

# Análise Estatística do Desequilíbrio de Tensão

Gabriel Marcos

**Resumo**—O desequilíbrio de tensão é um tema importante nos estudos sobre qualidade de energia elétrica, seus impactos sobre a corrente e consequentemente sobre o funcionamento, perdas e vida útil de máquinas elétricas podem ser desastrosos. Um estudo desse sinal sobre o ponto de vista da estatística e dos processos estocásticos é proposto nesse trabalho. O sinal é proveniente de medidas oriundas de uma PMU instalada em nível de distribuição.

Ao final, são apresentados os resultados, o sinal pôde ser modelado como um processo estocástico, enquanto o ruído presente no sinal pôde ser modelado como uma variável aleatória.

**Index Terms**—Qualidade de energia, desequilíbrio de tensão, processamento de sinais, processos estocásticos, estatística.

## I. INTRODUÇÃO

O Presente trabalho se objetiva a apresentar um estudo realizado a cerca de dados de medições fasoriais sincronizadas obtidos em nível de distribuição de um sistema elétrico.

Esse estudo busca modelar os dados obtidos e identificar possíveis distúrbios e oscilações ocorridos na rede durante a medição, além de comparar as medições com valores pré definidos em norma para desequilíbrio de tensão.

As PMUs são capazes de fornecer medidas como magnitude e ângulo dos fasores de tensão e corrente das três fases da rede elétrica, tudo isso acompanhado de estampas de tempo referentes ao momento de cada medição. A partir desses dados, é possível a realização de análises sobre diversos pontos de vista, e com intuito de obter diferentes conclusões a respeito do funcionamento da rede elétrica naquele determinado período de tempo em que se deu as medições.

No artigo [1], o interesse foi de se realizar uma análise de dados da perspectiva da qualidade de energia, comparando medições de PMUs instaladas em diversas regiões geográficas. A partir da distorção harmônica total, fez-se uma comparação entre medições realizadas em diferentes horários do dia, com o objetivo de se comparar o efeito de carga leve e pesada e seu impacto na qualidade da energia.

Já no artigo [2], o autor propõe-se a detalhar melhor o desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico, explicando mais afundo o conceito, apresentando diversas maneiras de se realizar o cálculo dessa grandeza e aborda alguns de seus impactos em diferentes tipos de carga.

Este artigo está dividido como a seguir. Na Seção II são apresentados os materiais e métodos usados na investigação. A apresentação e discussão dos resultados estão expostos na Seção III. Finalmente, a Seção IV traz as considerações finais do trabalho.

O autor Gabriel Marcos é mestrando pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, Brazil. E-mail: gabriel.marcos@engenharia.ufjf.br.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

### A. Setup de Medição

As chamadas Phasor Measurement Units (PMUs) são instrumentos capazes de medir fasores de tensões e correntes, sincronizados no tempo, presentes em pontos estratégicos das linhas de transmissões também podendo ser aplicadas em sistemas de distribuição. Além disso podem ser instaladas em diferentes partes dos circuitos, e contam com sistema de Global Positioning System (GPS) para realizarem sua sincronização.

Os dados analisados nesse trabalho são oriundos de medições fasoriais realizadas por micro unidades de medição fasorial ( $\mu$ PMU) na rede elétrica do laboratório nacional Lawrence Berkeley, localizado na cidade de Berkeley, no estado norte-americano da Califórnia e sua documentação pode ser encontrada em [3]. Os dados utilizados nesse trabalho referem-se a medições realizadas das 21 horas do dia 30 de setembro às 21 horas do dia 01 de outubro 2015 a uma taxa de 120 medições por segundo. A rede de elétrica de distribuição em questão opera em 7.2kV nominal, e os dados não sofreram nenhuma tratativa prévia, trata-se portanto de uma medição de uma situação real.

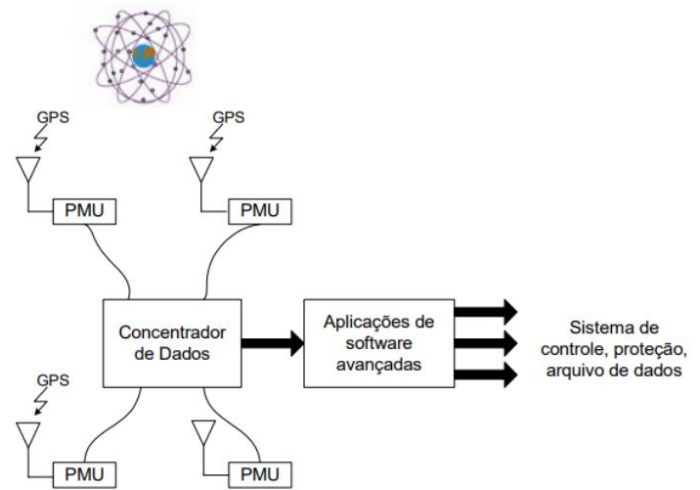


Figura 1. Visão geral de um sistema de medição fasorial.

### B. Desequilíbrio de tensão

A qualidade de energia é um fator importante de ser monitorado em sistemas de energia elétrica, tanto em nível de transmissão, quanto em nível de distribuição. De maneira superficial, pode ser definida como qual aproximada a uma forma de onda idêntica a uma senoide pura com amplitude

definida a tensão do sistema está. Com o crescente número de equipamentos eletrônicos altamente sensíveis presentes nas indústrias, faz-se necessário um monitoramento e um ajuste cada vez mais preciso na tensão de entrada das instalações. No Brasil, os limites e indicadores da qualidade de energia são padronizados pelo PRODIST (Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico Nacional), um documento elaborado pela ANEEL (Agência nacional de energia elétrica) com participação de outros agentes e entidades associados do setor elétrico nacional. Seu objetivo é padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Dentre alguns indicadores presentes na norma que estão associados com a qualidade de energia pode-se citar a variação de tensão em regime permanente, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração, distorções harmônicas e desequilíbrio de tensão.

O desequilíbrio de tensão em um sistema trifásico pode ser definido como sendo uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos ou as duas condições simultaneamente. Diversos órgãos e entidades, nacionais e internacionais, regulamentam um valor limite para a variação da tensão, alguns deles podem ser observados na imagem abaixo.

NORMA	LIMITE
NEMA MGI 14-34 (1)	2%
ANSI C.84.1-1989 (2)	3%
IEEE Orange Book – 446/1995 (3)	2,5%
GTCP/CTST/GCPS – ELETROBRÁS (4)	1,5% e 2%
ONS e ANEEL	2%

Figura 2. Limites padronizados para o desequilíbrio de tensão

Também defini-se, as equações para calcular a variação de tensão entre as fases. Nesse trabalho, seguiu-se a equação adotada pelo Operador nacional do sistema elétrico e pelo PRODIST, como pode ser observado na figura 3.

Recomendações/Normas	Expressões
IEC	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$
ONS / PRODIST	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$ ou $K = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$ , em que $\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2}$
CENELEC	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$
NRS 048	$UB = \frac{V_N}{V_P} \times 100$ ou $UB = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$ , em que $\beta = \frac{V_{12}^4 + V_{23}^4 + V_{31}^4}{(V_{12}^2 + V_{23}^2 + V_{31}^2)^2} \times 100$
ANSI	$FDV\% = \frac{DV_{MAX}}{V_{MED}} \times 100$
IEEE	$FDV\% = \frac{3 \times (V_{MAX} - V_{MIN})}{V_A + V_B + V_C} \times 100$

Figura 3. Equações para cálculo do desequilíbrio de tensão

### C. Processamento das Amostras e Estimação de Parâmetros

Uma vez obtido os dados de medição das PMUS para as 3 fases do sistema, este trabalho será focado apenas no módulo da tensão das fases. Pelo grande volume de dados, torna-se difícil modelá-los de forma estatística diretamente, antes de um pré processamento. Isso se dá pois a distribuição das amostras não segue nenhum padrão usual da estatística.

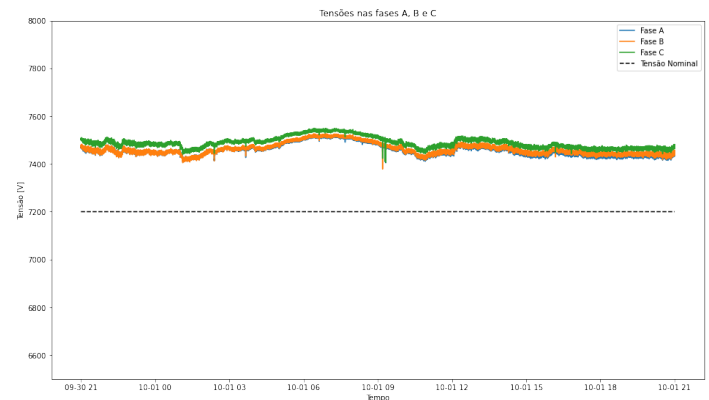


Figura 4. Tensões nas fases A,B e C durante as 24 horas de medição

Aplicando a equação do desequilíbrio de tensão para esse sinal, pode-se gerar um sinal que representa o desequilíbrio entre as fases durante as 24 horas em que a medição foi realizada.

Primeiramente, deve-se aplicar um filtro ao sinal a fim de tirar as variações de alta frequência que estão presentes no mesmo, uma vez que essas variações podem comprometer nossos resultados com falsos valores, devido a uma considerável presença de outliers no sinal original.

O filtro média móvel é um cálculo para analisar pontos de dados através da criação de uma série de médias de diferentes subconjuntos do conjunto de dados completo e é um tipo

de filtro de resposta ao impulso finito. Desta forma, pode-se obter um sinal mais propício para se aplicar as ferramentas estatísticas que serão vistas a seguir, além disso, pode-se separar o ruído presente nas medições do sinal real. Na figura 5 observa-se o sinal original do desequilíbrio de tensão durante as 24 horas de medição e o sinal, em laranja, filtrado pelo média móvel, sem os outliers e as variações de alta frequência.

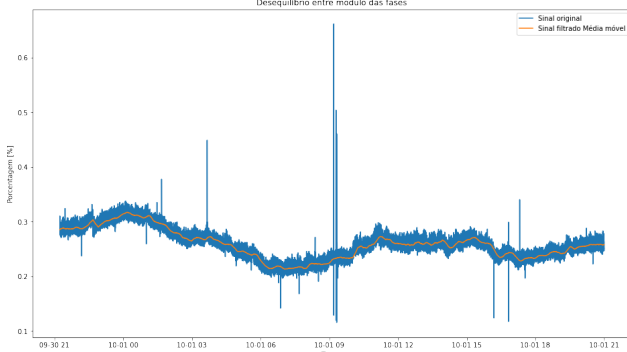


Figura 5. Desequilíbrio de tensão para às 24 horas de medição

Com os dados do desequilíbrio de tensão em mãos, pode-se observar que os valores das amostras se encontram dentro dos limites estipulados por todas as entidades descritas na figura 2. O sinal possui uma média = 0.2584% e um desvio padrão = 0.0269%. Logo, para esse dia de medição, e esse ponto da rede, pode-se considerar, sob o ponto de vista do desequilíbrio da tensão, que a rede tem uma boa qualidade de energia.

Pode-se obter o ruído do sinal de forma isolada a partir da subtração do sinal filtrado ao sinal original, que foram representados na figura 5 pelos sinais laranja e azul, respectivamente.

O resultado, é o ruído puro que estava presente no sinal de desequilíbrio original, com todas as variações e outliers, esse sinal é mostrado na figura 6

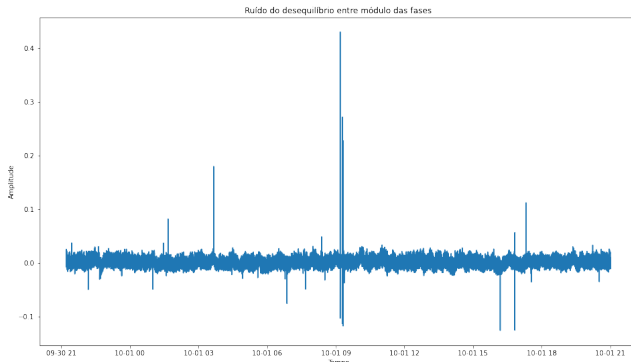


Figura 6. Ruído do sinal original do Desequilíbrio de tensão para às 24 horas de medição

### III. RESULTADOS

Para iniciar as análises estatísticas a cerca dos sinais anteriormente descritos, plotou-se o boxplot com objetivo de um maior entendimento visual e interpretação do

comportamento dos 3 sinais, o desequilíbrio original, o filtrado pelo média móvel e o ruído.

