



# Análise da Incidência de *Flicker* em Rede Elétrica Causada pela Inserção de Geradores Eólicos Residenciais

Wellington Pascoalini dos Santos

Departamento de Pós-Graduação da Universidade

Santa Cecília – UNISANTA, Santos-SP, Brasil

E-mail: [wellingtonpascoalini@hotmail.com](mailto:wellingtonpascoalini@hotmail.com)

Received september, 2013

## Resumo

Este trabalho aborda o comportamento da tensão em uma rede elétrica urbana, mediante o despacho de potência ativa por geradores eólicos de baixa potência, tendo como referência a observação do efeito de cintilação luminosa (*flicker*). Para o estudo foi utilizado o *software Simulink Matlab* para simular o aumento gradativo de potência ativa despachada à rede elétrica e verificar o comportamento do sistema elétrico. Os blocos do software foram parametrizados com valores similares aos encontrados em uma rede de concessionária e seus efeitos analisados conforme a norma IEC 61000-4-15. Foram modelados aerogeradores de baixa potência, de características residenciais, utilizados em sistemas de geração distribuída. No estudo computacional do sistema proposto, os aerogeradores foram submetidos a uma variação de torque de 10% em função da variação do vento, nas frequências críticas de 6,0 e 8,8Hz, conforme os limites impostos pela norma referenciada. Utilizando os dados obtidos na simulação, foram calculados os índices de *flicker* e comparados com os limites estabelecidos pela norma. Os resultados obtidos com este estudo mostram que, dentro dos parâmetros utilizados, a inserção de aerogeradores de baixa potência na rede básica de distribuição não trazem maiores prejuízos à qualidade da tensão no sistema e sugere a ampliação dos estudos para geração distribuída, referindo os resultados ao lado da alta tensão, bem como estudar o impacto dos reativos no sistema.

**Palavras-chave:** flicker; geradores eólicos; geração distribuída.

## Analysis of the Incidence of Flicker in Power Grid Caused by the Insertion of Residential Wind Generators

### Abstract

This paper discusses the behavior of the voltage in an urban grid, by order of active power for low-power wind generators, based on the observation of the effect of light flicker. To study was used the Matlab Simulink software to simulate the gradual increase of active power delivered to the grid and check the behavior of the electrical system. The software blocks were parameterized with values similar to those found in a dealership network and its effects analyzed according to IEC 61000-4-15. Low-power wind turbines, residential characteristics, used in distributed generation systems were modeled. In the computational study of the proposed system, the turbines were subjected to a torque variation of 10 % depending on the variation of the wind, the critical frequencies of 6.0 and 8.8 Hz, as the limits imposed by the referenced standard. Using

the data obtained in the simulation, we calculated the rates of flicker and compared with the limits set by the standard. The results of this study show that, within the parameters used, the inclusion of low-power turbines in the basic distribution network do not bring harm to the voltage quality of the system, and suggests an expansion of studies for distributed generation, referring to the results High Voltage side, and study the impact of the reactive system.

**Keywords:** flicker; wind turbines; distributed generation.

## 1. Introdução

Devido ao aumento mundial do consumo de energia elétrica, novos métodos de geração estão sendo desenvolvidos com o objetivo de suprir tal demanda.

Na última década, o interesse pelo uso da energia eólica cresceu consideravelmente [1]. Mesmo tratando-se de tecnologia pouco explorada e em contínuo processo de evolução, sabe-se que vários tipos de distúrbios ocorrem na rede elétrica devido à conexão de geradores eólicos. Como exemplos podem ser citados: consumo excessivo de reativos, variação de tensão fornecida aos consumidores próximos, sobretensão e sobrefrequência em situação de ilhamento, injeções de harmônicos e flutuações de tensão. Tais inconvenientes devem ser levados em consideração para que não seja afetada de forma significativa a qualidade da energia elétrica fornecida.

