

Título	<b>Modelo Probabilístico para Avaliação das Correntes Transitórias de Inrush</b>
--------	--

Nº de Registro (Resumen)	155
--------------------------	-----

Empresa o Entidad
Daimon Engenharia e Sistemas Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S. A. - ELETROPAULO

Autores del Trabajo		
Nombre	País	e-mail
Alden Uehara Antunes	Brasil	<a href="mailto:alden@daimon.com.br">alden@daimon.com.br</a>
Carlos César Barioni de Oliveira	Brasil	<a href="mailto:barioni@daimon.com.br">barioni@daimon.com.br</a>
Hamilton Guilherme Bueno de Souza	Brasil	<a href="mailto:hamilton.bueno@AES.com">hamilton.bueno@AES.com</a>

Palabras Clave
Correntes de inrush, modelo probabilístico, proteção de redes de distribuição

Um dos maiores desafios vinculados aos estudos de ajuste dos sistemas de proteção de redes primárias refere-se ao provimento de uma diretriz adequada para o tratamento das correntes transitórias de inrush que surgem em quaisquer ações de religamento dos alimentadores.

A duração desta corrente elétrica é da ordem de algumas centenas de milissegundos e, dado o caráter transitório, não deve ocasionar a atuação do sistema de proteção.

O cálculo preciso desta grandeza é sobremodo complexo, pois exige o conhecimento do ciclo de histerese do material magnético do núcleo do transformador. Deste modo, é usual estimar a corrente de inrush por meio de método empírico, a partir de um fator multiplicativo aplicado à corrente nominal do conjunto de transformadores reenergizados.

Em geral, este método empírico mostra-se pouco eficaz e excessivamente conservativo dado que tende a reproduzir a pior condição de chaveamento dos transformadores a serem reenergizados.

Neste contexto, este artigo apresenta um modelo probabilístico que viabiliza uma estimativa mais precisa das correntes de inrush.

Foram estudadas 291 amostras extraídas de oscilografias de medidores alocados nas saídas de alguns alimentadores, os quais armazenam informações das correntes elétricas nos momentos em que há ações de religamento.

As oscilografias correspondentes ao conjunto de religamentos amostrado foram analisadas nos primeiros instantes (pontos notáveis de 1 ciclo e 6 ciclos) logo após a reenergização dos alimentadores, sendo os valores estudados como variáveis probabilísticas.

As análises fundamentaram-se na comparação dos dados oriundos de medição com os resultados de cálculo segundo o modelo tradicional na qual se observa uma clara majoração dos fatores multiplicativos usualmente utilizados.

Desta forma, a partir dos resultados obtidos com a aplicação do modelo proposto, é sugerida a adoção de uma faixa de valores mais adequada para os respectivos fatores multiplicativos e que tende a garantir uma aproximação mais consistente com as medições.

### INTRODUÇÃO

As correntes de inrush são devidas ao transitório eletromagnético de energização de cada transformador. Isto é, quando de sua energização o núcleo, de material ferromagnético, apresenta magnetismo residual decorrente da energização precedente e no instante de fechamento (aleatório) a tensão imposta exigirá variação de fluxo, o que pode resultar em excursão do fluxo muito grande.

A duração dessa corrente é da ordem de algumas centenas de ms e, dado o caráter transitório, não deve ocasionar a atuação do sistema de proteção [1].

Basicamente, o cálculo da corrente de inrush é dependente dos seguintes fatores:

- Magnitude e polaridade do fluxo residual;
- Instante de religamento;
- Potência de curto circuito no ponto de inserção dos transformadores.

Este cálculo é sobremodo complexo e exige, ainda, o conhecimento do ciclo de histerese do material magnético do núcleo do transformador. Deste modo, é usual estimar-se a corrente de inrush por meio de método empírico, em que se utiliza um fator multiplicativo a ser aplicado à corrente nominal do conjunto de transformadores reenergizado [1].

Dado o caráter de aleatoriedade da corrente de inrush, este método empírico mostra-se pouco eficaz e excessivamente conservativo, uma vez que tende a reproduzir a pior condição de chaveamento do conjunto de transformadores atendidos, impondo a necessidade de maior sofisticação na detecção e respectivo tratamento.

