor do que um limite inferior L_{inf} ou maior do que um limite superior L_{sup} [12]. A Figura 1 ilustra graficamente o conceito:

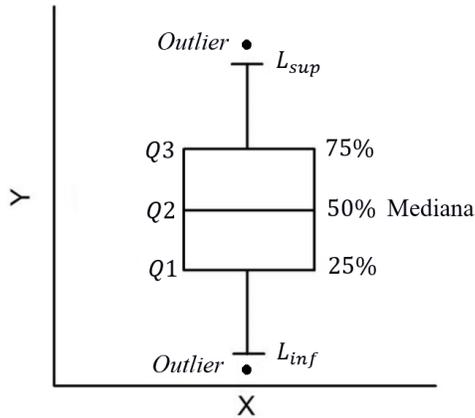


Fig. 1. Apresentação dos *outliers* no diagrama da caixa. Fonte: [13].

Os limites que definem os valores dispersos são dados pelas equações 1 e 2:

$$L_{inf} = Q1 - n \cdot (Q3 - Q1) \quad (1)$$

$$L_{sup} = Q3 + n \cdot (Q3 - Q1) \quad (2)$$

Com o conjunto de dados ordenados, os parâmetros $Q1$ (quartil inferior) e $Q3$ (quartil superior) representam os valores que, respectivamente, separam os 25% primeiros e os 25% últimos dados dos demais. Com a determinação da mediana do conjunto em estudo, os quartis $Q1$ e $Q3$ podem ser facilmente definidos.

Vale salientar que o fator de multiplicação n define as barreiras de investigação. Para encontrar os *outliers* extremos, por exemplo, as barreiras L_{inf} e L_{sup} são determinadas com o fator de multiplicação definido como $n = 3$. Já para analisar os *outliers* moderados, utiliza-se $n = 1,5$ [12]. Para o presente estudo, serão analisados os valores considerados extremos.

III. DIAGRAMA DE BLOCOS

Quanto ao princípio de funcionamento do dispositivo proposto, a Figura 2 apresenta o diagrama de blocos do sistema de medição e correção do fator de potência. A partir da

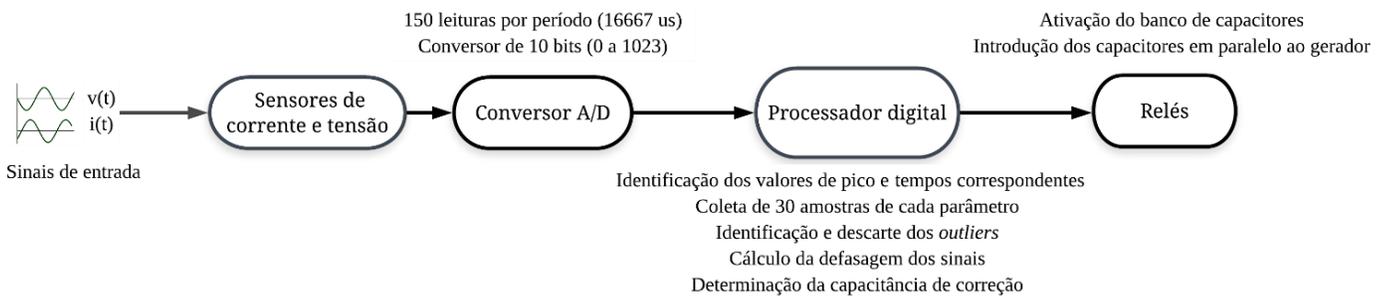


Fig. 2. Diagrama de blocos do sistema proposto. Fonte: Autoria própria (2019).

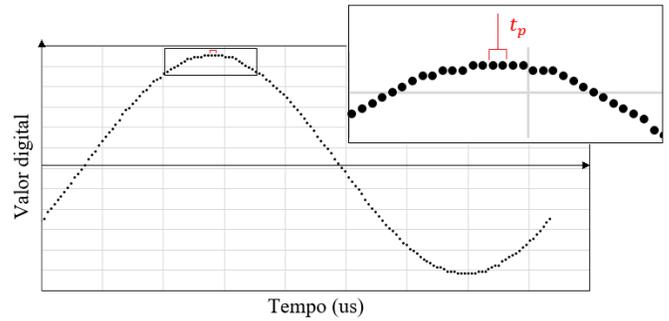


Fig. 3. Representação esquemática das leituras e do tempo de pico selecionado. Fonte: Autoria própria (2019).

implementação de sensores de corrente e tensão, idealizou-se um sistema que realiza a amostragem digital de medidas instantâneas da tensão e corrente elétrica ao longo de um período de $16667 \mu s$ (60 Hz). Além disso, os tempos correspondentes a cada leitura também serão coletados para permitir o cálculo da defasagem entre as grandezas elétricas. Vale ressaltar que a amostragem dos parâmetros elétricos será realizada pelo conversor A/D do processador digital.

