XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES BASEADOS EM INDICADORES DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Thiago Clé Oliveira(*) UNIFEI
José Maria C. Filho UNIFEI
Roberto C. Leborgne UFRGS
Gustavo T. Watanabe UNIFEI
José Policarpo G. Abreu UNIFEI
Jeder F. Oliveira CEMIG

RESUMO

O desempenho de linhas de transmissão tem sido tradicionalmente avaliado com base em suas eficiências e confiabilidades. O crescimento do efeito dos distúrbios de qualidade de energia elétrica, especialmente os afundamentos de tensão, sobre cargas sensíveis localizadas, muitas vezes, distantes das linhas sob falta, faz com que apareça a necessidade de novas formas de avaliar este desempenho. Um novo método para esta avaliação é proposto e comparado com os indicadores tradicionais. Os resultados mostram que a nova metodologia pode alterar significativamente a classificação do desempenho das linhas e, portanto, modificar a prioridade de investimento das concessionárias em melhorias em linhas de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Desempenho de linhas de transmissão, qualidade de energia elétrica, afundamentos de tensão, perda de carga.

1.0 - INTRODUÇÃO

O desempenho de linhas de transmissão é de grande interesse para as concessionárias de energia sobretudo em sistemas desregulamentados. Existem diversas maneiras de se quantificar este desempenho: eficiência, economia e confiabilidade são alguns destes (1).

O desempenho de sistemas de transmissão em sua operação em regime permanente foi estudado com base em sua eficiência na transmissão (2). As potências ativa e reativa nos dois terminais das linhas foram avaliadas e, então, a eficiência da transmissão pôde ser determinada. O efeito da impedância da carga foi estudado e a variação resultante na capacidade de transmissão foi definida.

O desempenho de linhas de transmissão em função das perdas nas linhas com cargas sensíveis foi estudado em (3). Três tipos de cargas, a saber, potência constante, corrente constante e impedância constante, foram consideradas individualmente, assim como de maneira combinada.

O incremento do desempenho do sistema através do controle de linhas de transmissão em corrente contínua foi abordado em (4). O desempenho foi planejado com vistas à estabilidade da rede quando da ocorrência de grandes transferências de potência.

Recentemente, a qualidade da energia elétrica (QEE) passou a ganhar importância para os consumidores devido ao aumento de cargas sensíveis. Ademais, esta QEE tem sido um questionamento constante por parte das agências reguladoras (5). Visto que os afundamentos de tensão (AMTs) são considerados os distúrbios de qualidade de energia mais nocivos com vistas aos consumidores com cargas sensíveis, é necessário que se

(*) Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Sistemas Elétricos e Energia
Av. BPS, 1303 – Bairro Pinheirinho – CEP 37500-903 – Itajubá, MG
Tel: (+55 35) 3629-1312 – Fax: (+55 35) 3629-1326 – Email: thiagocle@gmail.com

introduzam critérios relacionados à QEE na avaliação do desempenho das linhas.

Uma nova metodologia para estimar o desempenho de linhas em termos de algumas características dos afundamentos de tensão (AMTs) é proposta neste trabalho. Os índices são: perda de carga instantânea, perda de carga média e energia não-suprida.

Um estudo de caso mostrando o desempenho de cada linha e também para conjuntos de linhas de transmissão agrupados pela classe de tensão é descrito. O método apresentado também inclui a estimação de um indicador único que agrega todo o conjunto de indicadores apresentados.

2.0 - PROPOSTA DE NOVOS INDICADORES DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Atualmente, as concessionárias de energia elétrica têm avaliado o desempenho de suas linhas de transmissão somente com base no número total de curtos-circuitos registrados em cada uma dessas linhas. Um avanço a este indicador é adotado em algumas situações, realizando uma ponderação de acordo com a severidade de cada um dos tipos destas faltas. Desta maneira, é necessário estabelecer, por exemplo, quantas vezes um curto-circuito trifásico é mais severo do que um monofásico. Estes dois indicadores, portanto, são o ponto de partida da metodologia proposta.