Flutuação de tensão é a variação aleatória, repetitiva ou esporádica, do valor eficaz da tensão. De um modo geral, podem-se relacionar as flutuações randômicas e repetitivas com a operação de cargas não lineares que apresentem consumo de potência variável no tempo, enquanto as flutuações esporádicas relacionam-se com manobras de rede ou de carga.

Essas flutuações de tensão, ao se propagarem através da rede, podem provocar uma série de distúrbios, comprometendo a qualidade da energia fornecida. Um desses distúrbios é a cintilação luminosa ou flicker que, aplicada a sistemas elétricos, é a impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso nas lâmpadas causadas pelas flutuações da tensão de alimentação. A severidade de cintilação é uma representação quantitativa do incômodo visual percebido pelas pessoas expostas ao fenômeno de cintilação [2].

Atualmente, mais do que refletir o incômodo visual, os índices de flicker são utilizados para avaliar as flutuações de tensão da rede que podem também acarretar em mau funcionamento de alguns equipamentos elétricos [3].

O estudo desenvolvido é direcionado exclusivamente ao fenômeno da flutuação de tensão que ocorre em

decorrência da variação da velocidade dos ventos e consequentes variações do torque das pás das turbinas de vento.

Observando virtualmente o comportamento da tensão mediante a inserção de aerogeradores em paralelo a um ponto de conexão da rede elétrica básica, serão quantificados os índices de flicker e comparados com os limites estabelecidos pela norma vigente.

Esse estudo poderá servir como auxílio em análises mais aprofundadas sobre geração distribuída com a utilização de geradores eólicos residenciais de pequeno porte.

## 2. Material e Métodos

Este estudo foi fundamentado em pesquisas e trabalhos desenvolvidos, seguindo os parâmetros, tabelas e normas estabelecidas pela International Electrotechnical Commission (IEC).

Utilizando o *software Simulink-Matlab*, foi desenvolvido um modelo computacional cuja finalidade é representar uma rede de distribuição de energia elétrica recebendo potência ativa despachada por aerogeradores em diferentes pontos, medir os valores de tensão após a inserção desses aerogeradores e extrair os dados necessários ao estudo da flutuação de tensão na rede para assim calcular os índices de flicker. Como bases de cálculos, foram utilizados algoritmos pré-estabelecidos e tabelas apresentadas na IEC 61000-4-15 [4].

### 2.1 Definição do Modelo

O diagrama unifilar do modelo de sistema elétrico utilizado nesse estudo pode ser visualizado na figura 2.1.

Os parâmetros utilizados foram escolhidos com referência em equipamentos característicos de uma concessionária de distribuição de energia elétrica e os aerogeradores implementados foram fundamentados em modelos reais utilizados em sistemas residenciais de geração de energia, a saber:

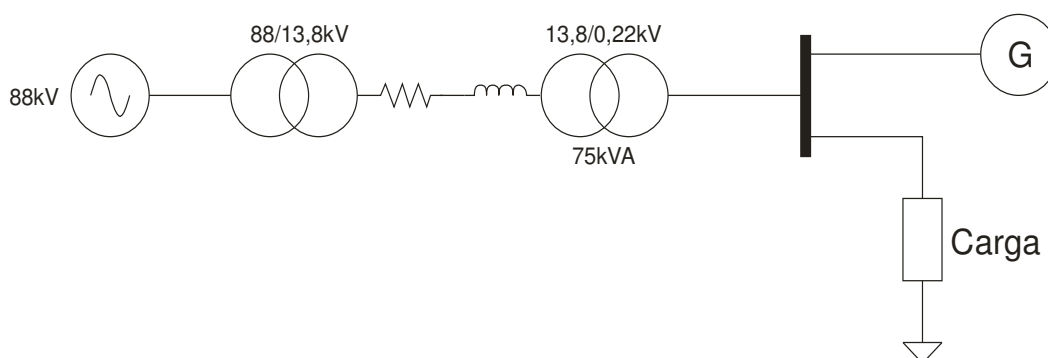


Figura 2.1 – diagrama unifilar do modelo desenvolvido no *software*.