Ao todo, definiu-se 150 leituras de cada parâmetro (tensão, corrente e tempo). A quantidade foi derivada da taxa de amostragem (quantidade de amostras coletadas por unidade de tempo) do conversor A/D do processador digital utilizado. Com a obtenção das leituras, é possível analisar as magnitudes e detectar os picos de cada parâmetro de tensão e corrente. A Figura 3 apresenta o gráfico de dispersão de 150 leituras testadas durante a simulação.

Nas situações em que o valor de pico se repete em várias leituras (como demonstrado na Figura 3), o algoritmo introduzido no processador digital realiza o artifício do tempo médio, coletando o tempo intermediário t_p entre os picos encontrados. Caso a quantidade de picos repetidos seja par, o algoritmo realiza uma média aritmética entre os tempos correspondentes aos dois picos centrais. Já para quantidades ímpares, o tempo vinculado ao pico central é extraído. Isso eleva a exatidão do instrumento de medição, evitando parâmetros distorcidos da realidade.

Ao subtrair o tempo vinculado aos picos de tensão e corrente elétrica, torna-se possível determinar a defasagem e, conseqüentemente, o fator de potência da amostra. Sabendo que na prática os sinais elétricos são instáveis e flutuantes, é possível medir os picos e o fator de potência de diversas amostras

(diferentes períodos) e realizar uma análise estatística sobre os mesmos (identificação de *outliers*). Para esse estudo, foi estabelecida a realização de trinta amostras de cada parâmetro elétrico para a análise.

Com os três conjuntos de dados obtidos (tensão, corrente e defasagem) e utilizando os princípios de identificação de *outliers*, foram implementados comandos que realizassem uma análise estatística da presença de *outliers* extremos em cada conjunto. Para isso, foram introduzidos algoritmos no processador digital.

Primeiramente, a série é ordenada de forma crescente, permitindo a determinação da mediana e dos quartis Q1 e Q3. Em seguida, realiza-se um teste lógico para verificar se o dado se enquadra ou não na faixa de *outliers* extremos, definidos pelas equações 1 e 2. Caso positivo, foi estabelecido que os valores discrepantes seriam desprezados do cálculo da média. Portanto, a defasagem estimada do sistema de medição será determinada pela média aritmética das defasagens de cada período analisado.

Por fim, determina-se a capacitância C necessária para corrigir o problema da ineficiência energética. Nesta etapa, a unidade de processamento relaciona linearmente cada faixa de valores capacitivos a valores digitais que serão determinados de acordo com o banco de capacitores introduzido ao sistema.

Para este trabalho, foi considerado um banco capacitivo ativado por oito relés. Cada relé representa um “bit” com determinado peso binário (0,1,2,4,... e 128). Os relés serão ativados ou desativados para formar o número binário correspondente. Assim, a capacitância de correção determinada será convertida em um valor digital entre 0 e 255, em que a capacitância máxima a ser corrigida $C_{m\acute{a}x}$ é atribuída ao valor digital 255. Neste estudo, definiu-se a capacitância máxima $C_{m\acute{a}x} = 548,05 \mu F$. Ela é a capacitância necessária para suprir uma demanda reativa de 10 kVar em uma rede monofásica de 220 V (60 Hz) [5].

IV. SIMULAÇÃO

Para a concretização da simulação, utilizou-se um software de simulação virtual de projetos elétricos. Ao desenvolver o sistema, a correção do fator de potência foi simulada em um circuito simples RL em série, com $R = 80 \Omega$ e $L = 200 mH$, alimentado pela rede elétrica V_G com frequência de 60 Hz. Tal circuito apresenta a finalidade de simular uma rede elétrica monofásica. A Figura 4 ilustra o circuito analisado:

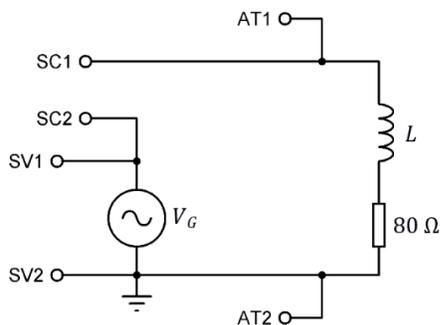


Fig. 4. Circuito analisado na simulação. Fonte: Autoria própria (2019).