A metodologia proposta para estimação do desempenho de linhas de transmissão combina um conjunto de fatores relacionados aos efeitos dos afundamentos de tensão sobre consumidores sensíveis. Consistindo na principal contribuição do método apresentado, tais indicadores são: perda de carga instantânea, perda de carga média e energia não-suprida.

A perda de carga instantânea corresponde à súbita redução no fluxo de potência pelo sistema, causada pelo desligamento dos consumidores sensíveis. A perda média e a sua duração são estimadas comparando-se a curva de carga real com a curva de carga esperada. Um exemplo da curva de carga, onde se observa uma perda instantânea de 240 MW, é apresentada na Figura 1.

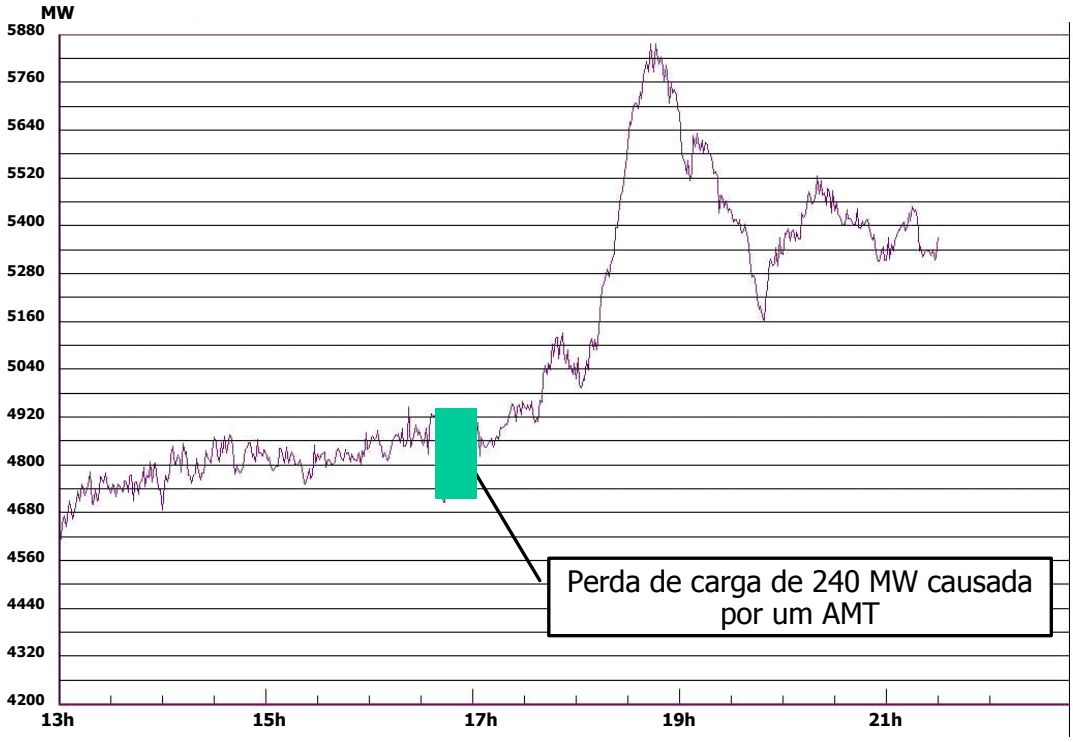

Figura 1 – Gráfico da curva de carga mostrando o instante da perda de carga.

A energia não-suprida (ENS) é calculada pelo produto da perda de carga média pela duração, conforme mostra a equação (1).

$$ENS = \Delta P_m \cdot \Delta t \tag{1}$$

onde ΔP_m é a perda de carga média e Δt é a duração, isto é, o tempo necessário para que a curva de carga recupere o comportamento esperado.

Portanto, os indicadores considerados para avaliação do desempenho de LTs são:

- Número total de faltas;
- Número de faltas ponderado pelos tipos de falta;
- Perda de carga instantânea;
- Perda de carga média;
- Energia não-suprida.

3.0 - ESTUDO DE CASO

3.1 O sistema elétrico estudado

O sistema de transmissão da CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, é composto por linhas de transmissão em 230, 345 e 500 kV. O diagrama simplificado dessa rede de transmissão é apresentado na Figura 2.