- Fonte:
  - Impedância de Curto-Circuito:  
88000/13800 - 8,2% (60 Hz, 15000 kVA)
  - Impedância de Sequência Zero:  
88000/13800 - 8,64% (60 Hz, 15000 kVA)
  - Correntes máximas de curto-circuito em kA:  
Simétrica AT/BT (1,76/7,650)  
Assimétrica AT/BT (4,49/7,263)

- Transformador:
  - Classe de Tensão: 13,8 kV
  - Tipo de Instalação: Poste
  - Tipo de Isolação: Askarel
  - Tipo de Transformador: Convencional
  - Número de Fases: 3
  - Potência Nominal: 75 kVA
  - Tensão Nominal BT: 220/127 V
  - Corrente de Excitação: 3,40 A
  - Impedância: 3,65%
  - Perdas no Cobre: 1,14 kW
  - Perdas no Ferro: 390 W

- Carga:
 

Foi definido que o valor da carga será de 52,5 kVA, ou seja, 70% da capacidade nominal do transformador de 75 kVA, de forma a estabelecer uma condição real e ideal de funcionamento do sistema elétrico de distribuição. O fator de potência da carga (0,928indutivo) é característico dos circuitos de distribuição de áreas urbanas.

- Aerogerador:

O modelo de aerogerador utilizado neste estudo foi especificado tomando-se por base dados reais de modelos utilizados em redes distribuídas de baixa potência, onde a potência ativa varia de 1 kW a 20 kW. Sendo assim, foram definidos dois tipos de geradores eólicos para utilização neste estudo, sendo de 2CV e 25 CV, que são os equipamentos de utilização residencial de maior e menor potência disponíveis para comercialização atual

mente. Esses dois modelos foram escolhidos para que seja possível a análise de sua influência na rede, considerando menor e maior potência para que a verificação do impacto seja mais visível devido à diferença entre eles.

## 2.2. Implementação do modelo computacional

Utilizando os dados descritos no item 2.1, o modelo foi implementado conforme descrito a seguir:

- Fonte:

Para simular a impedância de curto circuito, foi parametrizado o bloco Z1-Z0, sempre considerando ângulo de 88°, que se refere a um valor típico utilizado quando não se fornece esse dado, da seguinte forma:

### Sequência Positiva (+)

$$Z = 8,2\% = 0,082 \angle 88^\circ \text{ pu}$$

$$Z_b = \frac{V^2}{S} = \frac{13,8^2}{15 \times 10^6} = 12,696 \Omega$$

$$Z = 0,082 \times 12,696 = 1,041 \angle 88^\circ \Omega$$

$$= 0,03633 + j1,04044 \Omega$$

$$R^+ = 0,03633 \Omega$$

$$L^+ = \frac{XL}{2 \times \pi \times f} = \frac{1,04044}{2 \times \pi \times 60} = 2,76 \text{ mH}$$

### Sequência Zero (0)

$$Z = 8,64\% = 0,0864 \angle 88^\circ \text{ pu}$$

$$Z_b = \frac{V^2}{S} = \frac{13,8^2}{15 \times 10^6} = 12,696 \Omega$$

$$Z = 0,082 \times 12,696$$

$$= 1,041 \angle 88^\circ \Omega$$

$$= 0,03633 + j1,04044 \Omega$$

$$R^0 = 0,03828 \Omega$$

$$L^0 = \frac{XL}{2 \times \pi \times f} = \frac{1,09626}{2 \times \pi \times 60} = 2,91 mH$$

- Transformador:

Os valores utilizados na configuração do bloco “three phase transformer two-windings” foram definidos através dos seguintes equacionamentos (para definir o ângulo da impedância também será utilizada uma defasagem de 88°):

