

Avaliação Experimental do Desempenho do Estimador de Estados NDS para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos

Humberto Cunha de Oliveira
Núcleo de Qualidade da Energia
Elétrica - NQEE
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
humberto.oliveira@ufu.br

José Carlos de Oliveira
Núcleo de Qualidade da Energia
Elétrica - NQEE
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
jcoliveira@ufu.br

Isaque Nogueira Gondim
Laboratório de Distribuição de Energia
Elétrica - LADEE
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
gondim.isaque@gmail.com

J

Resumo — Danos elétricos em equipamentos eletroeletrônicos no âmbito residencial, comercial e industrial, têm impulsionado a busca por aprimoramentos nos procedimentos de análise estabelecidos pelo módulo 9 do Prodist da ANEEL. Neste contexto, embora o emprego de medidores para monitoramento dos eventos ocorridos em campo seja a opção mais confiável para o conhecimento dos fenômenos anômalos manifestados nas instalações, sua viabilidade econômica é limitada. Procurando contornar estas dificuldades, metodologias baseadas em simulações computacionais e técnicas de estimação de estados têm sido consideradas para inferir os esforços elétricos responsáveis pelos danos ocorridos em processos e em equipamentos. Neste contexto, este trabalho contempla uma análise aplicativa e validação de uma estratégia de análise baseada em estimadores de estados para eventos associados com transitórios eletromagnéticos focando, pontualmente, o uso do método da Substituição Derivativa Numérica (NDS). Tendo por objetivo a avaliação do desempenho deste recurso, este artigo encontra-se centrado numa análise da correlação entre os resultados obtidos de forma experimental e computacional, de um evento transitório imposto sobre uma rede elétrica implementada laboratorialmente. Assim, a abordagem estabelecida permite comparar medições reais com estimativas computacionais, analisando o nível de aderência do desempenho do método aplicado para estudos de distúrbios elétricos, nos termos requeridos pelos estudos de ressarcimento por danos elétricos.

Palavras-chave — *Transitórios eletromagnéticos, análise de sistemas de potência, estimação de estados de transitórios eletromagnéticos, modelagem dinâmica.*

I. INTRODUÇÃO

Diante do crescente número de pedidos de indenização por danos elétricos ocorridos em equipamentos e processos (PIDs), as concessionárias de energia, em conjunto com órgãos governamentais e de fiscalização, têm buscado alternativas para o aprimoramento do processo de análise descrito no módulo 9 dos Procedimentos de Distribuição (Prodist), estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [1], [2], [3].

Nesse contexto, visando fornecer meios fundamentados em procedimentos embasados na ciência e tecnologia, há um expressivo número de trabalhos baseados na relação entre os efeitos dielétricos e térmicos impactantes e os padrões de suportabilidade dos equipamentos e processos [4], [5], [6], [7]. Todavia, para as análises em pauta, torna-

se imperativo que a fonte do distúrbio ocorrido na rede elétrica seja contemplada de forma a representar a ocorrência em campo.

Naturalmente, a solução para o conhecimento do esforço térmico e dielétrico advindo da rede elétrica e responsável pelo ocorrido com o produto reclamado, seria a instalação de equipamentos para monitorar as condições anômalas. Não obstante esta estratégia se mostrar atrativa, visto que ofereceria uma estratégia confiável e segura para os propósitos das avaliações dos pedidos de indenização, isto não é economicamente viável pois iria requerer um grande número de medidores nas instalações. Assim, atualmente, os procedimentos adotados para os estudos se baseiam tão apenas em nexos de casualidade. E tal recurso, como se sabe, possui grandes fragilidades para ambas as partes, ou seja, o supridor e o consumidor [1], [8].

Numa outra via, muitos trabalhos utilizam recursos computacionais para os fins aqui postos. Nestes termos, fundamentado em simulações computacionais realizadas em softwares como *Electromagnetic Transients with Direct Current* (EMTDC), *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), *Alternative Transients Program* (ATP) e outros similares [9], [10], [11], tem-se uma estratégia que se mostra promissora. Nestes softwares são estabelecidos modelos das redes elétricas, com sua topologia e parametrização factíveis de obtenção via recursos georreferenciados, representados os equipamentos focados nas reclamações dos consumidores e, impostos os distúrbios ocorridos no complexo elétrico. Assim procedendo, os eventos ocorridos são propagados até a unidade consumidora, onde são estabelecidos termos comparativos entre os esforços impactantes e os níveis de suportabilidade dos dispositivos danificados e contemplados nos estudos de ressarcimento.

Procurando atender os fundamentos de um processo que ofereça confiabilidade para a análise, há uma outra possibilidade, baseada em ferramentas de Estimação de Estados (EEs), se apresenta como solução que congrega aspectos associados com medições e recursos computacionais. Esta estratégia se fundamenta em monitorações feitas para pontos do complexo elétrico e, contando com estes registros, empregar recursos que permitam determinar as grandezas elétricas de operação esperadas para outros locais. Esta técnica tem por objetivo

tornar os mais diversos locais das redes elétricas em barramentos e linhas em pontos totalmente observáveis (TO) [12], [13], [14].

Visando atender aos objetivos supra postos, em [15], [16] são encontradas ferramentas que podem contemplar os requisitos dos estudos aqui focados, as quais conhecidas por *Power Quality State Estimators* (PQSEs) [17], [18], [19], [20], [21]

Dentre as ferramentas que compõem o conjunto de PQSEs, os estimadores de estados de eventos transitórios, conhecido como *Transient State Estimators* (TSE), se destacam por estimar formas de onda transitórias de tensões e correntes em locais não monitorados da rede elétrica, utilizando medições disponíveis. Desta maneira, elas se mostram promissoras para os fins estabelecidos [21], [22].

No contexto das abordagens que compõem os TSE, a Substituição Derivativa Numérica (NDS), proposta em [28], se baseia na aplicação de diferenças finitas para discretizar as equações diferenciais ordinárias (ODEs). Estas modelam a dinâmica de tensão e corrente em elementos da rede elétrica, como transformadores e linhas de transmissão e permitem a construção direta da matriz inversa de relações da rede, H^{-1} , sem a necessidade de computá-la explicitamente. Essa característica confere ao NDS o potencial de reduzir os esforços computacionais e aumentar a eficiência da implementação.