Na literatura técnica observam-se fatores multiplicativos para o máximo valor da corrente de inrush variando de 6 a 25 [1].

Os estudos mais recentes têm apontado para uma diretriz distinta no que tange ao tratamento das correntes de inrush consistindo não em sua determinação, mas na identificação de suas características embutidas em aspectos como frequência, espectro de amostragem, perfil de sua transitoriedade, entre outros, o que permite particularizar a corrente de inrush de outras grandezas transitórias que decorrem das ações de religamento e chaveamento dos alimentadores [2], [3], [4].

Neste contexto, optou-se por fazer uma análise do modo tradicional de estimativa da corrente de inrush praticado nas distribuidoras, que consiste na utilização de fatores multiplicativos aplicados à corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo circuito, porém, utilizando-se um grande volume de informações oriundas de dados de medição de modo a viabilizar a apuração de valores mais realistas, bem como propiciar um posterior tratamento estatístico desta grandeza.

Nos itens seguintes detalha-se a metodologia proposta, bem como os estudos efetuados com base num conjunto apropriado de medições aferidas em campo e vinculadas a ações de religamento de alimentadores primários.

### METODOLOGIA

No presente estudo, a corrente de inrush foi avaliada segundo dois enfoques específicos:

- Análise em religamentos bem sucedidos do sistema de proteção, ou seja, onde houve eliminação de faltas de caráter temporário. Esta situação caracteriza a ocorrência de corrente de inrush em carga quente, analisando-se, desta forma, a intensidade e duração da corrente elétrica em cada religamento detectado;
- Análise em religamentos efetuados após operações de manutenção preventiva (desligamento do sistema por intervalo de tempo de algumas horas) ou após um desligamento vinculado a uma falta permanente, em que se verificou o desligamento de todo o alimentador. Esta situação caracteriza a ocorrência de corrente de inrush em carga fria.

A avaliação dos fatores multiplicativos consistiu na análise da corrente de inrush obtida por meio de cálculo elétrico e na análise da corrente de inrush verificada nas medições. O medidor utilizado é o Power Measurement 3720 atualmente instalado em diversas subestações da AES ELETROPAULO, importante concessionária de distribuição brasileira que atende cerca de 5,6 milhões de clientes na Região Metropolitana de São Paulo (maior cidade brasileira).

O registro da medição é efetuado na saída do alimentador na subestação.

Este medidor disponibiliza dados instantâneos de corrente e tensão nas fases e no neutro dos alimentadores num passo de amostragem adequado, bem como registros de oscilografia.

O procedimento adotado consistiu nos seguintes passos:

- Escolha dos alimentadores primários com registro de medição, sendo que este procedimento obedeceu a um critério prévio de levantamento de ocorrências;
- Cálculo das correntes de inrush (utilizando-se os valores tradicionais de fatores multiplicativos);
- A partir dos resultados obtidos de corrente de inrush, foram determinadas as respectivas correntes nominais do conjunto de transformadores (total por circuito) atendidos pelos alimentadores;
- Considerando-se o conjunto dos valores instantâneos de corrente elétrica fornecidos pelo medidor (passo de amostragem de 1,042 ms) efetuou-se o cálculo da corrente de inrush integralizando-se os pares de valores de corrente e tempo a partir do Método dos Trapézios [1];
- A partir da corrente nominal obtida e da corrente de inrush verificada no medidor, determinaram-se os fatores multiplicativos ajustados que propiciam a igualdade referente aos valores das correntes de inrush calculadas e efetivamente medidas na saída de cada alimentador;

- Ao conjunto de fatores multiplicativos determinados acrescentou-se um tratamento estatístico, admitindo-se a hipótese de que o respectivo comportamento obedece a uma distribuição normal. Com a média e desvio padrão da amostra e admitindo-se um intervalo de confiança apropriado, determinaram-se valores ajustados dos fatores multiplicativos, globais e individualizados em faixas das potências nominais do conjunto de transformadores atendidos pelo circuito.