Sequência Positiva (+)

$$Z = 3,65\% = 0,0365 \angle 88^\circ pu$$

$$Z = 0,0365 \angle 88^\circ pu = 0,00127 + j0,03648 pu$$

$$R^+ = 0,00127 pu$$

$$XL^+ = 0,03648 pu$$

$$I_n = \frac{75 kVA}{\sqrt{3} \times 0,22 kV} = 196,8239 A$$

Corrente de Curto Circuito

$$I_{cc30} = \frac{1}{0,0365} = 27,3973 pu$$

$$I_{cc} = 27,3973 \times 196,8239 = 5,37 kA$$

- Carga:  
Conforme descrito no item 2.1, o bloco utilizado para simular a carga foi parametrizado considerando como valor de potência aparente 52,5 kVA, com fator de potência 0,928<sub>indutivo</sub>, resultando nos seguintes valores:

- Fator de Potência: 0,928<sub>indutivo</sub>
- Tensão: 220 V
- Potência Ativa: 48,72 kW
- Potência Reativa: 19,56 kVAr
- Potência Aparente: 52,5 kVA

- Geradores Eólicos:

Para implementação dos aerogeradores foram utilizados motores de indução trifásicos de 2CV e 25CV, operando com torque negativo, fazendo com que os mesmos venham a despachar potência ao sistema, ao invés de consumirem. O torque imposto a eles está associado a uma função matemática, que tem por finalidade simular a alteração dinâmica do valor do conjugado na turbina eólica refletido pela inconstância da captação de ventos pelas hélices. Esse algoritmo é uma função senoidal cuja amplitude é o valor de 10% do torque nominal. Este valor foi utilizado por representar o percentual máximo de flutuação de tensão sem que a maioria dos equipamentos seja afetada por este fenômeno, sendo sua principal desvantagem a cintilação luminosa, que é a flutuação da luminosidade visível aos olhos humanos, conforme modelo computacional da figura 2.2

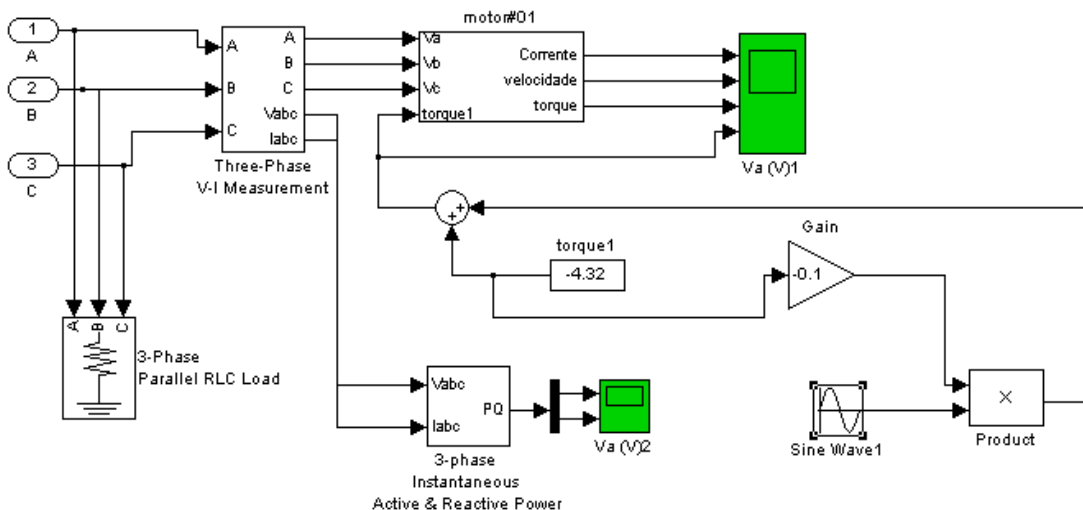


Figura 2.2 – Modelo computacional desenvolvido para simular a ação do vento nos aerogeradores.

O bloco “Sine Wave” foi parametrizado de forma a gerar uma onda senoidal de tensão e frequências da ordem de 6 Hz ou 8,8 Hz, conforme a situação de simulação desejada. Esse sinal, multiplicado pelo sinal de torque que passa pelo bloco “Gain”, parametrizado com -0,1 é somado ao torque em regime do aerogerador, através do somador. É o resultado dessa lógica que simula o torque variável imposto ao conjunto mecânico pela variação de captação dos ventos nas pás do gerador eólico.

