

Abordagem para Avaliar a Ocorrência de Flicker Induzida por Oscilações Eletromecânicas em Sistemas com Geração Distribuída

Anna G. M. Moraco
Universidade de São Paulo
São Carlos - SP, Brasil
annamoraco@gmail.com

Marley F. Tavares
Universidade de São Paulo
São Carlos - SP, Brasil
marley@usp.br

Edson L. Geraldi Jr.
Universidade de São Paulo
São Carlos - SP, Brasil
edluju@gmail.com

Rodrigo A. Ramos
Universidade de São Paulo
São Carlos - SP, Brasil
rodrigo.ramos@ieee.org

Resumo—Neste trabalho é proposta uma abordagem para avaliar a ocorrência de flicker (cintilação luminosa) induzida por oscilações eletromecânicas. Esta abordagem emprega os fatores de participação estendidos (FPE) para quantificar estatisticamente a presença de modos eletromecânicos na dinâmica da tensão nos terminais de um gerador síncrono distribuído. Uma vez que os resultados obtidos, pelos FPE, indiquem uma probabilidade elevada para a manifestação do modo eletromecânico na tensão terminal do gerador distribuído, uma estimativa para a ocorrência de flicker é obtida.

Palavras-chave — Flicker, fatores de participação estendidos, oscilações eletromecânicas, qualidade de energia.

I. INTRODUÇÃO

A presença de geradores síncronos de pequeno porte, em sistemas de distribuição, tem crescido continuamente desde o início dos anos 90 por diversos motivos, entre eles benefícios econômicos e ambientais. De acordo com [1], em muitos países, grande parte da geração distribuída corresponde a pequenos geradores síncronos conectados diretamente na baixa tensão dos sistemas de distribuição. Por exemplo, no Brasil, pequenas centrais hidrelétricas e cogeração através do bagaço da cana de açúcar são muito comuns.

A conexão desses elementos ativos no sistema de distribuição afeta seu comportamento dinâmico. Portanto, fenômenos que antes eram observados somente em sistemas de transmissão, agora também estão presentes nos sistemas de distribuição. Um exemplo entre esses possíveis fenômenos são as oscilações eletromecânicas (OEM) mal amortecidas. Tais oscilações, quando presentes no sistema, são prejudiciais para seu funcionamento e desempenho. Além disso, do contexto de qualidade de energia, os autores em [2] mostram que tais oscilações podem causar flutuações de tensão na barra em que o gerador está inserido.

Para o sistema de transmissão, os modos de oscilação e os geradores associados a eles, são usualmente identificados através do método de análise seletiva modal, por meio dos fatores de participação [3]. Contudo, como mostrado em [4]–[6], esses fatores de participação tradicionais são apropriados para medir a participação relativa dos estados nos modos, mas não são adequados para caracterizar a resposta dinâmica do sistema quando este está sujeito a uma perturbação real. Isso acontece porque em sua definição, os fatores de participação consideram uma condição inicial muito particular para o sistema (um vetor da base canônica no espaço de estados) [3]. Na prática, essas condições dificilmente ocorrem. Portanto, como se tornou evidente em [4], flutuações de tensão induzidas por OEM não podem ser identificadas pelos mesmos.

Neste contexto, os fatores de participação estendidos (FPE) [7] fornecem uma melhor identificação da dinâmica do gerador, permitindo

avaliar os impactos da OEM na tensão do sistema. Isto é possível porque o cálculo desses fatores é baseado na resposta do sistema levando em conta um conjunto de condições iniciais, o qual é mais representativo do que uma condição inicial particular.

Trabalhos anteriores [4]–[6] mostraram que os fatores de participação tradicionais não são capazes de identificar possíveis flutuações de tensão induzidas pela presença de geradores síncronos nos sistemas de distribuição. Não obstante, foi mostrado que os FPE podem identificar adequadamente e quantificar estatisticamente a presença de modos eletromecânicos na dinâmica da tensão terminal de tais geradores. Em [4], foi utilizada tal abordagem considerando uma distribuição uniforme para obter as condições iniciais para o cálculo dos FPE. Contudo, este tipo de distribuição estatística não representa corretamente sistemas reais. Deste modo, em [6], uma representação estatística mais realista, a distribuição normal, foi empregada para obter as condições iniciais do sistema.