Focado na área de estudos discorrida, este artigo objetiva avaliar o desempenho do estimador de estados NDS em um sistema laboratorial de pequeno porte, com características similares a um alimentador radial de distribuição e suas cargas supridas. Esse ambiente experimental é empregado para avaliar a efetividade do método de análise através da correlação entre as grandezas obtidas via medições reais com aquelas fornecidas pelo método empregado para a estimação de estado.

Somado a esta seção introdutória, este artigo está estruturado em cinco seções. A Seção II apresenta o referencial teórico do método NDS, detalhando sua formulação matemática e a solução da equação de estados empregando a estratégia de análise em foco. Na Seção III, são descritos e discutidos aspectos relacionados com os trabalhos laboratoriais, apresentando a estrutura física estabelecida e os resultados das medições diretas feitas no sistema elétrico empregado. Já na Seção IV é feita a aplicação do estimador do estado e avaliada a efetividade do processo de estimação NDS. Por fim, a Seção V traz as conclusões do trabalho, sintetizando os principais achados e discutindo perspectivas futuras para a aplicação do NDS e sua viabilidade aplicativa à temática de ressarcimento por danos elétricos.

II. FUNDAMENTOS DO ESTIMADOR DE ESTADO NDS

A premissa do TSE se deriva da equação geral de estados direcionada ao estimador tradicional proposto em [15], para avaliações de desempenho de fluxo de potência para redes elétricas sob condições operacionais sob regime permanente. A estratégia, visando a ampliação do campo de estudos para aplicação para as situações envolvendo transitórios eletromagnéticos, foi então adequada para que, a partir de grandezas monitoradas em determinados pontos do sistema, a observabilidade dos demais barramentos e linhas que perfazem a estrutura topológica da rede. Assim,

tomando por base os resultados dos registros em campo feitos através de instrumentos de medição, que possuam característica de aquisição instantânea, com uma taxa de amostragem (Δt^n) para a n -ésima amostra, procede-se à modelagem dinâmica dos elementos elétricos conectados em cada ramo do sistema como as linhas de transmissão e transformadores [21], [23].

Desse modo, de acordo com os fundamentos que norteiam o estimador de estado, o problema da estimação é equacionado através do emprego de (1), cuja expressão é aplicada para cada incremento de tempo Δt^n .

$$[z]^{\Delta t^n} = ([H])^{\Delta t^n} \cdot [x]^{\Delta t^n} + e^{\Delta t^n} \quad (1)$$

Onde: z representa o vetor coluna ($m \times 1$) do número de medições (conhecidas) para o sistema em análise; Δt^n representa a taxa amostral do vetor de medições z ; x representa o vetor coluna ($n \times 1$) da quantidade de variáveis de estado do sistema e que se apresentam como cerne da busca; H é a matriz ($m \times n$) que correlaciona as grandezas Z e X ; e é um vetor que expressa os erros de medição.

Para o caso da NDS o problema geral da EE dado por (1) é reformulado em [24], a qual propõe meios para a construção direta de H^{-1} . Assim procedendo, as variáveis de estado são obtidas pela resolução de (2).

$$[x]^{\Delta t^n} = ([H]^{-1})^{\Delta t^n} \cdot [z]^{\Delta t^n} + e^{\Delta t^n} \quad (2)$$

As ODEs correspondentes aos ramos do sistema são também discretizadas em função de Δt^n . Ao adequar a diferenciação numérica ao problema de estimação, pode-se aproximar uma ODE pela técnica de dois, três ou cinco pontos adotando a diferencial finita centralizada. Seguindo o mesmo direcionamento realizado em [24], a fórmula central de três pontos gera um erro no processo de discretização da ordem de $O(\Delta t^2)$. Para as ODEs de primeira e segunda ordem, utiliza-se, respectivamente (3) e (4) para substituição no instante amostral n .

$$f'(t) = \frac{f^{n+\Delta t} - f^{n-\Delta t}}{2\Delta t} + O(\Delta t^2) \quad (3)$$

$$f''(t) = \frac{f^{n+\Delta t} - 2f^n + f^{n-\Delta t}}{\Delta t^2} + O(\Delta t^2) \quad (4)$$

Em sua essência, um sistema elétrico sob a ótica de qualquer formulação dinâmica é fragmentado em ramos, sendo cada um deles composto pela junção de resistências (R), capacitâncias (C) e indutâncias (L). Com base na relação mencionada, as formulações dinâmicas estabelecidas pelo NDS são descritas na sequência.

A. Modelo dinâmico das Linhas de Transmissão Trifásicas

O desenvolvimento do modelo dinâmico para as linhas de transmissão na NDS decorre da análise da representação mostrada na Fig. 1. Nessa, verifica-se que os parâmetros próprios e mútuos de resistência, indutância e capacitância da linha são considerados e concentrados no modelo π de forma trifásica em vetores e matrizes apropriados.

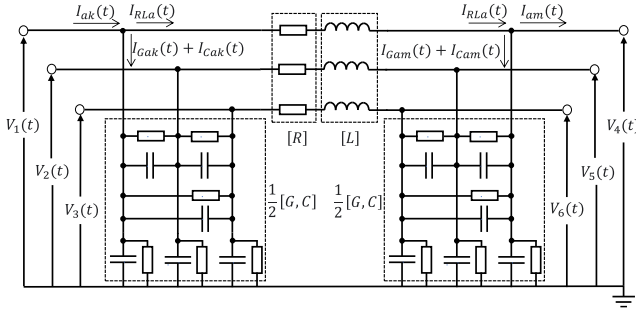


Fig. 1. Linha de transmissão trifásica modelo π com impedâncias mutuas e efeito capacitivo. Adaptado de [25].