### 2.3. Definição dos indicadores

A qualidade da tensão no sistema, após o despacho de potência pelos geradores, foi avaliada através da comparação dos dados obtidos nas simulações com os padrões especificados na norma IEC 61000-4-15 [4].

Essa avaliação foi fundamentada e comparada com os valores da tabela 2.1, extraída da norma citada.

### 2.4. Metodologia de Avaliação

A avaliação dos resultados obtidos foi realizada através da análise dos gráficos gerados pelo *software Matlab* como consequência das simulações realizadas em dois níveis de frequências de variação dos ventos, 6,0 e 8,8 Hz (selecionadas neste estudo por serem definidas por críticas, pois são nessas frequências que ocorrem um dos menores e o menor fator, respectivamente, de flutuação de tensão admissível pela norma), e com variação da potência despachada na barra. De posse desses dados foi avaliado um período do gráfico gerado para cada simulação para obtenção do fator percentual de *flicker* conforme equação 2.1.

Tabela 2.1 – Limites de flutuação de Tensão.

Frequência (Hz)	Flutuação de Tensão (%)		Frequência (Hz)	Flutuação de Tensão (%)	
	Lâmpada de 120 V Sistema 60 Hz	Lâmpada de 230 V Sistema 50 Hz		Lâmpada de 120 V Sistema 60 Hz	Lâmpada de 230 V Sistema 50 Hz
0,5	2,457	2,340	10	0,339	0,260
1,0	1,463	1,432	10,5	0,355	0,270
1,5	1,124	1,080	11	0,374	0,282
2,0	0,940	0,882	11,5	0,394	0,296
2,5	0,814	0,754	12	0,420	0,312
3,0	0,716	0,654	13,0	0,470	0,348
3,5	0,636	0,568	14	0,530	0,388
4,0	0,569	0,500	15,0	0,593	0,432
4,5	0,514	0,446	16	0,662	0,480
5,0	0,465	0,398	17,0	0,737	0,530
5,5	0,426	0,360	18	0,815	0,584
6,0	0,393	0,328	19,0	0,897	0,640
6,5	0,366	0,300	20	0,981	0,700
7,0	0,346	0,280	21,0	1,071	0,760
7,5	0,332	0,266	22	1,164	0,824
8,0	0,323	0,256	23,0	1,262	0,890
8,8	0,321	0,250	24,0	1,365	0,962
9,5	0,330	0,254	25	1,472	1,042
			33,3	Teste não requerido	2,130
			40,0	4,424	Teste não requerido

(Fonte: adaptado IEC 61000-4-15)

Equação 2.1

$$\text{Flutuação de tensão} = \frac{\text{pico máx} - \text{pico mín}}{\text{pico máx}} \times 100$$

O valor resultante da equação 2.1 foi comparado com os limites estabelecidos pela norma IEC 61000-4-15, demonstrados na tabela 2.1. Se este valor estiver acima do limite estabelecido, a flutuação de tensão não atende os padrões da norma IEC 61000-4-15. Se estiver abaixo, significa que se encontra em níveis admissíveis, possibilitando a inserção dos aerogeradores, de modo que não seja comprometida a qualidade da energia na rede de distribuição.

### 3. Resultados

O modelo desenvolvido tem por finalidade simular um sistema elétrico composto por uma fonte que representa a saída de uma subestação abaixadora de 88 kV para 13,8 kV, considerando que a mesma possui potência de curto circuito infinita. Essa subestação alimenta um transformador de 13,8 kV para 0,22 kV que fornece energia à barra onde está conectada uma carga típica de um circuito de distribuição.

Inseriu-se gradativamente à barra potência ativa variando a quantidade de aerogeradores, de 2,0 CV e 25 CV, totalizando 18 simulações, cujas combinações podem ser encontradas nas tabelas 3.1 e 3.2, sendo nove relativas à frequência de 6,0 Hz e nove referentes à de 8,8 Hz, com o objetivo de verificar em diferentes situações, o impacto dessa injeção de potência na rede de distribuição, considerando que o limite mínimo foi de 1,5 kW e 55,5 kW o máximo, próximo a capacidade do transformador.