Apesar de utilizar diferentes distribuições estatísticas, foi sugerido em [4], [6] que problemas de qualidade de energia podem ocorrer devido à inserção de geradores síncronos em sistemas de distribuição. Este problema já havia sido destacado em [8], em que concluiu que quanto mais severas as perturbações são para o gerador distribuído, por mais tempo a flutuação de tensão irá durar na resposta do sistema. No presente trabalho será realizada uma abordagem para estimar a ocorrência de flicker em um sistema de distribuição com gerador síncrono presente.

Esta abordagem é composta por dois estágios. O primeiro estágio empregou os FPE para avaliar a probabilidade de ocorrência de OEM na tensão terminal do gerador síncrono distribuído. A partir dos resultados desta análise, foi possível decidir se uma oscilação eletromecânica pode ocorrer no sistema para um dado ponto de operação. Na segunda etapa, a utilização da frequência do modo eletromecânico, juntamente com um conjunto de valores das tensões nos terminais do gerador síncrono distribuído, possibilitaram analisar e avaliar a ocorrência de cintilação induzida pela oscilação eletromecânica identificada na etapa anterior.

Assim sendo, este trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção II apresenta o modelo não-linear do sistema teste. Os fundamentos sobre FPE são descritos em III e a Seção IV apresenta uma definição sobre flicker. A abordagem proposta é apresentada na Seção V e a Seção VI mostra as simulações e os resultados obtidos. As conclusões são apresentadas na Seção VII.

II. MODELAGEM DO SISTEMA TESTE

A fim de realizar os objetivos propostos, um sistema teste composto por uma única máquina contra uma barra infinita é utilizado. Este sistema teste pode representar um caso comum no sistema de geração distribuída, em que uma pequena usina de energia hidrelétrica

está ligada a um sistema de subtransmissão. Os dados deste sistema estão disponíveis em [5]. O gerador é representado pelo modelo de um eixo e está equipado com um regulador de automático tensão (RAT) e um estabilizador de sistema de potência (ESP). O conjunto de equações algébrico-diferenciais que representa este sistema é dado por [9]:

$$\dot{\delta} = \omega_0 \omega \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} [P_m - E'_q I_q] \quad (2)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d) I_d] \quad (3)$$

$$\dot{V}_o = \frac{1}{T_R} [V_t - V_o] \quad (4)$$

$$\dot{E}_{FD} = \frac{1}{T_e} [K_e (V_{ref} - V_t) - E_{FD} + E_{FDo}] \quad (5)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{K_{pss}}{T_w} [\omega + T_w \dot{\omega}] \quad (6)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{T_2} [x_1 + T_1 \dot{x}_1 - x_2] \quad (7)$$

$$\dot{V}_{esp} = \frac{1}{T_4} [x_2 + T_3 \dot{x}_2 - V_{pss}] \quad (8)$$

$$V_q = V_\infty \cos \delta - x_e I_d; \quad V_d = -V_\infty \sin \delta - x_e I_q \quad (9)$$

$$V_q = E'_q - x'_d I_d; \quad V_d = -x'_d I_q \quad (10)$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (11)$$

onde δ é o ângulo do gerador, ω é a velocidade angular do rotor e ω_0 é a velocidade síncrona da máquina. P_m é a potência da máquina síncrona, E'_q é a tensão transitória do eixo em quadratura, E_{FD} é a tensão do circuito de campo e E_{FDo} é o valor desta variável em condição de regime permanente. A tensão terminal e a tensão de saída do transdutor são V_t e V_o respectivamente. V_d e V_q são as tensões terminais de eixo direto e quadratura da máquina síncrona, respectivamente.

As equações (6)-(8) apresentam o modelo de terceira ordem usado para representar o ESP, e o modelo de primeira ordem que descreve o AVR é dada pela equação (5). Apesar da representação não-linear ter sido apresentada, a maioria das ferramentas de análise de estabilidade a pequenos sinais, incluindo as ferramentas utilizadas neste trabalho, são baseadas em teorias de sistemas lineares e requerem modelos lineares em sua aplicação. Desta maneira, serão consideradas as equações linearizadas do sistema teste.