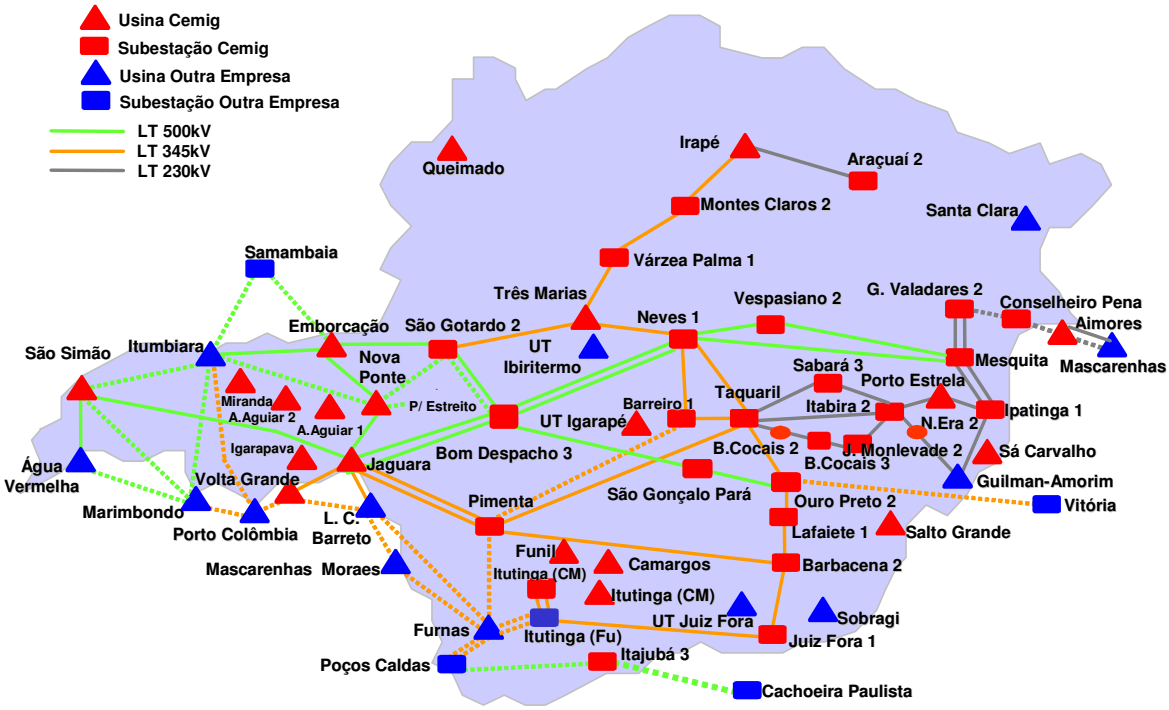

Figura 2 – Diagrama simplificado do sistema de transmissão da CEMIG.

O comprimento total das linhas, agrupadas por classe de tensão, é mostrado na Tabela 1. Como o sistema da CEMIG também possui uma extensa malha de subtransmissão em níveis de tensão inferiores a 230 kV, foram consideradas também as LTs 138 kV que partem de subestações da Rede Básica, totalizando mais de 5000 km de LTs monitoradas.

Tabela 1 – Comprimento da rede de transmissão.

Tensão	Comprimento (km)
138 kV	5 110
230 kV	1 022
345 kV	2 490
500 kV	2 845
Total	11 468

Mais detalhes sobre cada uma das 69 linhas de transmissão e subtransmissão consideradas neste estudo podem ser encontrados no Apêndice.

3.2 Medição dos afundamentos de tensão

Todos os eventos registrados pelos 64 Registradores Digitais de Perturbações (RDPs) são transmitidos para o departamento de planejamento da operação. Este departamento é responsável pela análise das ocorrências de distúrbios e eventos de proteção de todos o sistema de transmissão da CEMIG. Os RDPs registram as correntes, tensões e vários sinais digitais quando ocorre uma redução da tensão para abaixo de 90% da nominal.

Os arquivos contendo os sinais das três tensões foram fornecidos no formato Comtrade e necessitaram de um tratamento para cálculo do valor eficaz. Estes valores eficazes foram calculados através de uma janela de meio ciclo. Cada arquivo Comtrade fornecido contém valores das tensões instantâneas fase-neutro durante 2,5 segundos, aproximadamente.

Após o cálculo dos valores eficazes, foi realizado o procedimento da agregação de fases, onde cada afundamento de tensão, independentemente do número de fases envolvidas, passa a ser caracterizado por apenas um par de valores: magnitude e duração. A magnitude é dada pela menor tensão remanescente entre as três fases, e a duração é o tempo no qual a tensão da fase crítica, aquela que apresentou o menor valor remanescente, permanece abaixo de 90% do valor nominal.

Após estes procedimentos, um total de 258 curtos-circuitos foi selecionado durante um ano de observação do sistema. Estes curtos-circuitos foram responsáveis pelo registro de 632 afundamentos de tensão nos 64 RDPs. A representação gráfica dos afundamentos é mostrada na Figura 3. Pode-se observar que a maioria dos AMTs possui magnitude acima de 0,70 p.u. e duração inferior a 200 ms. Por outro lado, existem alguns AMTs muito severos, com magnitude inferior a 0,50 p.u. e com duração acima de 500 ms. Espera-se que estes eventos tenham grande impacto sobre algumas cargas dos consumidores.

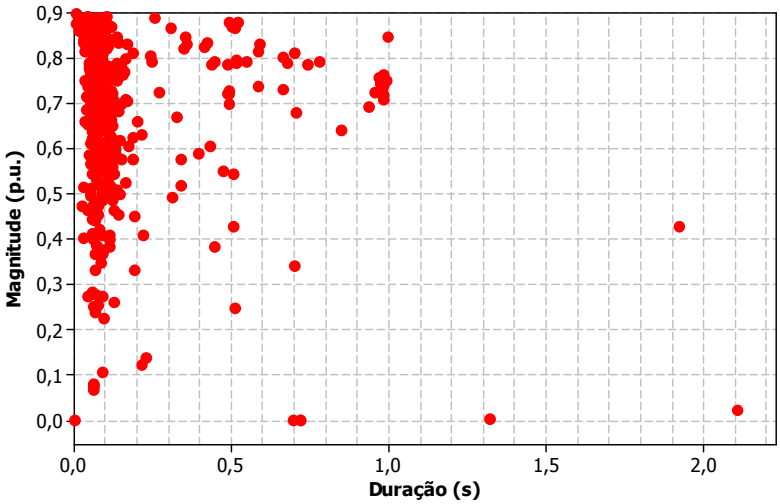

Figura 3 – Magnitude versus duração dos AMTs registrados pelos RDPs.

4.0 - APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

De forma a ilustrar a maneira como os dados foram coletados, uma falta registrada em uma linha de 230 kV tem seus dados apresentados na Tabela 2. Esta foi uma falta trifásica (3F) causada por uma descarga atmosférica com impedância de falta estimada em 0 Ω.

Tabela 2 – Dados de uma falta em 230 kV.

Data	Hora	Impedância de falta	Causa	Tipo de falta
29/11/2004	22:05:54.045	0	Descarga atmosférica	3F

Os AMTs registrados por 4 dentre os 64 RDPs durante a falta apresentada estão mostrados na Tabela 3. Os RDPs localizados na mesma classe de tensão da falta apresentaram as menores magnitudes.

Tabela 3 – AMTs registrados durante a falta.

Subestação	Tensão do RDP	Magnitude (p.u.)	Duração (p.u.)
A	230	0,590	0,104
B	230	0,721	0,081
B	138	0,747	0,075
B	161	0,755	0,079

Os consumidores sofreram um impacto significativo como conseqüência destes AMTs. A Tabela 4 mostra que foram perdidos 190 MW instantaneamente. Foram necessários 25 minutos para que a curva de carga recuperasse seu comportamento esperado e, durante este tempo, a perda média de carga foi de 80 MW. Conseqüentemente, a energia não-suprida resultante foi de 33,33 MWh.