Cada gerador foi submetido à ação de ventos cuja velocidade impõe uma variação de frequência (como citado anteriormente, neste estudo de 6,0 e 8,8 Hz), e variação de torque de 10%, conforme comportamento crítico de flutuação de tensão admissível no sistema descrito na norma IEC 61000-4-15.

Os resultados demonstrados nas tabelas 3.1 e 3.2 foram obtidos através da análise dos gráficos de tensão gerados pelo *software Matlab*.

A análise dos gráficos em relação ao índice de *flicker* gerado foi realizada conforme exposto no item 2.3 deste estudo.

Índice de Cintilação Luminosa (Flicker) - 6Hz		
CV	W	Flutuação de Tensão (%)
1x2CV	1500	0,0050
4x2CV	6000	0,0050
8x2CV	12000	0,0201
12x2CV	18000	0,0341
1x25CV	18500	0,0201
2x25CV	37000	0,0801
3x25CV	55500	0,1099
1x2CV + 1x25CV	20000	0,0341
2x2CV + 2x25CV	40000	0,0891

Tabela 3.1 – Índices de Cintilação Luminosa obtidos nas simulações com 6,0 Hz.

Índice de Cintilação Luminosa (Flicker) - 8,8Hz		
CV	W	Flutuação de Tensão (%)
1x2CV	1500	0,0050
4x2CV	6000	0,0121
8x2CV	12000	0,0251
12x2CV	18000	0,0411
1x25CV	18500	0,0481
2x25CV	37000	0,1071
3x25CV	55500	0,1389
1x2CV + 1x25CV	20000	0,0511
2x2CV + 2x25CV	40000	0,1331

Tabela 3.2 – Índices de Cintilação Luminosa obtidos nas simulações com 8,8 Hz.

Confrontando os resultados obtidos nas simulações com os limites estabelecidos pela norma IEC 61000-4-15, verifica-se que em todos os casos estudados os níveis de *flicker* estão abaixo dos valores determinados como críticos.

#### 4. Conclusões

Após a realização dos estudos foi verificado que o fenômeno da flutuação de tensão ocorreu sem prejuízo à qualidade de energia fornecida no que se refere ao flicker, mesmo quando o sistema foi submetido à inserção de 55,5 kW (74% da capacidade nominal do transformador), nas frequências de 6 Hz e 8,8Hz.

Com isso, conclui-se que, do ponto de vista da análise do índice de flicker referente ao modelo apresentado, é possível implementar na rede secundária de distribuição um sistema de geração distribuída utilizando geradores eólicos de baixa potência.

Como proposta de continuidade para o estudo em questão, pode-se analisar os índices de flicker referidos ao lado da alta tensão (13,8 kV), verificar o impacto da potência reativa dos aerogeradores na rede, bem como a implementação de métodos de controle e proteção para os mesmos.

#### 5. Referências bibliográficas

[1] Disponível  
<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-29092010-165439/pt-br.php>> Acesso em: 30 set. 2013.

[2] Disponível  
<[http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/videntificadorlogico/DFC0A1994E5E72A583257945005D599A/\\$file/Subm%C3%B3dulo%202.8\\_Rev\\_2.0.pdf?openelement](http://extranet.ons.org.br/operacao/prdocme.nsf/videntificadorlogico/DFC0A1994E5E72A583257945005D599A/$file/Subm%C3%B3dulo%202.8_Rev_2.0.pdf?openelement)>  
Acesso em: 30 set. 2013.

[3] MEDEIROS, C. A. G.; OLIVEIRA, J. C. - Impactos das Flutuações de Tensão Sobre Equipamentos: Análise Experimental sob o Enfoque dos Indicadores de Flicker, V SBQEE, Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Sergipe, Brasil, Agosto de 2003.

[4] IEC 61000-4-15 – Electromagnetic compability (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications