

### ANÁLISE COMPARATIVA DE ÍNDICES DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO: UM CASO DE ESTUDO INDUSTRIAL

Autor: Ruth Agustini Orientador: Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

#### INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica é a ocorrência de afundamentos de tensão. Um evento de afundamento de tensão é caracterizado pela diminuição da magnitude da tensão dentro de uma faixa de referência e durante certo período de tempo, esse fenômeno é o maior causador de paradas em processos industriais, bem como problemas em equipamentos sensíveis, trazendo expressivos prejuízos financeiros. Devido a isso, normas e recomendações vêm sendo atualizadas de modo que, além dos limites de referência, a caracterização desses eventos seja realizada por indicadores.

O presente trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa entre os principais índices da normativa brasileira (ANEEL) e da recomendação norte americana (*Institute of Electrical and Electronics Engineer - IEEE*), evidenciando as suas contribuições e limitações. Para isso, é apresentado um estudo de caso real, onde eventos serão analisados através de dois principais indicadores: a Severidade e o Fator de Impacto.

#### CARACTERIZAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Figura 1 – Quadro comparativo entre as padronizações

| IEEE<br>Standard 1564:2014 [8]   | ANEEL<br>PRODIST Módulo 8 - Rev. 7 [10]  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
|--|--|----------------|---------|--------|--------|---|----------|--------------|--|----------|---------------|--|----------|---------------|--|----------|---------------|--|----------|---------------|--|----------|---------------|--|----------|---------------|--|----------|---------------|--|----------|--------|--|----------|
| <b>A. Caracterização do Afundamento de Tensão</b>  |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Magnitude: $0,1 < V < 0,9$ pu  |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Duração: $d < 1$ min   | Duração: $d < 3$ min   |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| <b>B. Cálculo do Valor Eficaz da Tensão</b>  |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Magnitude:<br>$V_{rms}(\frac{1}{2})(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1+k-N}^k v_i^2}$      |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Taxa de Amostragem: no mínimo 16 amostras por ciclo.                                     |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Período de Monitoramento:<br>1 ano.  | Período de Monitoramento:<br>mínimo 30 dias.   |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| <b>C. Agregação de Fases</b>   |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Medição de Múltiplas Fases:<br>seleção do evento de menor magnitude.                     |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| <b>D. Agregação de Eventos</b>   |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Sucessão de Eventos no Mesmo Local:<br>seleção do evento de menor amplitude com duração: |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Duração: $d < 1$ min   | Duração: $d < 3$ min   |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| <b>E. Estratificação</b>   |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Curvas de Sensibilidade:<br>   | Tabelas de Regiões:<br><table border="1"> <thead> <tr> <th>Amplitude [pu]</th> <th>Duração</th> <th>Região</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&gt; 1,15</td> <td>(100 ms - 100 ms) (300 ms - 600 ms) (1 seg - 3 seg) (1 min - 3 min)</td> <td>Região I</td> </tr> <tr> <td>(0,85 - 0,9)</td> <td></td> <td>Região A</td> </tr> <tr> <td>(0,80 - 0,85)</td> <td></td> <td>Região B</td> </tr> <tr> <td>(0,70 - 0,80)</td> <td></td> <td>Região C</td> </tr> <tr> <td>(0,60 - 0,70)</td> <td></td> <td>Região D</td> </tr> <tr> <td>(0,50 - 0,60)</td> <td></td> <td>Região E</td> </tr> <tr> <td>(0,30 - 0,40)</td> <td></td> <td>Região F</td> </tr> <tr> <td>(0,20 - 0,30)</td> <td></td> <td>Região G</td> </tr> <tr> <td>(0,10 - 0,20)</td> <td></td> <td>Região H</td> </tr> <tr> <td>&lt; 0,10</td> <td></td> <td>Região I</td> </tr> </tbody> </table> | Amplitude [pu] | Duração | Região | > 1,15 | (100 ms - 100 ms) (300 ms - 600 ms) (1 seg - 3 seg) (1 min - 3 min) | Região I | (0,85 - 0,9) |  | Região A | (0,80 - 0,85) |  | Região B | (0,70 - 0,80) |  | Região C | (0,60 - 0,70) |  | Região D | (0,50 - 0,60) |  | Região E | (0,30 - 0,40) |  | Região F | (0,20 - 0,30) |  | Região G | (0,10 - 0,20) |  | Região H | < 0,10 |  | Região I |
| Amplitude [pu]   | Duração  | Região         |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| > 1,15   | (100 ms - 100 ms) (300 ms - 600 ms) (1 seg - 3 seg) (1 min - 3 min)  | Região I       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| (0,85 - 0,9)   |  | Região A       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| (0,80 - 0,85)  |  | Região B       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| (0,70 - 0,80)  |  | Região C       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| (0,60 - 0,70)  |  | Região D       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| (0,50 - 0,60)  |  | Região E       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| (0,30 - 0,40)  |  | Região F       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| (0,20 - 0,30)  |  | Região G       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| (0,10 - 0,20)  |  | Região H       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| < 0,10   |  | Região I       |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| <b>F. Avaliação dos Afundamentos de Tensão</b>   |  |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |
| Severidade:<br>$S_e = \frac{1-V}{1-V_{curva}(d)}$  | Fator de Impacto:<br>$FI = \frac{\sum_{i=A}^I f_{ei} f_{pi}}{FI_{base}}$   |                |         |        |        |   |          |              |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |               |  |          |        |  |          |

Nessa seção, as padronizações e os procedimentos de classificação de eventos propostos são apresentados e comparados. Na Figura 1 são elencadas as principais diferenças quanto à caracterização de afundamentos, métodos de medição, agregação de fases e de eventos, método de estratificação e avaliação dos afundamentos.

#### ANÁLISE COMPARATIVA

Com a finalidade de comparar as recomendações apresentadas na seção anterior, foram estabelecidos estudos de caso de eventos de afundamento de tensão, caracterizados pela magnitude e duração. Esses eventos foram estratificados de acordo com o nível de tensão onde ocorreram, ou seja, em 13,8 kV, 34,5 kV ou 230 kV. Com isso, foram obtidos os **índices mensais** para a **Severidade** e para o **Fator de Impacto** para os três níveis de tensão.

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os eventos obtidos durante 24 meses, avaliados através dos dois indicadores, bem como de um valor de referência de 1 pu.

Analisando a Figura 2, observa-se que em 13,8 kV o único mês que apresentou severidade maior que a unidade foi o 11, no entanto o FI para o mês foi abaixo da unidade.

Na Figura 3 analisa-se o nível de 34,5 kV, somente o mês 20 foi classificado como severo, mas o FI também foi menor que o valor limite.

Para a Figura 4, identifica-se que para o nível de 230 kV a severidade foi excedida para o último mês de monitoração e novamente, o FI manteve-se adequado.

As diferenças nos valores obtidos devem-se as diferenças de cálculo entre os dois indicadores.

Figura 2 – Severidade e Fator de Impacto mensal em 13,8 kV

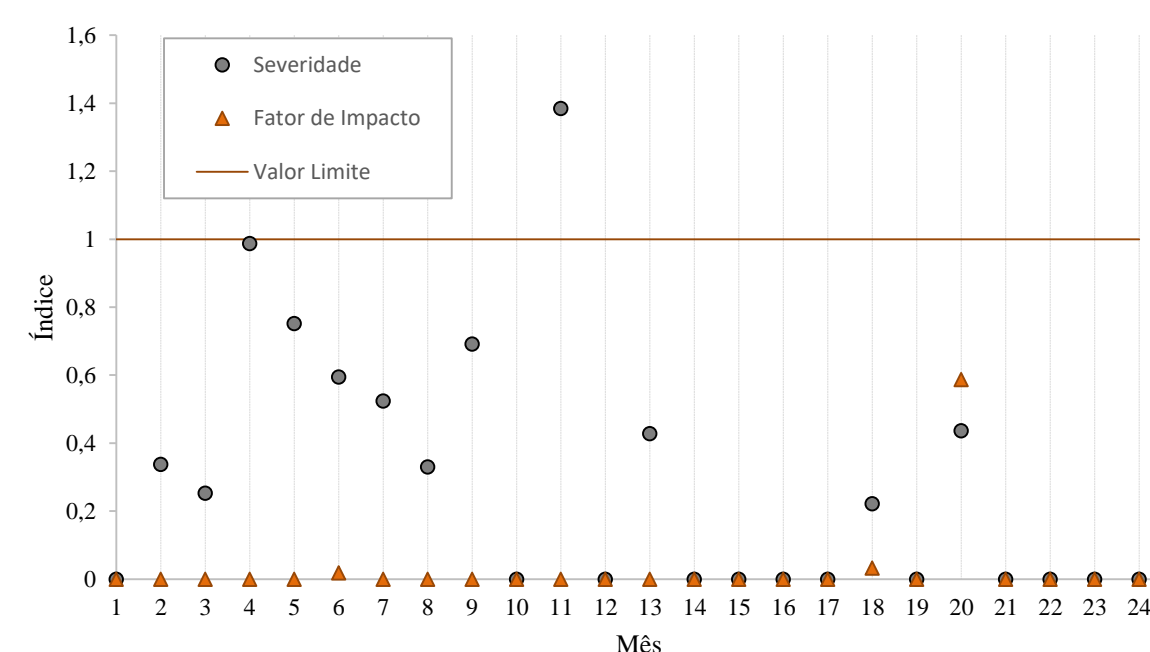


Figura 3 – Severidade e Fator de Impacto mensal em 34,5 kV

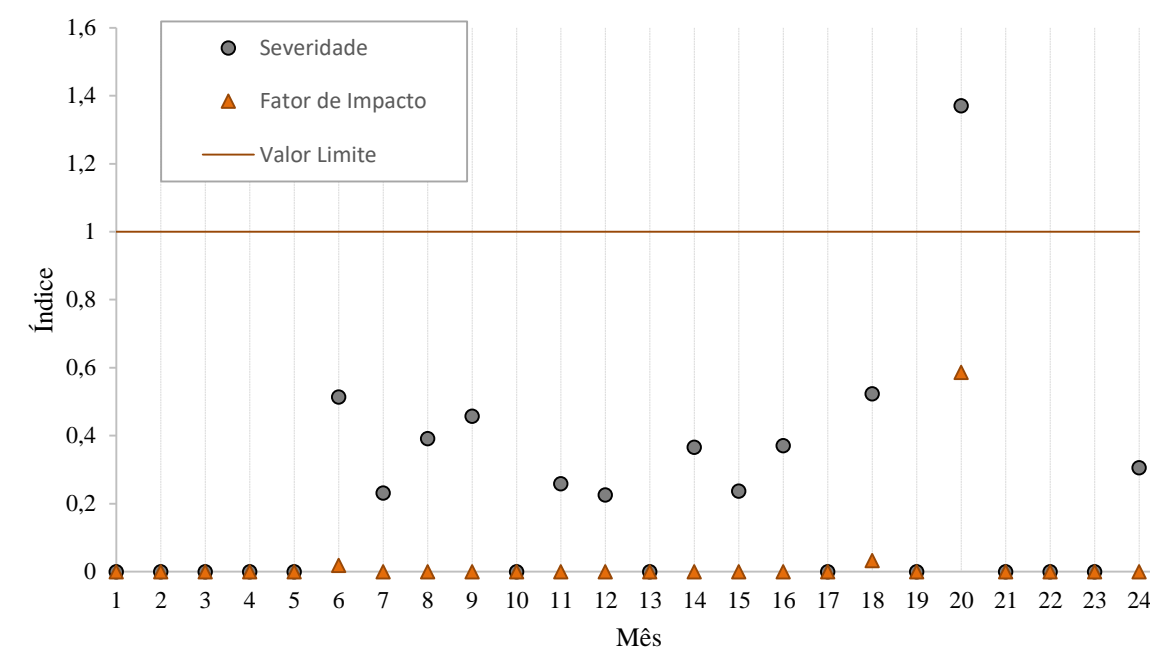
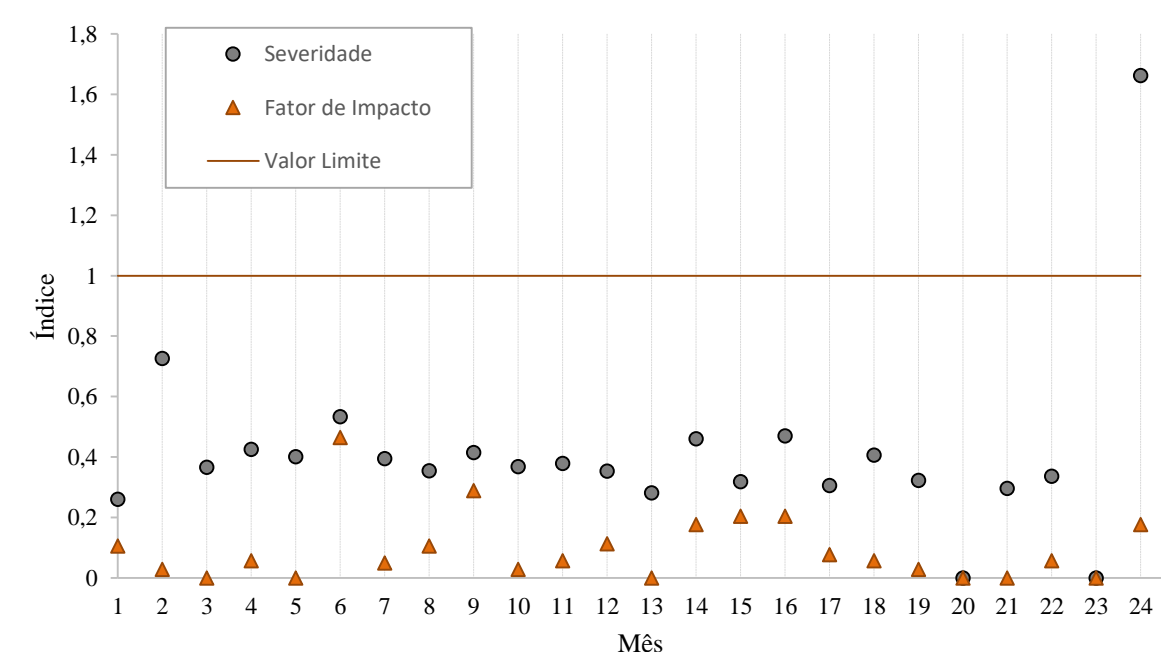


Figura 4 – Severidade e Fator de Impacto mensal em 230 kV



#### CONCLUSÃO

Os resultados obtidos apontaram que, pela aplicação dos indicadores, nota-se uma diferença na avaliação por cada padronização. Pelo FI todos os meses de monitoração apresentaram  $FI < 1$ , já o indicador da Severidade indicou meses com  $Se \geq 1$ . Essa diferença foi atribuída ao  $FI_{base}$  do PRODIST.