O modelo linear resultante avaliado no ponto de operação (obtido utilizando o primeiro termo da Série de Taylor), quando as entradas do sistema são definidas como zero, é dado por [9]:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x, \quad \Delta x(0) = \Delta x_0 \quad (12)$$

onde A corresponde à matriz de estados do sistema e Δx_0 é o estado inicial de cada variável do mesmo.

O resposta no tempo deste sistema é calculada pela seguinte equação:

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^n [u_i^T \Delta x_0] y_i e^{\lambda_i t} \quad (13)$$

onde λ_i é o i -ésimo autovalor (também chamado modo de resposta), enquanto que u_i and y_i são o i -ésimo autovetor

a esquerda e o i -ésimo autovetor a direita, respectivamente, associados à matriz A . Assume-se que esta matriz possua n autovalores distintos.

Supondo que $\Delta x_0 = e_k$, com e_k sendo o k -ésimo vetor da base canônica do espaço de estados (i.e., e_k é um vetor em que a k -ésima entrada é igual a 1 e as demais entradas são iguais a 0). Desta maneira, (13) pode ser escrita como:

$$\Delta x_k(t) = \sum_{i=1}^n p_{ki} e^{\lambda_i t} \quad (14)$$

onde $p_{ki} = u_i^k y_i^k$ é a definição tradicional para o fator de participação da k -ésima variável de estado no i -ésimo modo, e vice-versa.

Note que, em (14) a resposta da k -ésima variável de estado (quando caracterizada pelo fator de participação tradicional) é calculada baseada numa condição inicial particular (um vetor da base canônica). Portanto, este tipo de representação é limitada por uma condição inicial especial, que raramente é encontrada na prática.

III. FATORES DE PARTICIPAÇÃO ESTENDIDOS

Como explicado em detalhes em [4] e [3], os fatores de participação tradicionais podem caracterizar a resposta do sistema somente quando uma condição inicial particular é considerada. Este tipo de condição inicial é obtida em situações em que apenas uma das variáveis de estado do sistema é perturbada. Na prática, dificilmente apenas uma variável de estado será afetada quando é aplicada uma perturbação no sistema.

Ao contrário dos fatores de participação tradicionais, os FPE são calculados levando em conta um conjunto de condições iniciais incertas na proximidade do ponto equilíbrio do sistema, permitindo que eles caracterizam corretamente a resposta do sistema quando um conjunto adequado de condições iniciais é utilizado.

De forma a medir a influência relativa do modo λ_i (o i -ésimo autovalor associado à matriz A) na k -ésima variável de estado Δx_k , o FPE pode ser calculado considerando-se duas abordagens diferentes para criar o conjunto de condições iniciais: determinística ou probabilística.

A definição probabilística é dada por [7]:

$$p_{ki} := E \left\{ \frac{(u_i \Delta x_0) y_i^k}{\Delta x_0^k} \right\} \quad (15)$$

onde a condição inicial x_0 é um vetor aleatório E uma expectativa matemática avaliada utilizando alguma função de densidade de probabilidade conjunta $f(x^0)$ para a incerteza da condição inicial. Como mostrado em [7], (15) pode ser reescrita como:

$$p_{ki} = u_i^k y_i^k + \sum_{j=1, j \neq k}^n u_i^j y_i^k E \left\{ \frac{\Delta x_0^j}{\Delta x_0^k} \right\} \quad (16)$$

Analisando o segundo termo de (16), é possível observar que, quando os componentes do vetor de condição inicial $\Delta x_0^1, \Delta x_0^2, \dots, \Delta x_0^n$ são independentes com média zero, este segundo termo desaparece. Sob esta condição particular, a participação do i -ésimo modo na k -ésima variável de estado

é dada pela expressão $p_{ki} := u_i^k y_i^k$, que é a mesma equação originalmente definida em [3] para a definição dos fatores de participação tradicionais.

Observe a partir das definições dos PFE, que eles são calculados sobre um conjunto de condições iniciais. Isto permite que o conjunto seja construído baseado em condições que ocorrem na prática, a partir da qual o sistema de potência pode iniciar a sua resposta dinâmica (tais como condições geradas após a remoção de uma falta temporária ou após a inserção de um bloco de carga relativamente pequeno no sistema).

Uma vez que a precisão destes fatores depende da capacidade do conjunto de condições iniciais representarem adequadamente uma situação real, uma função que descreve de forma apropriada o comportamento dos parâmetros que caracterizam uma perturbação é necessária para calcular os FPE.

Primeiro em [4], uma distribuição uniforme é utilizada na simulação para definir a probabilidade de ocorrência de cada um dos parâmetros que podem determinar uma perturbação. No entanto, essa distribuição não reflete o comportamento médio do sistema sob uma perturbação típica, uma vez que sua utilização implica em distúrbios anômalos e frequentes com a mesma chance de serem escolhidos, por meio de simulações de Monte Carlo, para formar o conjunto de condições iniciais.

Em seguida, a fim de contornar esta limitação, a distribuição normal foi adotada em [6]. Os FPE foram obtidos através do método de Monte Carlo e considerando uma distribuição normal para alguns parâmetros envolvidos no processo físico de uma perturbação. No entanto, esta abordagem não quantificou quais casos realmente implicaram em problemas de qualidade de energia, tal como flicker.

Agora, este trabalho vem para complementar o artigo anteriormente mencionado, primeiro ao ampliar o conjunto de condições iniciais utilizadas, a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados e, em seguida, através da quantificação estatística da probabilidade de ocorrência de cintilação induzida por OEM.

IV. FLICKER

O Flicker é um fenômeno induzido por flutuação de tensão quando esta causa mudança na intensidade luminosa e é visualmente notado. Quantidade excessiva de flicker pode ser muito irritante e perigosa ao consumidor. Logo, estimar a probabilidade de ocorrência desse fenômeno pode ajudar a manter os níveis de tolerância tensão permitida do padrão de qualidade de energia.

Os limites para flutuação de tensão são definidos pelos padrões norte-americano, o qual adota o padrão IEC 61000-4-15 [10]. De acordo com esse padrão, o método do flickermetro é baseado no cálculo de pequenas (P_{st}) ou longas (P_{lt}) termo referente ao índice de percepção do flicker que ocorre uma vez por hora ou mais frequente. O mesmo padrão sugere que eventos infrequentes pode ser analisados pela curva de tolerância do flicker, também conhecida como curva GE, como mostrado na Fig. 1. Esta figura foi retirada de [10], uma norma internacional consagrada, e por esse motivo a curva é apresentada com termos originais em inglês.

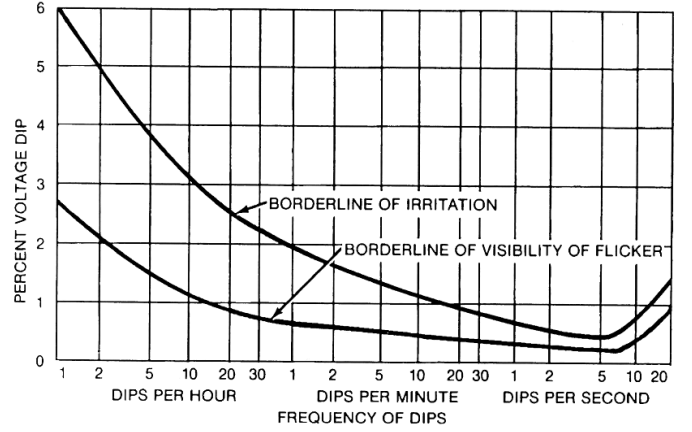


Fig. 1. Curva de tolerância Flicker ou curva GE. [10]

As OEM são eventos infrequentes que podem ocorrer a qualquer momento no sistema, resultando que a tensão terminal oscile com a mesma frequência que elas, entre 0.1-6 Hz [8]. Dessa forma, a curva GE pode ser utilizada para determinar o valor de limite do flicker.

Uma vez induzida o OEM, esta será a causa de sucessivas quedas de tensão como consequência de sub amortecimento. Então, o impacto OEM é avaliada pela determinação da resposta dinâmica da variável de estado da tensão de terminal, que é dada pela equação:

$$\tilde{v} = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i t_k} \cos(2\pi f_i t_k + \phi_i) + e(t_k) \quad (17)$$

onde i refere-se a i -ésima senoide e n é total de números de senoides. Além disso, A_i é a amplitude inicial, α_i é o fator de amortecimento, t_k é o tempo associado ao degrau k , f_i é a frequência da senoide, ϕ_i é o deslocamento angular e $e(t_k)$ é a possível medida de erro. [8]

V. ABORDAGEM PROPOSTA

A abordagem proposta nesse artigo é a avaliação da ocorrência de flicker induzido pelas OEM compreendida em duas etapas. A primeira etapa aplica o EPF para avaliar a probabilidade de ocorrência de OEM na tensão terminal do gerador síncrono. Os resultados obtidos, a partir de desta etapa, são importantes para decidir se uma oscilação eletromecânica pode ocorrer no sistema dado um ponto de operação.

Uma vez que estes resultados mostram que há uma alta probabilidade de manifestação do modo eletromecânico na tensão terminal do gerador distribuído, o procedimento para segunda etapa foi aplicado. Na segunda etapa, um estimador de modo de frequência eletromecânica juntamente com conjunto de valores de tensão terminal do gerador distribuído foram utilizados para analisar e avaliar a ocorrência de flicker induzido pelas oscilações eletromecânicas.

A. Primeira etapa

Neste trabalho, o método Monte Carlo [11] permitiu selecionar valores para determinados parâmetros que compõem

uma perturbação no sistema de estudo levando em conta um modelo probabilístico. Os três parâmetros são a duração da perturbação (t_d), tensão da barra infinita (V_∞) e a impedância equivalente (x_e). Cada um destes parâmetros foram escolhidos de acordo com uma distribuição normal, mas considerando um intervalo delimitado por um valor mínimo e um valor máximo. Por exemplo, dado um parâmetro p , este deverá ser escolhido utilizando uma distribuição normal com média p_{avg} e desvio padrão p_{std} . No entanto, neste caso deve estar dentro do intervalo definido por $[p_{min}, p_{max}]$.

De acordo com a probabilidade de ocorrência de cada uma das perturbações definida por uma função de distribuição de probabilidade correspondente, casos de parâmetros referidos a estas perturbações são escolhidos aleatoriamente para formar cada vetor de condições iniciais. Várias simulações são repetidas com o objetivo de criar o conjunto probabilístico de condições iniciais. De modo a assegurar a imprevisibilidade deste processo, este conjunto probabilístico de condições iniciais são compostos por um grande número de vetores.

Em seguida, o FPE são calculados de acordo com (15) para cada conjunto de condições iniciais. Após a obtenção de uma média dos valores absolutos da matriz de fatores de participação (MFP), uma análise composta por duas partes é realizada. A primeira identifica os modos que mais participam nas variáveis eletromecânicas, em outras palavras, esta análise identifica quais são os modos eletromecânicos. Na segunda parte, a linha que corresponde à variável de estado tensão terminal é analisada a fim de quantificar a influência dos modos eletromecânicos em sua resposta dinâmica. Uma vez que o fator de participação estendido dos modos eletromecânicos sobre a tensão terminal indica uma alta probabilidade de presença de flutuações de tensão induzidas por OEM, a segunda etapa da abordagem proposta neste artigo se inicia.

B. Segunda etapa

Nessa etapa, é determinada a duração da flutuação de tensão induzida pela oscilação eletromecânica que são caracterizadas como flicker. Então, a estratégia dessa etapa é analisar a senoide exponencialmente amortecida correspondente a oscilação eletromecânica que modula a tensão do gerador distribuído (V_o). Esta exponencial da senoide amortecida é usada para calcular o período de tempo o qual o limite definido em [10] é violado.