Procedendo com o equacionamento dinâmico, inicialmente é feita a análise nodal aplicada ao nó k , que se refere ao transmissor da linha. Como resultado, são obtidas (5) e (6), as quais contemplam a composição trifásica da estrutura elétrica na forma de vetores e matrizes.

$$I_{km}(t) = I_C(t) + I_{RL}(t) + I_G(t) \quad (5)$$

$$I_C(t) = C \cdot \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (6)$$

Além de (5) e (6), a análise das malhas conduza à relação expressa em (7).

$$V_k(t) - V_m(t) = R \cdot I_{RL}(t) + L \cdot \frac{d(I_{RL}(t))}{dt} \quad (7)$$

Prosseguindo, reformula-se (5) em função de $I_{RL}(t)$ e é imposta a derivada e, após as devidas substituições de (3) e (4) em (7), a equação matricial é solucionada para o domínio do tempo através de (8).

$$V_m(t) = (I + RG) \cdot \frac{d(V_k(t))}{dt} + (RC + LG) \cdot \frac{d(V_k(t))}{dt} + (LC) \cdot \frac{d^2(V_k(t))}{dt^2} - R \cdot I_{km}(t) - L \cdot \frac{d(I_{km}(t))}{dt} \quad (8)$$

A equação (8) deve ser então discretizada pela utilização de (3) e (4). Isto é feito para obter V_m^n para a n -ésima amostra das medições considerando V_K^n como uma medição trifásica de tensão em um barramento k . Também, destaca-se que I_{km}^n corresponde ao resultado da monitoração da corrente trifásica que se estabelece da barra k para a m . Assim procedendo, é obtido o modelo dinâmico estabelecido em (9).

$$V_m^n = p_1 \cdot V_k^n + p_2 \cdot V_k^{n+\Delta t} + p_3 \cdot V_k^{n-\Delta t} + p_4 \cdot I_{km}^n + p_5 \cdot I_{km}^{n+\Delta t} + p_6 \cdot I_{km}^{n-\Delta t} \quad (9)$$

Onde:

$$p_1 = \left[I + RG - \frac{2LC}{\Delta t^2} \right] \quad (10)$$

$$p_2 = \left[\frac{RC+LG}{2\Delta t} + \frac{LC}{\Delta t^2} \right] \quad (11)$$

$$p_3 = \left[\frac{LC}{\Delta t^2} + \frac{RC+LG}{2\Delta t} \right] \quad (12)$$

$$p_4 = [-R] \quad (13)$$

$$p_5 = \left[\frac{L}{2\Delta t} \right] \quad (14)$$

$$p_6 = \left[-\frac{L}{2\Delta t} \right] \quad (15)$$

B. Modelo Dinâmico dos Transformadores Trifásicos

Como ilustrado na Fig. 2, os parâmetros equivalentes dos transformadores, R e L , são agrupados por matrizes 3×3 e referidos para o lado onde são feitas as medições. Isto posto, os componentes são conectados em série com um transformador ideal, que possui relação de transformação a [24].

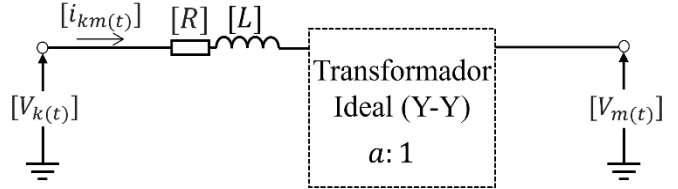


Fig. 2. Modelo de transformador trifásico com ligação Y-Y. Adaptado de [24].

As tensões primárias $V_k(t)$ e as correntes que fluem para o secundário $I_{km}(t)$ são definidas por vetores de dimensão 3×1 para estimação do vetor de tensões trifásicas no secundário $V_m(t)$. Assim, é estabelecida a formulação da equação no domínio do tempo que representa o comportamento dinâmico do transformador, o qual considera que do lado primário do transformador encontram-se disponibilizadas as medições trifásicas de tensões e correntes.

Ao realizar a análise das malhas de Kirchhoff na Fig.2 obtém-se (16).

$$V_m(t) = a^{-1} \left(V_k(t) - R \cdot I_{km}(t) - L \cdot \frac{d(I_{km}(t))}{dt} \right) \quad (16)$$

Com base na diferença finita regressiva definida em (3) e (4), através de (17) fica obtido o comportamento dinâmico para o transformador. Observa-se, novamente, que somente após três amostras, ou seja, $n - \Delta t$, n e $n + \Delta t$, o valor associado às variáveis de estado no instante n pode ser estimado.

$$V_m^n = c_1 \cdot V_k^n + c_2 \cdot I_{km}^n + c_3 \cdot I_{km}^{n+\Delta t} + c_4 \cdot I_{km}^{n-\Delta t} \quad (17)$$

Onde:

$$c_1 = a^{-1} \quad (18)$$

$$c_2 = a^{-1} \cdot [-R] \quad (19)$$

$$c_3 = a^{-1} \cdot \left[-\frac{L}{2\Delta t} \right] \quad (20)$$

$$c_4 = a^{-1} \cdot \left[\frac{L}{2\Delta t} \right] \quad (21)$$

C. Construção e Solução da Equação de Estados

A construção da matriz H^{-1} para resolução do TSE conforme [24], é feita de forma implícita, sem maiores detalhamentos. Neste trabalho, é realizada uma proposta para fornecer maiores subsídios para a obtenção de H^{-1} e subsequente solução da equação de estados:

- De acordo com os fundamentos que regem o método NDS, este se restringe à estimação utilizando apenas medições de tensão e corrente, combinando os elementos do sistema para formar a matriz de medição dinâmica. No entanto, neste caso, não são armazenados valores prévios para a estimação subsequente. Ordenadamente, as medições de tensão e corrente para um tipo de ramo em específico nos instantes t , $t+\Delta t$, e $t-2\Delta t$ são posicionadas sequencialmente no vetor z ;
- A matriz H^{-1} se apresenta com dimensões em que o número de linhas será igual ao número de variáveis de estado desejáveis (n) e o número de colunas será igual ao número de medições disponíveis (m), resultando, assim, em uma matriz com dimensão $H_{n \times m}^{-1}$;
- Para medições de tensão é posicionado o valor 1 para a coluna da matriz H^{-1} equivalente a posição da especifica medição em z e, para o restante dos elementos da linha, é atribuído o valor 0;
- A ordem de posicionamento dos tipos de medição no vetor z é das medições trifásicas de tensões e correntes, conforme vetores definidos em (4), sempre no sentido da barra k para m ou de m para k ;
- A solução da equação de estados ocorre por aplicação direta de (2) para obtenção dos oscilogramas das tensões fase-neutro nos barramentos do sistema. Uma vez determinadas as tensões, os oscilogramas das correntes que fluem em direção à carga podem ser obtidos para os diversos ramos que compõem a estrutura do sistema.