O Boxplot ou box plot é um diagrama de caixa construído utilizando as referências de valores mínimos e máximos, primeiro e terceiro quartil, mediana e outliers da base de dados. O boxplot tem como objetivo estudar as medidas estatística do conjunto de dados, como propriedades de locação, variabilidade, média, e outliers.

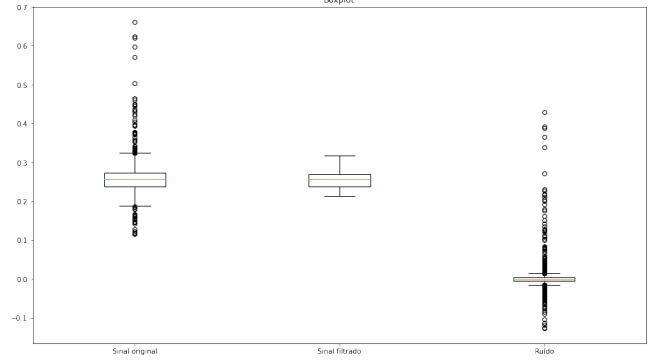


Figura 7. Boxplot dos sinais

Com o auxílio do boxplot, fica fácil perceber a atuação do filtro média móvel sobre o sinal original. Foram preservadas as características intrínsecas ao sinal, como a mediana, os quartis e a amplitude, e os ruídos e os outliers foram todos removidos e apresentados no sinal do ruído.

A partir do sinal filtrado do desequilíbrio de tensão, pode-se perceber, a partir dos gráficos de autocorrelação e autocorrelação parcial do sinal, que ele pode ser modelado facilmente a partir de um modelo autoregressivo.

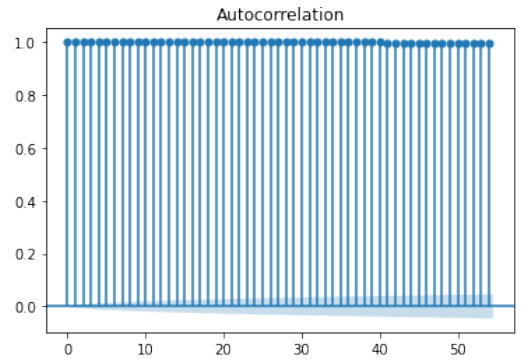


Figura 8. Autocorrelação do sinal filtrado

Com base no gráfico da figura 8, fica evidente a alta relação entre as amostras presentes no sinal, ou seja, como cada amostra tem uma forte influencia sobre as amostras vizinhas.

De forma geral, podemos escrever um modelo autorregressivo da seguinte forma:

$$y_t = \delta + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \epsilon_t \quad (1)$$

em que  $\delta$  é uma constante,  $\phi_p$  são os pesos associados a cada amostra passada  $y_p$  e  $\epsilon_t$  é o ruído associado ao modelo.

Da figura 9, tem-se que o sinal em questão pode ser modelado por AR(1), ou seja, um modelo autoregressivo de

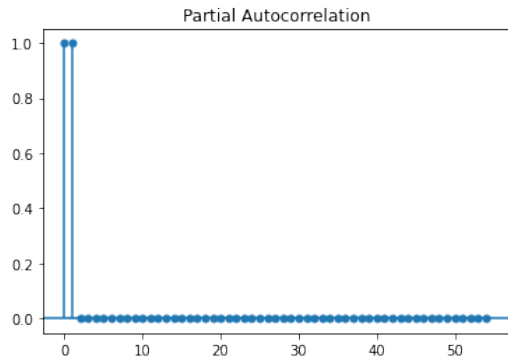


Figura 9. Autocorrelação parcial do sinal filtrado

ordem 1, uma vez que sua autocorrelação parcial possui duas amostras com valores significativos. A ordem do modelo se dá pelas amostras com valor significativo da autocorrelação parcial - 1.

Com o auxílio das equações de Yule-Walker pode-se determinar os coeficientes da equação do modelo AR(1). Para isso, utilizou-se a biblioteca statsmodels do python. Com ela, obteve-se os seguintes valores:

$$\phi_1 = 0.99999995 \text{ e } \delta = 8.300107363934958 * e - 06$$

Ou seja, um peso para primeira amostra passada de praticamente um e uma constante praticamente zero. Além disso, incluiu-se um ruído gaussiano no modelo através da variável  $\epsilon_t$ .

Como resultado do modelo criado, plotou-se a função de probabilidade acumulada em comparação com a do sinal do desequilíbrio filtrado original que foi base para desenvolvimento do modelo. Com a figura 10 pode-se notar uma boa aproximação do modelo autoregressivo com o sinal original.

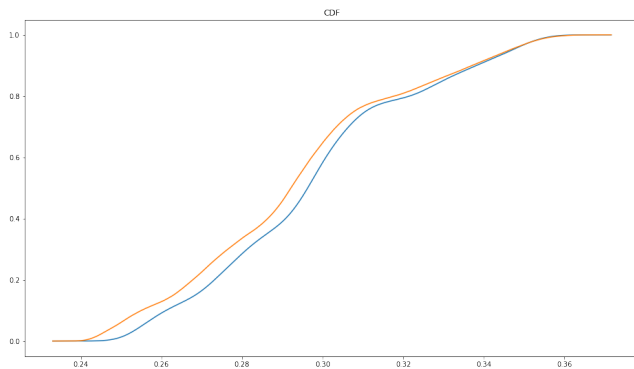


Figura 10. Funções cumulativas do desequilíbrio de tensão filtrado e do modelo autoregressivo de ordem 1

O ruído do sinal foi modelado como uma variável aleatória. As quatro distribuições de probabilidades que mais se aproximaram da distribuição das amostras pode ser observados na figura 11, que foi construída com o auxílio da análise do gráfico Q-Q do sinal. Um gráfico Q-Q ("Q" significa quantil) é um gráfico de probabilidades, que é um método gráfico para comparar duas distribuições de probabilidade, traçando seus quantis uns contra os outros. Se as duas distribuições

que estão sendo comparadas são semelhantes, os pontos no gráfico Q-Q vão repousar na linha  $y = x$ , aproximadamente. Se as distribuições são linearmente relacionadas, os pontos no gráfico Q-Q irão repousar em uma linha, aproximadamente, mas não necessariamente na linha  $y = x$ . As distribuições que melhor representaram o sinal foram a distribuição gaussiana ou normal, a distribuição beta, a distribuição lognorm e a t de Student.

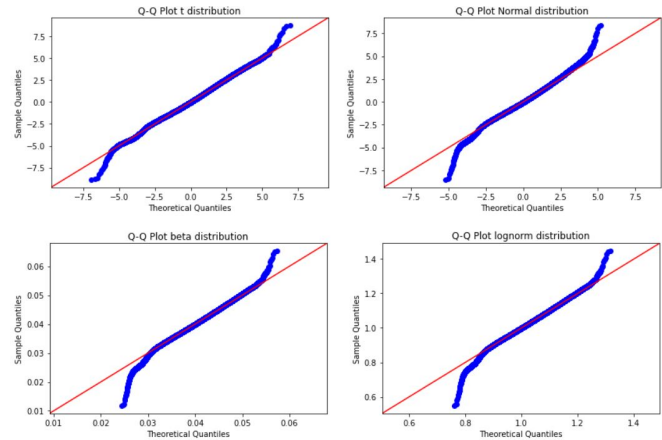


Figura 11. Gráfico QQ

#### IV. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi possível se observar na prática como determinar a ordem do filtro a partir da análise do gráfico de autocorrelação parcial do processo, além disso, Os coeficientes do filtro foram facilmente determinados via equação de Yule Walker. Por fim, foi possível aplicar algumas ferramentas estatísticas importantes aprendidas ao longo do curso para se fazer uma correta análise e estudo do sinal.

Para trabalhos futuros, seria interessante fazer uma análise do desequilíbrio entre as fases a partir da defasagem entre os ângulos das tensões. Adicionalmente, conferir e relacionar os impactos gerados no sinal de corrente por causa do desequilíbrio de tensão. Sob a perspectiva da análise estatística, avaliar a possibilidade de se modelar o sinal através de outros processos estocásticos.

#### REFERÊNCIAS

- [1] J. L. P. e Suellen Ribeiro, "Uso de dados de pmu para análise da qualidade de energia elétrica," 2014.
- [2] "O SETOR ELÉTRICO. Desequilíbrios de Tensão." [http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86\\_fasc\\_qualidade\\_cap3.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86_fasc_qualidade_cap3.pdf), acesso em 20 julho de 2021.
- [3] C. R. Emma M. Stewart, Anna Liao, "Open pμmu: A real world reference distribution micro-phasor measurement unit data set for research and application development," 2016.