A duração de flicker é obtida pela análise dos sucessivos picos positivo e negativo do sinal da tensão terminal e o decaimento entre eles ($\Delta V_{pp}/V(\%)$). O período de flicker é aquele tal que o decaimento entre os picos positivo e negativo sucessivos (em percentagem) é maior que o valor determinado pela borda de irritação na curva GE (Fig. 1). Para isso, é necessário identificar a frequência na qual o fenômeno estudado ocorre (quedas por segundo), isto é, a frequência (em Hz) da oscilação eletromecânica.

É importante ressaltar que a tensão do envoltório foi estimada de acordo com (17), considerando os valores de tensão terminal (V_o) depois de aplicar as perturbações de acordo com a simulação de Monte Carlo. Também, foi calculado o valor de

A_i , que corresponde condição inicial da tensão terminal (V_o), que são multiplicados por dois, a fim de ter toda amplitude de oscilação total pico-a-pico, a partir de [10].

VI. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

De acordo com os procedimentos previamente apresentados, primeiro o FPE foi calculado usando a aproximação probabilística levando em consideração vários conjuntos de condições iniciais os quais foram adequadamente criados para descrever o comportamento realístico do sistema depois de um distúrbio (tal como curto-circuito e variações dos parâmetros do sistema).

Para isso, 10.000 conjuntos de 1.728 vetores de condições iniciais foram criadas usando o método de Monte Carlo e considerando a distribuição normal para os parâmetros exibidos na tabela I. Neste trabalho, o número de condições iniciais para cada conjunto aumentou comparado com [6]. Como resultado disso, as condições iniciais geradas tiveram

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO

Parâmetro	Valor Min.	Valor Max.	Média	Desvio Padrão
t_d	0,0	100,0 ms	50,0 ms	1,0 ms
V_∞	1,1384 p.u.	1,3914 p.u.	1,2649 p.u.	1,0 p.u.
x_e	0,36 p.u.	0,40 p.u.	0,44 p.u.	1,0 p.u.

a mesma probabilidade de distribuição do que os parâmetros usados para criar as perturbações [6]. Isto pode ser visto na Fig. 2, onde o histograma da tensão terminal V_o é comparado a distribuição normal (linha tracejada). Usando cada um dos

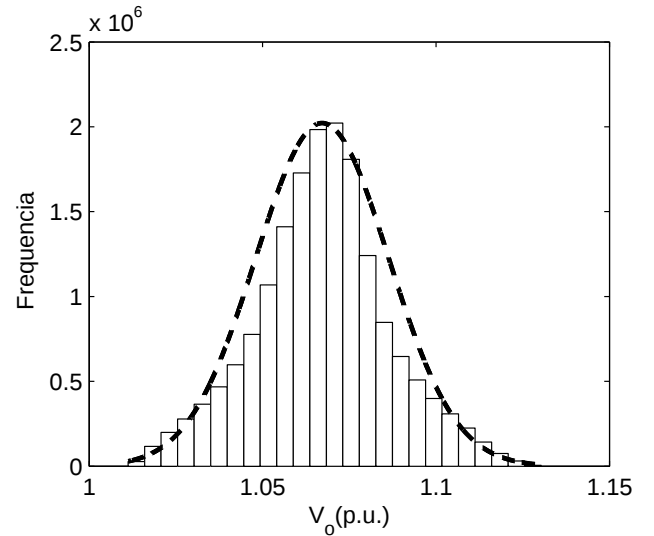


Fig. 2. Histograma de condições iniciais de V_o

10.000 conjuntos de condições iniciais, o EPF foi obtido resultando no conjunto de matriz de 10.000 matrizes de fatores de participação. A média dos valores da matriz de fatores de participação estendida (MFP) são exibidos na Tabela II. Analisando a Tabela II, é possível verificar que $\lambda_{5,6}$, que

TABELA II
MÉDIA DOS VALORES ABSOLUTOS DA MFP

	λ_1	λ_2	$\lambda_{3,4}$	$\lambda_{5,6}$	λ_7	λ_8
δ	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$4,77 \cdot 10^0$	$1,90 \cdot 10^3$	$9,86 \cdot 10^4$	$3,55 \cdot 10^4$	$9,69 \cdot 10^3$
ω	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$7,21 \cdot 10^{-1}$	$7,11 \cdot 10^1$	$7,66 \cdot 10^2$	$2,38 \cdot 10^2$	$5,20 \cdot 10^0$
E'_d	$1,84 \cdot 10^0$	$6,84 \cdot 10^2$	$1,54 \cdot 10^4$	$5,01 \cdot 10^4$	$4,10 \cdot 10^4$	$8,51 \cdot 10^3$
V_o	$9,29 \cdot 10^2$	$3,75 \cdot 10^2$	$7,62 \cdot 10^3$	$3,41 \cdot 10^4$	$2,38 \cdot 10^4$	$5,14 \cdot 10^3$
E_{fd}	$1,31 \cdot 10^2$	$4,51 \cdot 10^5$	$2,51 \cdot 10^6$	$1,69 \cdot 10^6$	$1,10 \cdot 10^6$	$1,12 \cdot 10^3$
x_1	$1,07 \cdot 10^0$	$4,37 \cdot 10^3$	$4,30 \cdot 10^5$	$4,62 \cdot 10^6$	$1,55 \cdot 10^6$	$1,04 \cdot 10^7$
x_2	$2,35 \cdot 10^0$	$1,02 \cdot 10^4$	$9,92 \cdot 10^5$	$9,96 \cdot 10^6$	$1,88 \cdot 10^6$	$2,81 \cdot 10^6$
V_{esp}	$4,44 \cdot 10^0$	$2,08 \cdot 10^4$	$1,96 \cdot 10^6$	$4,57 \cdot 10^6$	$1,95 \cdot 10^6$	$6,53 \cdot 10^5$

são modos eletromecânicos, são modos que mais afetem a variável δ e ω . observando a linha correspondente à tensão terminal (V_o), pode-se observar que o modo eletromecânico apresenta maior influência na dinâmica da resposta desta variável. O resultado indica a presença de flutuação de tensão induzida pelo OEM do gerador de distribuição síncrona.

A fim de verificar a probabilidade de ocorrência de OEM, o elemento MFP(4,5) foi analisado, uma vez que este indica a influência do modo $\lambda_{5,6}$ na tensão terminal V_o . O histograma o elemento MFP(4,5), obtido a partir de 10.000 matrizes de resultados, é mostrado na Fig. 3. A média do elemento MFP(4,5) é maior e a variância é baixa, os quais indicam presença de oscilação para maioria, se não todos, os casos testados. Então, os procedimentos para segunda etapa foram aplicados na ordem de estimar a ocorrência de flicker no sistema. Analisando a Fig. 1 para frequência de modo

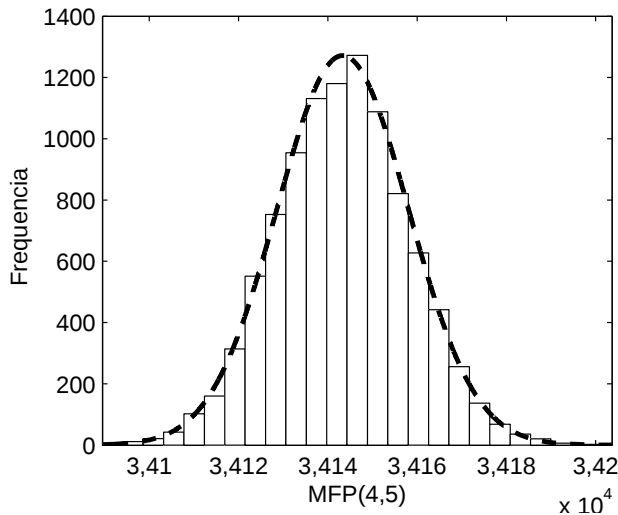


Fig. 3. Histograma do elemento MFP(4,5)

eletromecânico, o qual é aproximadamente 4.8 Hz, o limite de flutuação permitida para esta frequência sem causar flicker é em torno de $\Delta V_{pp}/V = 0,7\%$

De posse desse valor, a probabilidade de ocorrência de problemas causados por flicker foi estimado em 80% dos 17,28 milhões de casos testados. Também pode ser observado a partir desses casos que a probabilidade de ocorrência de flicker com

duração entre 1,95 e 5,21 s é aproximadamente a mesma, conforme mostrado na Fig. 4. A maior duração de flicker foi de 7,16 s, observada em menos de 1% dos casos. É importante destacar que em (17) apenas a dinâmica eletromecânica foi considerada, isto é, as contribuições dos outros modos foram negligenciadas uma vez que seus períodos transitórios são curtos.

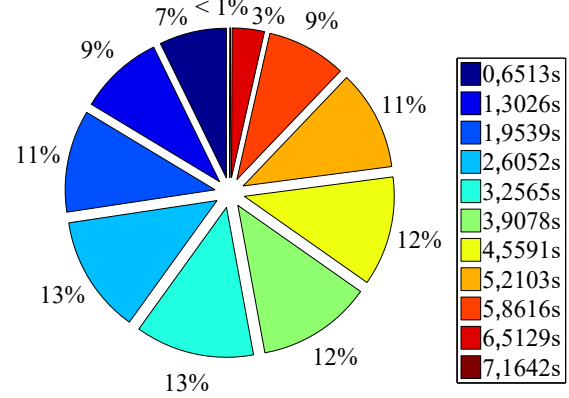


Fig. 4. Duração de Flicker

VII. CONCLUSÃO

Este artigo mostrou que, conforme trabalhos anteriores do grupo, a flutuação de tensão induzida pelo OEM pode resultar em problema de qualidade de energia caracterizado como flicker. Os FPE anteriormente detectaram a flutuação de tensão induzida pela OEM em sistemas de geração distribuída. Este trabalho complementou os resultados pela detecção e quantificação estatística da probabilidade de ocorrência de flicker.

Perspectivas futuras implicam em estender esta aproximação para outros pontos de operação, usando o FPE para detecção de outros problemas de qualidade de energia, tais como distorções harmônicas de tensão.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Nasr-Azadani, C. Canizares, D. Olivares, and K. Bhattacharya, "Stability analysis of unbalanced distribution systems with synchronous machine and dfig based distributed generators," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 5, pp. 2326–2338, Sept 2014.
- [2] R. Salim, M. Oleskovicz, and R. Ramos, "Power quality of distributed generation systems as affected by electromechanical oscillations - definitions and possible solutions," *Generation, Transmission Distribution, IET*, vol. 5, no. 11, pp. 1114–1123, Nov 2011.
- [3] I. Perez-Arriaga, G. Verghese, and F. Schweeppe, "Selective modal analysis with applications to electric power systems, part i: Heuristic introduction," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-101, no. 9, pp. 3117–3125, Sept 1982.
- [4] A. Moraco, T. Fernandes, G. Garcia, and R. Ramos, "Statistical analysis for the detection of voltage fluctuations in distributed synchronous generation using extended participations factors," in *Industrial Technology (ICIT), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 457–462.
- [5] R. Ramos, A. Moraco, T. Fernandes, and R. de Oliveira, "Application of extended participation factors to detect voltage fluctuations in distributed generation systems," in *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, July 2011, pp. 1–6.

- [6] E. Geraldi, T. Fernandes, G. Alves, and R. Ramos, "An approach for statistical quantitative analysis of voltage fluctuations using extended participation factors," in *Power Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*, July 2015, pp. 1–5.
- [7] W. Hashlamoun, M. Hassouneh, and E. Abed, "New results on modal participation factors: Revealing a previously unknown dichotomy," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 7, pp. 1439–1449, July 2009.
- [8] R. Salim, M. Oleskovicz, and R. Ramos, "Assessment of voltage fluctuations induced by electromechanical oscillations in distributed generation systems," in *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, July 2010, pp. 1–8.
- [9] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [10] IEEE Power Engineering Society, *IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems*, 2005, vol. 2004, no. March.
- [11] T. de Oliveira, J. de Carvalho Filho, R. Leborgne, and M. Bollen, "Voltage sags: Validating short-term monitoring by using long-term stochastic simulation," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 3, pp. 1344–1351, July 2009.