### ANÁLISE DE EVENTOS EM CARGA QUENTE

A figura 1 ilustra os fatores multiplicativos (k) referentes a 1 ciclo (16,67 ms) obtidos para 241 eventos vinculados a religamentos em carga quente, além do valor médio obtido.

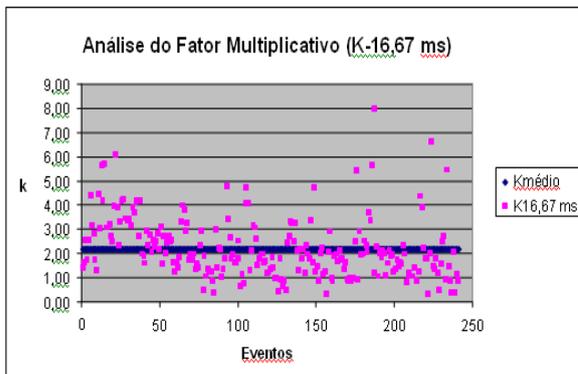


Figura 1 – Estimativa do fator multiplicativo k (religamentos em carga quente) referente ao instante de 16,67 ms (1 ciclo)

Sendo:

$\mu$ :	Média da amostra
$e\theta$ :	Intervalo de confiança
$Z\alpha/2$ :	Probabilidade da confiança
$\sigma$ :	Desvio padrão da amostra
n:	Número de amostra

Tem-se, para os 241 eventos vinculados a religamentos em carga quente:

$\mu$ :	2,19 (média aritmética do fator $K_{16,67\text{ ms}}$ )
$\sigma$ :	1,23 (desvio padrão do fator $K_{16,67\text{ ms}}$ )
n:	241 (número de eventos analisados)

Para obtenção dos valores de referência do fator multiplicativo k conforme as propriedades da Distribuição Normal, a análise será efetuada por meio de *Níveis de Confiança para Valores Críticos Inteiros* [10], no qual são estabelecidas as seguintes condições quanto aos valores de contorno determinados pelas faixas:

$\mu \pm 1\sigma$	$\rightarrow$ 68,27 % de confiança
$\mu \pm 2\sigma$	$\rightarrow$ 95,45 % de confiança
$\mu \pm 3\sigma$	$\rightarrow$ 99,73 % de confiança

Adotando-se como referência em termos do ajuste do fator multiplicativo para análises da corrente de inrush a condição de média e duas vezes o valor do desvio padrão da amostra tem-se:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 2,19 \pm 2 \cdot 1,23$$

Tendo em vista o objetivo de que os resultados obtidos sejam posteriormente sugeridos como novos parâmetros referentes ao cálculo das correntes de inrush, para fins práticos, será considerado sempre o intervalo superior, ou seja:

$$\mu + 2\sigma \rightarrow 2,19 + 2,46 = 4,65$$

Portanto, o resultado probabilístico alcançado entre os 241 eventos relativos a religamentos em carga quente foi 4,65.

Analogamente, para o fator multiplicativo k vinculado ao instante 100 ms (6º ciclo), têm-se, na figura 2, a distribuição de pontos obtidos para os 241 eventos analisados (e indicação do valor médio resultante) referente a corrente de inrush em carga quente.

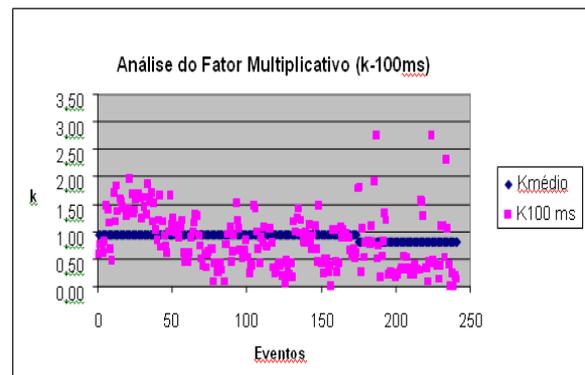


Figura 2 – Estimativa do fator multiplicativo k (religamentos em carga quente) referente ao instante 100 ms (6 ciclos)

Similarmente ao procedimento utilizado para avaliação do fator multiplicativo k vinculado ao instante de 1 ciclo, obtém-se os resultados a seguir.