Vale salientar que os terminais SC1 e SC2 da Figura 4 representam os terminais do sensor de corrente do sistema de medição. Já os terminais SV1 e SV2 estão relacionados aos terminais do sensor de tensão, conectados em paralelo ao gerador da rede elétrica. Por fim, AT1 e AT2 indicam os terminais de conexão da capacitância necessária para a correção do fator de potência.

A simulação foi realizada para $V_G = 220 V$ e $V_G = 110 V$. A Tabela I apresenta os parâmetros obtidos com a simulação antes e após a correção do fator de potência para $V_G = 220 V$. Para a análise comparativa, há também os respectivos valores teóricos e erros relativos. De forma análoga, a Tabela II apresenta a comparação dos resultados da simulação para $V_G = 110 V$.

A partir da análise das grandezas elétricas em cada simulação, é possível verificar a significativa exatidão das mensurações em relação aos valores teóricos. Além disso, verifica-se a eficácia do dispositivo, com correção do fator de potência bastante próxima do valor unitário.

Para a análise visual da correção, a Figura 5a apresenta o gráfico de dispersão dos sinais de tensão e corrente resultantes de uma das amostras realizadas pelo dispositivo para $V_G = 220 V$. Observa-se que, inicialmente, os sinais elétricos estão defasados entre si, com fator de potência medido igual a 0,7342 (Tabela I).

Já a Figura 5b, por sua vez, apresenta os mesmos sinais após a correção do fator de potência (inserção do banco de

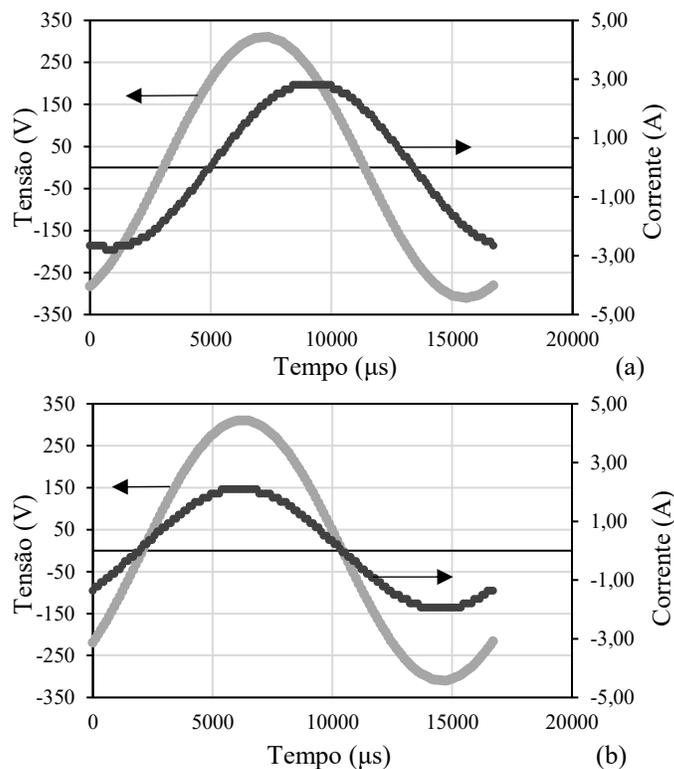


Fig. 5. Gráfico de dispersão da tensão (em cinza) e corrente elétrica (em preto) (a) antes e (b) após a correção do fator de potência para $V_G = 220 V$. Fonte: Autoria própria (2019).

TABELA I. COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO E OS VALORES TEÓRICOS CALCULADOS PARA $V_G = 220 V$.