Para o caso das linhas de transmissão, para a montagem de H^{-1} para um sistema de 2 barras, nomeadas por k e m , o número de medições e variáveis de estado corresponderá a 6. No entanto, a dimensão de z deverá ser estendida 3 vezes para comportar as variáveis para o instante $t-\Delta t$, t e $t+\Delta t$. Logo, nessa condição a sua real dimensão será $z_{18 \times 1}$ e a matriz H^{-1} terá, por consequência, dimensões de $H_{6 \times 18}^{-1}$. Os valores a serem posicionados em H^{-1} nos termos " H_{nm} " obedecerão a ordem sequencial dos termos matriciais de p_1 a p_6 definidos de (10) a (15). A Fig. 3 ilustra esse procedimento.

$$\begin{bmatrix} [V_k] \\ [V_m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ p_{111} & p_{112} & p_{113} & \dots & p_{612} & p_{613} \\ p_{121} & p_{122} & p_{123} & \dots & p_{621} & p_{623} \\ p_{131} & p_{132} & p_{133} & \dots & p_{631} & p_{633} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{k1}(t) \\ V_{k2}(t) \\ V_{k3}(t) \\ \vdots \\ I_{k2}(t-\Delta t) \\ I_{k3}(t-\Delta t) \end{bmatrix}$$

6 linhas em $[X]$ 6 linhas e 18 colunas em $[H]^{-1}$ 18 linhas em $[Z]$

Fig. 3. Construção da equação de estados para linhas de transmissão no método NDS.

Quando se trata da montagem de H^{-1} para transformadores, seguindo o estabelecido em (17), o vetor z deverá ter sua dimensão estendida para comportar as variáveis para o instante t , para as de tensões trifásicas em k e as correntes t que se estabelecem entre as barras k e m nos instantes o instante $t-\Delta t$, t e $t+\Delta t$. Logo, a dimensão real de z será 12. Nestes termos, a matriz H^{-1} terá dimensões de $H_{6 \times 12}^{-1}$, e ainda, os valores a serem inseridos em H^{-1} obedecerão a ordem sequencial de c_1 a c_4 . A Fig. 4 ilustra esse procedimento.

$$\begin{bmatrix} [V_k] \\ [V_m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ c_{111} & c_{112} & c_{113} & \dots & c_{412} & c_{413} \\ c_{121} & c_{122} & c_{123} & \dots & c_{421} & c_{423} \\ c_{131} & c_{132} & c_{133} & \dots & c_{431} & c_{433} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{k1}(t) \\ V_{k2}(t) \\ V_{k3}(t) \\ \vdots \\ I_{k2}(t-\Delta t) \\ I_{k3}(t-\Delta t) \end{bmatrix}$$

6 linhas em $[X]$ 6 linhas e 12 colunas em $[H]^{-1}$ 12 linhas em $[Z]$

Fig. 4. Construção da equação de estados para transformadores no método NDS.

III. ARRANJO EXPERIMENTAL E MEDIÇÕES

Em consonância com os objetivos deste trabalho, qual seja, a avaliação da efetividade do método NDS para a estimação de estado de barramentos e linhas não monitoradas, foi estabelecida uma estrutura experimental, em escala reduzida, nos termos aqui informado. Destaca-se que o arranjo laboratorial, passível de medições em todos os seus barramentos e linhas, visa a obtenção de uma base de referência para a verificação do nível de aderência do desempenho da estratégia empregada para fins da estimação. A estratégia empregada consiste, pois, no prévio conhecimento das tensões medidas para todos os pontos do arranjo, para posterior correlação com os resultados oferecidos pelo método de análise. Também, contando com o banco de dados dos registros, é feita a seleção das informações para a aplicação do método NDS.

A. Arranjo físico laboratorial e caracterização do estudo de caso

A Fig. 5(a) apresenta a constituição física do sistema laboratorial utilizado. Embora sua topologia seja bastante simplificada, esse arranjo se mostra apropriado aos objetivos propostos. Destaca-se que a estrutura empregada é similar a utilizada para estudos de distorções harmônicas feitos em [26].

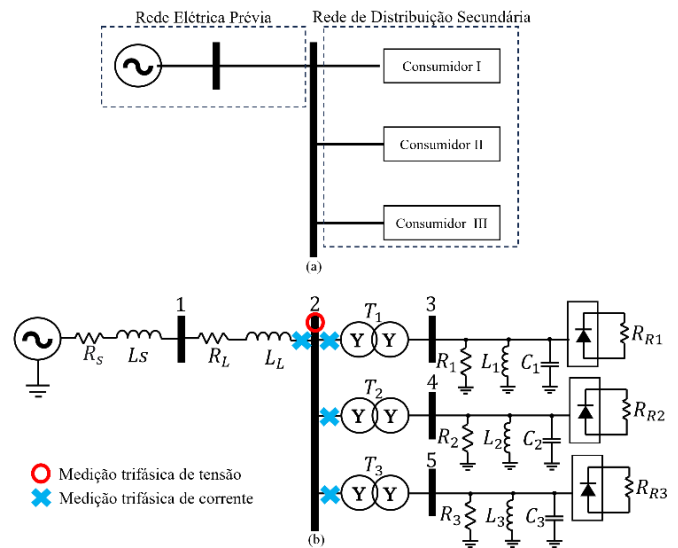


Fig. 5. (a) – Estrutura física do arranjo laboratorial. (b) – Diagrama unifilar do arranjo empregado.

O sistema utilizado, como mostrado na Fig. 5, configura-se como um alimentador radial, composto por dois barramentos principais, sendo o segundo ramificado em outros três, totalizando uma estrutura elétrica de cinco

barramentos, cada um associado às respectivas cargas. A alimentação do sistema é fornecida por uma fonte controlada, que possibilita a imposição de diversos distúrbios, incluindo transitórios eletromagnéticos. Os parâmetros dos componentes e demais características do sistema utilizado nas análises deste estudo estão detalhados em [26].

Em relação às partes que perfazem o sistema experimental, na Fig. 6(a) tem-se uma fonte programável, conectada ao barramento 1 por meio de reatores de núcleo de ar, com o objetivo de representar o nível de curto-circuito do barramento principal. Este, por sua vez, alimenta uma linha de distribuição até a barra dos consumidores. Na Fig. 6(b), são ilustrados os reatores que representam a linha de interconexão entre a fonte e o barramento das cargas. Por fim, as unidades consumidoras 1, 2 e 3 são supridas pelo barramento 2 por meio de transformadores de conexão Y-Y, conforme mostrado na Fig. 6(c).

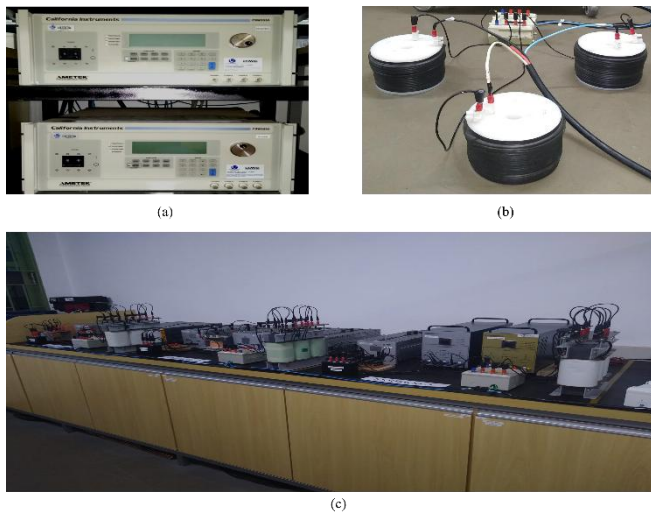


Fig. 6. (a) – Fonte controlada supridora. (b) – reatores a núcleo de ar representando linhas de transmissão. (c) – cargas das unidades de consumo 1, 2 e 3.

Com base nos recursos disponibilizados pela fonte de alimentação controlada, a qual possui uma ampla gama de possibilidades para a geração de sinais com perturbações, os experimentos conduzidos neste estudo foram feitos a partir dos eventos descritos na Tabela I. Esses estão associados com uma variação de tensão na forma de um afundamento desta grandeza, seguida de uma interrupção e, posteriormente, pela restauração das condições normais de operação.

TABELA I. EVENTOS TRANSITÓRIOS EMPREGADOS PARA OS ESTUDOS DE DESEMPENHO DO ESTIMADOR DE ESTADO NDS.

Estágios de Chaveamento	Parâmetros dos Eventos Aplicados		
	Descrição	Instante de Início (ms)	Duração (ciclos)
1	Incidência de um afundamento de tensão	17	6
2	Interrupção do fornecimento	120 para 170	3
3	Restabelecimento da alimentação	170	-

B. Oscilogramas das Tensões Medidas

Para fins dos registros da sequência de fenômenos apontados na Tabela I foi empregado um analisador de

qualidade de energia Elspec Pure Black Box (PBB). A Fig. 7 exhibe as formas de onda das tensões medidas e que servirão como base de referência (gabarito) para os 5 barramentos que perfazem a estrutura experimental.

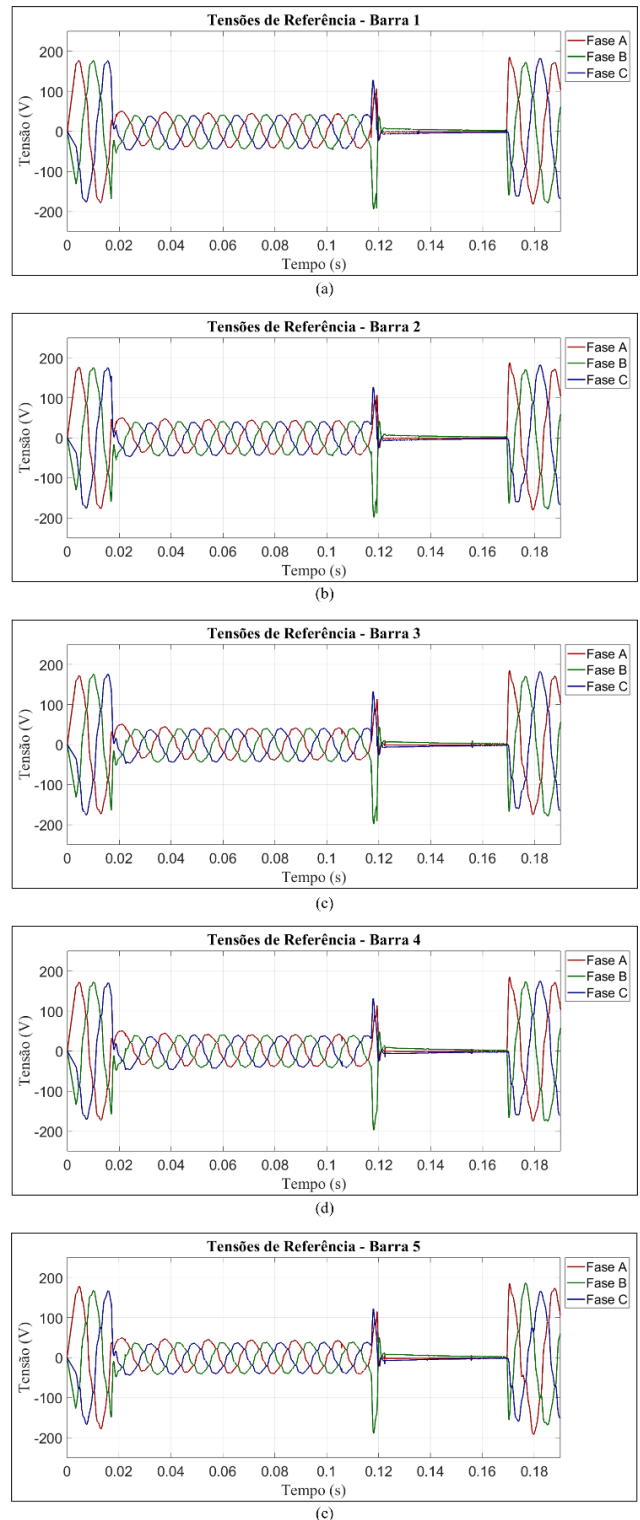


Fig. 7. Oscilogramas das Tensões de referência obtidas experimentalmente para as barras de 1 a 5.

Na Fig. 7, os oscilogramas evidenciam a evolução temporal da tensão (em volts) para as fases A (vermelho), B (verde) e C (azul), a partir dos dados fornecidos pelo medidor PBB através de uma taxa de amostragem de 512 pontos, por

ciclo, para a frequência de 60 Hz. Assim, as monitorações ponto a ponto compreendem um passo de integração máximo de aproximadamente 32,5 μ s. Devido à disponibilidade limitada, um único dispositivo foi utilizado para realizar medições sucessivas do mesmo evento em todos os barramentos da configuração experimental apresentada. Após a coleta dos dados, as grandezas coletadas foram sincronizadas.

Com relação ao transitório aplicado, percebe-se que as três fases exibem oscilações de alta frequência, com defasagens características do sistema trifásico analisado. Os registros indicam variações abruptas nos valores das tensões nas formas de onda, sendo que, por volta de ~0,12 s, a fase B atinge o maior pico de tensão nos barramentos.

Fundamentado nas medições acima postas, para fins da aplicação do estimador NDS, apenas uma das medições de tensão será empregada. Como indicado na Fig. 5(b), esta corresponde ao registro conduzido para o barramento 2, junto ao qual são também monitoradas as correntes que fluem para os barramentos 1, 3, 4 e 5. Embora tenham sido obtidas as correntes, estas grandezas não são aqui adicionadas por questão de espaço, mas cumprem parte essencial na aplicação do estimador. Assim procedendo fica então entendido que, para fins do emprego da técnica de análise em pauta, os demais pontos do sistema são tidos como não monitorados.

IV. APLICAÇÃO DO ESTIMADOR NDS

Baseado nos fundamentos postos para o estimador NDS, nesta seção são apresentados os resultados da aplicação da estratégia em foco. Para tanto, empregando recursos computacionais associados com o ambiente de trabalho de codificação do MATLAB, aqui não considerados em detalhes, visto que maiores informações sobre a ferramenta de análise podem ser encontradas em [27], [28], procede-se, a seguir, a uma explicitação do desempenho do processo de análise a partir de indicadores de aderência. Os oscilogramas das tensões atreladas com a aplicação do estimador são aqui apresentados.

A. Métricas para Avaliação da Estimação

Objetivando a avaliação do desempenho das respostas do TSE aqui empregado, a similaridade entre os resultados do estimador e aqueles obtidos experimentalmente, que são utilizados como grandezas de referência ou gabaritos, é feita através de métricas com maior grau de confiabilidade que apenas a inspeção visual [26]. Nestes termos, o grau de aderência dos desempenhos do processo, dentre outras opções, foi adotado neste trabalho através do uso de dois indicadores clássicos: o e_{MAPE} e o e_{peak} .

A métrica e_{MAPE} quantifica o percentual de proximidade entre a forma de onda estimada e a forma de onda de referência. Em suma, para cada intervalo amostral i , a tensão mensurada experimentalmente (V_{refi}) é subtraída da tensão estimada (V_{esti}) correspondente. Para evitar divisões por zero causadas por cruzamentos na origem, o valor da diferença é normalizado pela máxima tensão de referência obtida durante o período transitório ($V_{peak-ref}$).

Outro fator importante na análise dos efeitos de um fenômeno transitório é o valor de pico que a tensão e a corrente podem atingir. Nesse sentido, o indicador e_{peak} mensura o percentual de fidelidade com que o estimador reproduz esse valor de pico. Para isso, calcula-se a diferença entre o valor de

pico máximo de referência ($V_{peak-ref}$) e o valor de pico estimado ($V_{peak-est}$). Novamente, para evitar divisões por zero, a diferença é normalizada pela máxima tensão de referência obtida no período transitório ($V_{peak-ref}$).

Os dois indicadores empregados encontram-se, matematicamente, definidos através de (22) e (23).

$$e_{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{refi} - V_{esti}}{V_{peak-ref}} \right| \cdot 100 \quad (22)$$

$$e_{peak} = \frac{|V_{peak-ref} - V_{peak-est}|}{|V_{peak-ref}|} \cdot 100 \quad (23)$$

B. Análise dos Resultados do Estimador NDS

Tendo em vista que o barramento 2 foi aquele que ofereceu os dados das tensões e correntes, resta que, o processo de estimação culmina pela determinação das tensões para as barras 1, 3, 4 e 5. A escolha do monitoramento apenas para o barramento 2 se justifica por sua interconexão com os outros quatro, o que permite, com o uso de apenas um medidor, estimar os oscilogramas das tensões nos demais pontos do sistema. O conceito de alocação ótima de medidores é discutido de forma mais detalhada em [23], [27].

Uma vez obtidas as grandezas associadas com o transitório eletromagnético imposto, os resultados obtidos pelo estimador NDS foram, na sequência, correlacionados com os valores medidos (referência), permitindo, assim, a determinação dos indicadores de desvio em relação aos valores de referência, como estabelece as métricas e_{MAPE} e e_{peak} . Assim procedendo obtém-se os quantitativos apresentados na Tabela II.

TABELA II. ERROS DE ESTIMAÇÃO PARA A METODOLOGIA NDS.

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	e_{MAPE} (%)	e_{peak} (%)	e_{MAPE} (%)	e_{peak} (%)	e_{MAPE} (%)	e_{peak} (%)
1	0.3745	2.8600	0.5144	2.8782	0.4128	0.3575
3	0.3565	0.3196	0.3936	0.9804	0.3319	0.5402
4	0.7986	1.0592	0.8025	0.5999	0.7637	3.3222
5	0.8087	2.3840	1.1572	2.3676	1.4093	3.0925

O e_{MAPE} para os barramentos 1, 3, 4 e 5 evidencia uma excelente qualidade do desempenho do estimador, visto que os desvios ficaram se apresentaram dentro da faixa de 0,3745% e 1,4083%, evidenciando a qualidade das estimativas em todos os barramentos. Esse desempenho é atribuído à efetividade do método de análise, e também, se justifica pelo fato que o arranjo experimental utilizado se apresenta com uma topologia e composição física extremamente simplificada, assim como o evento imposto. Naturalmente, esta limitação determina que a metodologia para a avaliação da consistência do TSE deve ser, futuramente, estendida para arranjos mais complexos. Todavia, fica aqui reconhecido um bom indicador de desempenho do processo de análise empregado.

Para uma melhor visualização da sensibilidade do erro, a Fig. 8 apresenta, na forma gráfica, os erros residuais para cada

barramento. Esta grandeza (erro residual) corresponde ao valor do indicador e_{MAPE} antes da normalização, ou seja, ele mostra a diferença, em cada instante amostral, entre o valor da tensão de referência e o valor estimado em todos os barramentos e instantes de medição. Na figura, estão representados 15 nós, correspondendo aos cinco barramentos trifásicos.

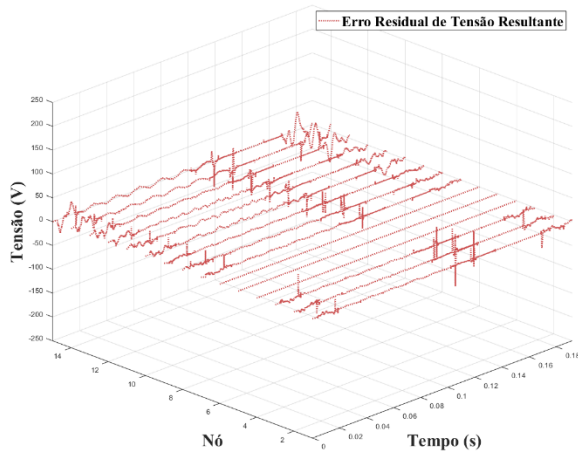


Fig. 8. Erro residual da tensão estimada pelo NDS nos 5 barramentos.

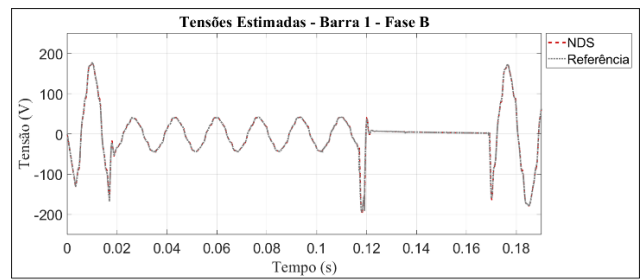
Quanto ao valor de pico máximo durante a manifestação do fenômeno transitório, este é observado sempre para a fase B, em todos os barramentos. Ao analisar o e_{peak} para essa fase em específico, verificou-se que o indicador variou de 0,5999% a 2,8782%, indicando, mais uma vez, um elevado nível de aderência dos registros realizados pelo medidor e os correspondentes valores advindos do TSE.

A título de ilustração, a Fig. 9 ilustra as tensões da fase B estimadas, confrontadas com as tensões de referência para os quatro barramentos não observáveis do sistema. A similaridade é muito grande e mostra, mais uma vez, a eficácia do estimador, não obstante os aspectos associados com a simplicidade do sistema elétrico empregado.

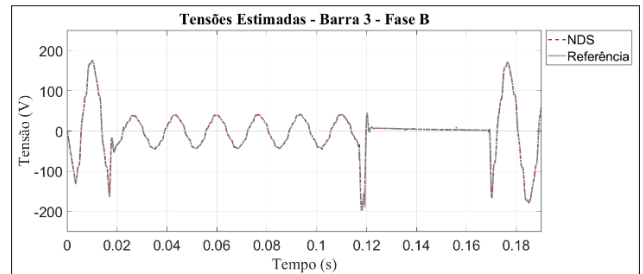
V. . CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo principal avaliar o desempenho da metodologia NDS, implementando-a em um ambiente laboratorial controlado e comparando as estimativas obtidas com medições experimentais para validar sua precisão. Os resultados experimentais indicaram uma alta aderência do método NDS, com erros máximos para a tensão transitória de pico (e_{peak}) de até 3,0925% na fase C da barra 5 e um erro percentual absoluto médio (e_{MAPE}) de 1,4093% para a mesma fase e barramento. Esses resultados demonstram a robustez do método NDS, indicando sua viabilidade para aplicação em campo, mesmo em locais não monitorados.

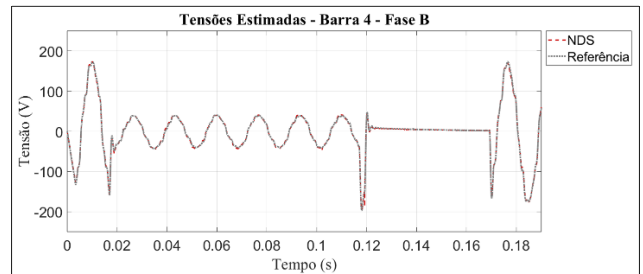
Um ponto a ser destacado refere-se ao fato que a análise experimental foi realizada em um sistema simplificado, com topologia radial, o que favoreceu a aplicação do estimador e contribuiu para a grande aderência de seu desempenho para com as medições reais. Não obstante a isto, o método demonstrou eficácia nas estimativas, reproduzindo de maneira apropriada os fenômenos transitórios.



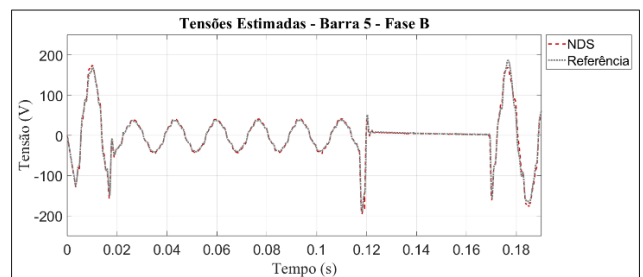
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9. Oscilogramas das tensões obtidas pelo estimador para as barras 1, 3, 4 e 5 e respectivos resultados experimentais.

Dentre os fatores que limitaram a aplicação do processo de análise para outras instalações de grande porte, a exemplo daquelas associadas com concessionárias transmissoras ou distribuidoras de energia, destaca-se dificuldades inerentes a disponibilização para acesso destes complexos, e ainda, de bancos de dados das empresas, de forma condizente com os requisitos do método NDS. Não obstante este fato, os autores entendem que a estratégia de análise não se apresenta com limitação a tais aplicações. A favor desta argumentação ressalta-se o fato que, referências bibliográficas atinentes à temática em pauta, contemplaram o emprego do método NDS para um sistema computacional modelado a partir de um sistema real na Nova Zelândia [24], assim como também para o benchmark do IEEE de 14 barras. Para tais complexos, o estimador de estado se mostrou igualmente eficaz. Isto posto, vale ressaltar que as ações posteriores ao presente estágio de desenvolvimento da pesquisa serão encaminhadas no sentido de estabelecer meios para a validação do processo em redes de porte comercial.

A consistência dos resultados reforça a robustez da abordagem e sugere que a metodologia NDS pode ser uma ferramenta útil nos estudos da propagação dos fenômenos transitórios, permitindo, assim, uma abordagem promissora para a determinação dos esforços dielétricos e térmicos impactantes sobre os componentes das redes elétricas de unidades consumidoras, comerciais e industriais. E assim, culminar por embasar meios eficazes e confiáveis para o aprimoramento dos processos de análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERENCES

- [1] H. Cunha de Oliveira, I. Gondim, P. Henrique Oliveira Rezende, and A. Costa, "Ressarcimento de Danos Elétricos: Revisão Bibliográfica, Premissas e Desafios," in *Anais da XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Galoia, 2021. doi: 10.17648/cbqee-2021-130634.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 9, Ressarcimento por Danos Elétricos," 2012, *Brazil*.
- [3] H. C. de Oliveira, I. N. Gondim, V. H. F. Brito, and J. C. De Oliveira, "Uma Estratégia para Avaliação do Nexo de Casualidade para Pedidos de Ressarcimento por Danos via Medições e Estimação de Estados," in *2023 XV Brazilian Conference on Quality of Power (CBQEE)*, 2023, pp. 1–8. doi: 10.1109/CBQEE59548.2023.10503897.
- [4] I. N. Gondim, J. A. F. B. Júnior, J. C. de Oliveira, C. E. Tavares, and A. C. Delaiba, "UMA ESTRATÉGIA PARA OBTENÇÃO DOS LIMITES DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA E TÉRMICA DE EQUIPAMENTOS COM FOCO AOS PEDIDOS DE INDENIZAÇÃO POR DANOS," 2012, *Campo Grande*.
- [5] C. E. TAVARES MENDONÇA M. V. B. OLIVEIRA J. C. RODRIGUES K. D. DELAIBA A. C. SILVA R. M. T., "Uma Estratégia Computacional Para A Análise De Pedidos De Ressarcimento De Consumidores Com Base Na Correlação Entre Esforços Dielétricos E Térmicos E Limites De Suportabilidade De Equipamentos," *XIX SNPTTE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*.
- [6] I. Gondim, J. Barbosa, J. Oliveira, A. Oliveira, and C. Tavares, "An Approach to Obtain System Disturbance Data to Consumer Reimbursement Analysis by Real Time Measurements," *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 11, pp. 719–725, 2013, doi: 10.1109/TLA.2013.6533960.
- [7] P. H. O. Rezende, J. C. De Oliveira, I. N. Gondim, and I. A. Bacca, "Air conditioner ATP time domain model and validation focusing reimbursement requests associated with system disturbances," 2011, *Lisboa - Portugal*. doi: 10.1109/EPQU.2011.6128828.
- [8] A. C. O. Salomão, "Uma abordagem jurídica à questão do ressarcimento de danos elétricos pelas distribuidoras de energia," 2012, *Universidade de São Paulo, São Paulo*.
- [9] A. Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, 2º Edição., vol. 1. WILEY INDIA, 2010.
- [10] H. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399, Apr. 1969, doi: 10.1109/TPAS.1969.292459.
- [11] J. A. Martinez, "Time domain electromagnetic transients programs," in *2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134)*, IEEE, pp. 763–764. doi: 10.1109/PESS.2000.867447.
- [12] J. w. Gu, K. A. Clements, G. R. Krumpholtz, and P. W. Davis, "Topologically-Partitioned Power System State Estimation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 2, pp. 483–491, Feb. 1983, doi: 10.1109/TPAS.1983.317718.
- [13] R. Zivanovic and C. Cairns, "Implementation of PMU technology in state estimation: an overview," in *Proceedings of IEEE. AFRICON '96*, IEEE, pp. 1006–1011. doi: 10.1109/AFRCON.1996.563034.
- [14] A. P. S. Meliopoulos, B. Fardanesh, and S. Zelingher, "Power system state estimation: modeling error effects and impact on system operation," in *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, IEEE Comput. Soc, pp. 682–690. doi: 10.1109/HICSS.2001.926269.
- [15] R. E. Larson, W. F. Tinney, and J. Peschon, "State Estimation in Power Systems Part I: Theory and Feasibility," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 3, pp. 345–352, 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292711.
- [16] R. E. Larson, W. F. Tinney, L. P. Hajdu, and D. S. Piercy, "State Estimation in Power Systems Part II: Implementation and Applications," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 3, pp. 353–363, 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292712.
- [17] N. R. Watson, Ali Farzanehrfat, and Sarath Perera, "Power Quality State Estimation: A New Concept," *EEA Conference & Exhibition*, vol. 66, no. June, pp. 37–39, 2012.
- [18] D. Of, S. In, and E. Engineering, "Power Quality State Estimation in Transient and Steady State," 2013.
- [19] R. A. Cisneros-Maga, A. Medina, and O. Anaya-Lara, "Time-domain voltage sag state estimation based on the unscented kalman filter for power systems with nonlinear components," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 6, 2018, doi: 10.3390/en11061411.
- [20] K. K. C. Yu, N. R. Watson, and J. Arrillaga, "An Adaptive Kalman Filter for Dynamic Harmonic State Estimation and Harmonic Injection Tracking," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1577–1584, Apr. 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.838643.
- [21] K. K. C. Yu and N. R. Watson, "An Approximate Method for Transient State Estimation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1680–1687, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.901147.
- [22] K. K. C. Yu, "Tese de Doutorado: Harmonic State Estimation and Transient State Estimation," 2005.
- [23] IEEE, "181-2011 - IEEE Standard for Transitions, Pulses, and Related Waveforms," 2011, *IEEE*.
- [24] I. Molina-Moreno, A. Medina, R. Cisneros-Magana, and O. Anaya-Lara, "A Methodology for Transient State Estimation Based on Numerical Derivatives, Optimal Monitoring, and Filtered Measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 4, pp. 1527–1535, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2735382.
- [25] N. R. Watson and A. Farzanehrfat, "Three-phase transient state estimation algorithm for distribution systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 10, pp. 1656–1666, 2014, doi: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0755.
- [26] B. M. Ganesini and I. N. Santos, "Aplicação de Filtro Harmônico Ativo em Plataforma Laboratorial Destinada a Estudos de Qualidade da Energia Elétrica," in *Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2020*, sbabra, Aug. 2020. doi: 10.48011/sbse.v1i1.2308.
- [27] M. Kanwar, K. Arora, and S. K. Sharma, "Comparison of simulation tools atp-emptp and matlab-simulink for time domain power system transient studies," *International Journal of Research Studies in Computer Science and Engineering*, vol. 1, no. 3, pp. 50–56, 2014.
- [28] "MATLAB," 2025. Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/products/matlab.html