Tabela 4 – Perda de carga e energia não-suprida.

ΔP_{inst} (MW)	$\Delta P_{média}$ (MW)	Δt (minutos)	ENS (MWh)
190	80	25	33,33

Conforme apresentado no item 2, o desempenho de cada linha de transmissão é analisado, neste trabalho, com base no número total de faltas, nos tipos de falta, nas perdas de carga instantânea e média e também na energia não-suprida. Tomando como base os dados obtidos durante um ano de monitoração, os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5 a 9.

As cinco linhas com maior número de faltas estão apresentadas na Tabela 5. A linha L35, de 500 kV, é a que apresenta maior ocorrência de curtos-circuitos registrados, sendo um total de 25.

Tabela 5 – Número total de faltas.

Linha de transmissão	Número de faltas
L35	25
L34	18
L2	15
L61	14
L39	10

A Tabela 6 apresenta os resultados do desempenho de cinco piores linhas com base na soma ponderada dos eventos de acordo com o tipo de falta. Portanto, cada evento recebe uma ponderação de acordo com os seguintes fatores:

- Falta fase-terra = 1;
- Falta fase-fase = 3;
- Falta fase-fase-terra = 3;
- Falta trifásica = 6;

Tabela 6 – Ponderação pelos tipos de falta.

Linha de transmissão	Total
L61	32
L35	30
L39	28
L29	26
L34	18

A classificação resultante modifica consideravelmente o desempenho das LTs quando comparadas com a Tabela 5. Por exemplo, a linha L35 é a primeira colocada segundo o número total de faltas. Porém, 24 das 25 faltas registradas ao longo desta linha são fase-terra e somente uma é trifásica. Portanto, na Tabela 6 tem-se o índice resultante de $24 \cdot 1 + 1 \cdot 6 = 30$. Por outro lado, na linha L61, que foi apenas a quarta colocada pelo número total de eventos, ocorreram 8 faltas fase-terra, 4 fase-fase-terra e 2 trifásicas, resultando em um índice de $8 \cdot 1 + 4 \cdot 3 + 2 \cdot 6 = 32$.

A partir da Tabela 7, os resultados apresentam a classificação do desempenho das linhas de acordo com os novos indicadores propostos neste trabalho. Para estas análises, foram considerados apenas os 37 eventos que causaram variações significativas nas curvas de carga, perfazendo 14% dos 258 curtos-circuitos registrados neste período.

A Tabela 7 relaciona as cinco linhas com pior desempenho de acordo com a soma das perdas instantâneas de carga.

Tabela 7 – Perda de carga instantânea.

Linha de transmissão	Total
L61	867
L42	710
L4	529
L3	520
L29	353

O desempenho das linhas segundo a perda de carga média é apresentado na Tabela 8. A comparação desta Tabela 8 com a Tabela 7 mostra uma relativa aderência entre os resultados, sendo que a principal diferença é que a linha L4 subiu para a primeira posição, com um total de perdas médias igual a 410.

Tabela 8 – Perda de carga média.

Linha de transmissão	Total
L4	410
L61	320
L42	302
L3	196
L22	153

Considerando o critério de desempenho segundo a energia não-suprida, a nova classificação das linhas é apresentada na Tabela 9. As linhas L26 e L38 aparecem apenas neste último índice entre as cinco de pior desempenho.

Tabela 9 – Energia não-suprida.

Linha de transmissão	Total
L42	461
L26	552
L3	434
L61	296
L38	225

É importante ressaltar que os resultados apresentados nas tabelas anteriores são referentes à soma dos índices de todos os eventos. Por exemplo, a energia não-suprida da linha L42 igual a 761 MW é o resultado obtido para o ano inteiro de monitoração.