Parâmetros	Antes da correção			Após a correção		
	Simulação	Valor teórico	Erro relativo (%)	Simulação	Valor teórico	Erro relativo (%)
Corrente eficaz	1,982 A	2,001 A	0,95	1,474 A	1,456 A	1,24
Tensão eficaz	219,62 V	220,00 V	0,17	219,54 V	220,00 V	0,21
Fator de potência	0,7342	0,7277	0,89	0,9984	1,0000	0,16
Capacitância corretiva	16,26 μF	16,55 μF	1,75	1,02 μF	0,00 μF	–
Potência reativa	295,55 VAr	301,94 VAr	2,12	18,52 VAr	0,00 VAr	–
Potência ativa	319,78 W	320,35 W	0,18	323,59 W	320,35 W	1,01

Fonte: Autoria própria (2019).

TABELA II. COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO E OS VALORES TEÓRICOS CALCULADOS PARA $V_G = 110 V$.

Parâmetros	Antes da correção			Após a correção		
	Simulação	Valor teórico	Erro relativo (%)	Simulação	Valor teórico	Erro relativo (%)
Corrente eficaz	1,067 A	1,001 A	6,59	0,762 A	0,728 A	4,67
Tensão eficaz	109,83 V	110,00 V	0,15	109,83 V	110,00 V	0,15
Fator de potência	0,7328	0,7277	0,70	0,9984	1,0000	0,16
Capacitância corretiva	17,54 μF	16,55 μF	5,98	1,06 μF	0,00 μF	–
Potência reativa	79,76 VAr	75,52 VAr	5,61	4,80 VAr	0,00 VAr	–
Potência ativa	85,90 W	80,13 W	7,20	83,59 W	80,13 W	4,38

Fonte: Autoria própria (2019).

capacitores). Observa-se que eles estão em fase, como desejado, com fator de potência próximo do valor unitário.

Por fim, para avaliar a robustez do método estatístico, foram realizadas várias simulações implementando dois sistemas de medição: com e sem a presença dos procedimentos de identificação e descarte de *outliers*. Dessa forma, será possível identificar o impacto do método na correção do fator de potência. Vale ressaltar que, nas simulações sem a utilização do método estatístico, o sistema de medição será semelhante à análise convencional, utilizada em [8].

Para a realização da simulação, variou-se a indutância L do circuito de análise da Figura 4 para verificar o fator de potência corrigido para várias situações. A tensão da rede elétrica V_G e a componente resistiva R foram mantidas constantes no circuito, com os valores 220 V e 80 Ω , respectivamente.

A Tabela III apresenta o fator de potência corrigido para cada simulação realizada e demonstra a análise comparativa entre os dois modelos testados. Já a Figura 6, por sua vez, apresenta a visualização gráfica dos resultados. As comparações presentes na Tabela III também demonstram a quantidade de *outliers* extremos identificados durante a análise do sistema de medição.

Quanto à comparação entre os modelos, verifica-se que os resultados apresentam semelhança significativa. Essa proximidade é motivada, principalmente, pelas limitações da análise simulacional, já que não há a presença de fatores

externos, tais como ruídos e oscilações. Com isso, os valores mensurados não apresentam variações significativas. Observa-se também que as correções com a inclusão do método estiveram mais próximas do valor unitário (Figura 6).

TABELA III. SIMULAÇÕES COM E SEM O MÉTODO ESTATÍSTICO.

Indutância L (mH)	Fator de potência corrigido		Quantidade de outliers identificados
	Sem método	Com método	
40	0,9990	0,9993	2
80	0,9995	0,9999	6
120	0,9971	0,9988	3
160	0,9971	0,9992	1
200	0,9948	0,9989	4
240	0,9955	0,9954	3
280	0,9902	0,9980	1
320	0,9955	0,9995	5
360	0,9912	0,9944	2
400	0,9972	0,9970	2
440	0,9926	0,9996	4
480	0,9819	0,9864	4

Fonte: Autoria própria (2019).

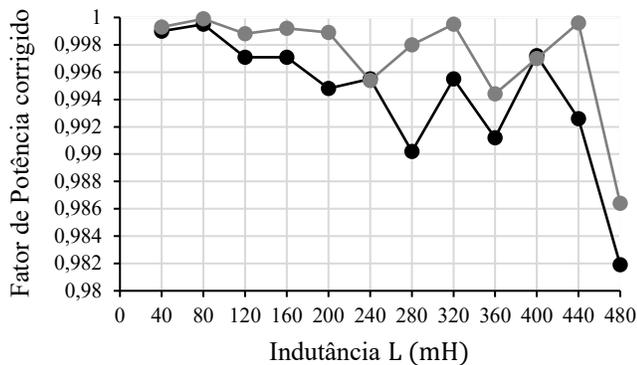


Fig. 6. Gráfico de dispersão do fator de potência corrigido com (em cinza) e sem (em preto) a implementação do método estatístico de identificação de outliers. Fonte: Autoria própria (2019).

V. CONCLUSÕES

A partir das etapas de elaboração do projeto, foi possível concretizar os objetivos pretendidos com um sistema de medição e correção do fator de potência simples, mas com significativa exatidão. Vale ressaltar que o procedimento de correção é realizado pelo projeto em torno de dez segundos. Quanto às limitações de leitura, as características de medição dos sensores utilizados devem ser cuidadosamente definidas, visto que, para medições com parâmetros próximos à sensibilidade desses dispositivos, a exatidão do instrumento de medição será consideravelmente afetada.

A partir da comparação do método de identificação de outliers com a análise convencional normalmente utilizada para a medição dos parâmetros elétricos, foi possível verificar que, na simulação, os métodos apresentaram comportamento semelhante, com resultados significativamente aproximados. Verifica-se também que, para a maioria das situações realizadas, os resultados com a implementação do método estão mais próximos do valor unitário (Figura 6).

Vale ressaltar que os efeitos de harmônicas (bastante comuns e indesejados nas redes industriais) não foram considerados no desenvolvimento do estudo. Também não foi verificada a influência do chaveamento dos capacitores de correção no circuito elétrico analisado. Além disso, é possível observar que o sistema de medição foi projetado para circuitos monofásicos.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação das limitações do projeto, tais como a possibilidade de correção em redes elétricas trifásicas e a inclusão da análise da presença de harmônicas. Além disso, recomenda-se a realização da comparação entre os procedimentos com e sem o método de identificação de outliers na perspectiva prática, para avaliar o impacto do modelo na exatidão do sistema de medição.

REFERÊNCIAS

[1] BOYLESTAD, Robert. Introdução à análise de circuitos. 12. ed., pp. 684-699, São Paulo: Pearson, 2011.

[2] SOUZA, Fabiana Pottker de et al. Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos. 2000.

[3] HART, Daniel W. Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos, pp. 42-43, McGraw Hill Brasil, 2016.

[4] MARTINS, João Raphael Souza. Controle repetitivo aplicado a compensadores série para correção de afundamentos e distorções harmônicas de tensão da rede elétrica. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

[5] MAMEDE, J. Instalações Elétricas Industriais. 7. ed., pp. 176-226, Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Ltda, 2007.

[6] BRASIL. ANEEL. Resolução normativa nº 569 de 23 de julho de 2013. Modifica a abrangência na aplicação para faturamento do excedente de reativos de unidades consumidoras e altera a Resolução Normativa nº. 414, de 9 de setembro de 2010.

[7] BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J., Instrumentação e Fundamentos de Medidas, Vol. 1, pp. 36-75, Rio de Janeiro: LTC, 2011.

[8] SOUZA, Rafael Henrique Paes de. Desenvolvimento de um dispositivo para medição de energia elétrica com análise de distorção harmônica e fator de potência. 2017.

[9] FIGUEIRA, M. Identificação de outliers. Revista Millenium, n.12. Out. 1998.

[10] SOUZA, Thiago I. A.; AQUINO, Andre L. L.; GOMES, Danielo G.. Monitoramento Ambiental de Cidades Urbanas: Detectando Outliers via Análise Fatorial Exploratória. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE CIDADES INTELIGENTES (WBCI), 2018, Natal. Anais do I Workshop Brasileiro de Cidades Inteligentes. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2018.

[11] LIMA, Luís Fernando Maia et al. A influência de outliers nos estudos métricos da informação: uma análise de dados univariados. Em Questão, v. 24, p. 216-235, 2018.

[12] CRUZ JUNIOR, B. G. et al. Identificando correlações entre bases de dados educacionais. In: Congresso Brasileiro de Informática na Educação, 6, 2017, Recife. Anais dos Workshops do VI Congresso Brasileiro de Informática na Educação. Recife: Sociedade Brasileira de Computação, 2017.

[13] OLIVEIRA, MARIA RITA PELEGRIN DE; GALVANI, Emerson. Eventos Extremos de Precipitação no Perfil Longitudinal Paraty (RJ) - Campos do Jordão (SP). Revista do departamento de Geografia, v. 32, p. 58-66, 2017.