Pode-se concluir que considerar apenas o número total de faltas registradas como um fator de decisão para investimentos em LTs pode não ser a melhor opção. Quando são observados indicadores que levam em conta o impacto de cada falta sobre as cargas dos consumidores, a classificação de desempenho das linhas pode ser consideravelmente diferente. A apresentação dos resultados mostrou que a linha L35 possui o pior desempenho segundo o primeiro critério, o número total de faltas, e também aparece na segunda classificação pela ponderação dos tipos de falta. Porém, quando as variações na curva de carga são observadas, esta linha não aparece em nenhuma outra lista. Analisando as classificações de acordo com cada um dos cinco critérios, a linha L61 é a única que aparece em todas elas, o que sugere que esta linha seja priorizada em termos de investimentos quando comparada com as demais.

Adicionalmente, o desempenho das linhas foi estimado por grupos de linhas de acordo com a classe de tensão. Esta análise foi realizada considerando somente os eventos que causaram variações significativas nas curvas de carga. Então, as linhas foram agrupadas em 4 classes de tensão: 138, 230, 345 e 500 kV. De maneira a permitir uma comparação entre os resultados das diferentes classes de tensão, os outros indicadores foram calculados na forma de média por evento. Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Desempenho das linhas agrupadas por classe de tensão.

Classe de tensão (kV)	$\Delta P_{inst}/evento$ (MW)	$\Delta P_{média}/evento$ (MW)	$ENS/evento$ (MWh)	Número de eventos
138	103,2	56,4	38,8	25
230	103,8	51,2	62,3	6
345	64,5	38	52,2	2
500	25,5	25,5	0,64	4

Conforme pode ser observado, o número de eventos é superior nas linhas de 138 kV. As maiores perdas de carga instantânea $\Delta P_{inst}/evento$ e média $\Delta P_{média}/evento$ foram encontradas para as linhas de 138 kV. Em se tratando de energia não-suprida, o maior indicador foi encontrado para as linhas de 230 kV.

5.0 - PROPOSTA DE ÚNICO INDICADOR PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Não é trivial determinar qual dos indicadores apresentados é o mais relevante para avaliar o desempenho de linhas de transmissão. Desta forma, na tentativa de estabelecer um único indicador para o desempenho de cada linha (IDL), uma combinação dos indicadores apresentados é proposta, estabelecendo um fator de ponderação para cada um deles, conforme apresentado na equação (2).

$$IDL = \sum_{i=1}^{5} f_i \cdot p_i \qquad (2)$$

onde IDL é o indicador combinado, f_i é o fator de ponderação do indicador i e p_i é a pontuação da linha segundo a classificação i. Por exemplo, para fins ilustrativos desta proposta, pode-se estabelecer 5 pontos para a linha de transmissão com a pior colocação em cada indicador, 4 pontos para a segunda e assim por diante. Com o mesmo objetivo, todas as cinco propostas de classificação de desempenho podem receber o mesmo fator de ponderação igual a 1. É importante ressaltar que a escolha destes fatores de pontuação e ponderação foram realizados de forma hipotética, apenas com o objetivo de ilustração da metodologia proposta. A aplicação desta agregação dos indicadores deve ser analisada detalhadamente em cada sistema. Certamente, a experiência dos profissionais da concessionária deve ser utilizada para auxiliar no estabelecimento destes fatores.

A Tabela 11 apresenta a classificação de desempenho das linhas de transmissão, considerando somente aquelas que apareceram em, pelo menos, uma das cinco classificações segundo os indicadores individuais. São apresentados os indicadores combinados (IDL), assim como a pontuação atribuída a cada linha pela classificação dos indicadores individuais.

Tabela 11 – Classificação combinada do desempenho das linhas de transmissão.

Linha de transmissão	IDL	**Total de eventos**	**Tipos de falta**	ΔP_{inst}	$\Delta P_{média}$	ENS
L61	18	2	5	5	4	2
L42	12	--	--	4	3	5
L35	9	5	4	--	--	--
L4	8	--	--	3	5	--
L3	7	--	--	2	2	3
L34	5	4	1	--	--	--
L26	4	--	--	--	--	4
L39	4	1	3	--	--	--
L2	3	3	--	--	--	--
L29	3	--	2	1	--	--
L22	1	--	--	--	1	--
L38	1	--	--	--	--	1

Pode-se observar que a linha L61 é a que apresenta o pior desempenho segundo este indicador combinado, seguida pela linha L42. De forma a ressaltar a necessidade de se estabelecer indicadores de desempenho diferentes daquele que, nos dias de hoje, é utilizado pelas concessionárias, observa-se que nenhuma destas duas linhas é classificada entre aquelas de maior número de eventos. Portanto, é importante que sejam levados em conta outros critérios que, por exemplo, retratem a influência das faltas sobre o comportamento das cargas dos consumidores.

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho propôs novos indicadores para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão com base na severidade dos afundamentos de tensão. Estes novos indicadores buscam refletir o comportamento das cargas durante a ocorrência de tais distúrbios.

Os resultados mostraram que o critério normalmente utilizado pelas concessionárias para a avaliação do desempenho das linhas, levando em conta apenas o número total de eventos, leva a resultados distintos daqueles encontrados utilizando os novos critérios.

As linhas de transmissão também foram agrupadas de acordo com sua classe de tensão. As linhas de 138 kV, seguindo as expectativas, apresentaram o maior número de faltas e também as maiores variações de carga. Isto se justifica pela menor distância elétrica entre as faltas nesta classe de tensão e os consumidores.

Uma proposta de um indicador combinado de desempenho foi apresentada. Este indicador agrega, em um único valor, todos os demais indicadores apresentados. É importante salientar que outros indicadores também podem ser combinados a este, bastando que se estabeleça fatores de ponderação adequados.

7.0 - APÊNDICE – DADOS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Linha	Tensão (kV)	Comprimento (km)		Linha	Tensão (kV)	Comprimento (km)		Linha	Tensão (kV)	Comprimento (km)
L1	345	74,4		L24	230	50,25		L47	500	120,31
L2	345	62,48		L25	138	6,72		L48	345	53,65
L3	345	231,04		L26	230	43,83		L49	138	45,99
L4	138	54,62		L27	230	50,25		L50	345	66
L5	138	37,72		L28	230	26,9		L51	345	181,9
L6	138	2,19		L29	230	84,36		L52	345	181,95
L7	138	6,94		L30	138	36,73		L53	138	37,02
L8	138	8,61		L31	138	44,6		L54	138	58,67
L9	138	8,61		L32	138	44,78		L55	500	248,44
L10	345	31,65		L33	138	87,04		L56	500	96,29
L11	138	13,4		L34	500	105,58		L57	500	166
L12	345	198		L35	500	342,71		L58	230	80,25
L13	500	228,17		L36	138	11,93		L59	138	45,99
L14	500	228,41		L37	138	74,4		L60	138	88,12
L15	500	127,65		L38	138	44,68		L61	138	141
L16	138	37,5		L39	138	55,03		L62	138	36,82
L17	138	107,2		L40	138	43,4		L63	138	89
L18	500	134,56		L41	138	71,85		L64	138	22,11
L19	138	78,3		L42	500	148,56		L65	138	8,89
L20	500	86,83		L43	138	17,2		L66	138	7,46
L21	230	140		L44	138	27,6		L67	138	7,46
L22	230	90,96		L45	138	21,87		L68	345	89,2
L23	138	127,7		L46	500	23,92		L69	345	50

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) P. Kundur, N.J. Balu, M.G. Lauby, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Professional, 1994.

(2) M. Hamed, A. Daoud, “Performance of a medium ring transmission line at steady state,” Electric Power Systems Research, Vol.53, No.2, Feb 2000, pp.139-148.

(3) K. Ramalingam, C.S. Indulkar, “Transmission line performance with voltage sensitive loads,” International Journal of Electrical Engineering Education, Vol.41, No.1, January 2004, pp.64-70.

(4) R.L. Lee, D.J Melvold, D.J Szumlas. L.M. Le, A.T. Finley, D.E. Martin, W.K. Wong, D.L. Dickmander, “Potential dc system support to enhance ac system performance in the Western United States,” IEEE Trans. on Power Systems, Vol.8, No.1, Feb 1993, pp.264-274.

(5) M.H.J. Bollen, Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions, New York: IEEE Press, 1999.