$\mu$ :	0,94 (média aritmética do fator $K_{100\text{ ms}}$ )
$\sigma$ :	0,51 (desvio padrão do fator $K_{100\text{ ms}}$ )
n:	241 (número de eventos analisados)

Adotando-se a condição de média e duas vezes o valor do desvio padrão da amostra tem-se:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 0,94 \pm 2 \cdot 0,51$$

Considerando-se, para fins de ajuste do sistema de proteção, o intervalo superior tem-se:

$$\mu + 2\sigma \rightarrow 0,94 + 1,02 = 1,96$$

Portanto, o resultado probabilístico alcançado para os 241 eventos referente ao instante 100 ms foi 1,96.

Complementarmente, destaca-se que a potência instalada do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador é um fator que certamente deve influenciar a magnitude da corrente de inrush.

Com base neste aspecto, de acordo com os resultados das 241 amostras estudadas, na tabela 1 estão indicados os valores probabilísticos (obtidos pelo mesmo processo de cálculo apresentado) referentes ao instante 16,67 ms para algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos.

Tabela 1 – Fator multiplicativo (k) em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos (1 ciclo – 16,67 ms)

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,67 ms
0 – 500	5,63
500 – 1000	2,88
> 1000	1,76

Utilizando-se o mesmo procedimento anterior, a tabela 2 indica algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos, referentes ao instante 100 ms (6 ciclos) da corrente de inrush em carga quente.

Tabela 2 – Fator multiplicativo (k) em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos (6 ciclos – 100 ms)

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 100 ms
0 – 500	2,33
500 – 1000	1,28
> 1000	0,67

Em função dos resultados obtidos, na tabela 3 apresentam-se valores referenciais para o fator multiplicativo k visando a obtenção das correntes de inrush na condição de carga quente em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, de acordo com as medições extraídas em campo.

Tabela 3 – Valores sugeridos para os fatores multiplicativos visando a estimativa das correntes de inrush na condição de carga quente

Faixas de corrente (A)	Valores p/ o fator k (16,67 ms)	Valores p/ o fator k (100 ms)
0 – 500	6	2,5
500 – 1000	3	1,5
> 1000	2	1

**ANÁLISE DE EVENTOS EM CARGA FRIA**

A figura 3 ilustra os fatores multiplicativos obtidos para 50 eventos vinculados a religamentos em carga fria.

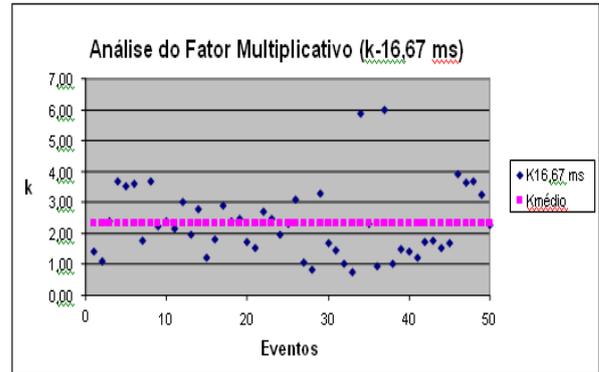


Figura 3 – Estimativa do fator multiplicativo k (religamentos em carga fria) referente ao instante de 1 ciclo (16,67 ms)

Tem-se, para os 50 eventos vinculados a religamentos em carga fria:

- $\mu$ : 2,32 (média aritmética do fator  $K_{16,67\text{ ms}}$ )
- $\sigma$ : 1,15 (desvio padrão do fator  $K_{16,67\text{ ms}}$ )
- n: 50 (número de eventos analisados)

Adotando-se a condição de média e duas vezes o valor do desvio padrão da amostra tem-se:

$$\mu \pm 2\sigma \rightarrow 2,32 \pm 2 \cdot 1,15$$

Considerando-se, para fins de ajuste do sistema de proteção, o intervalo superior tem-se:

$$\mu + 2\sigma \rightarrow 2,32 + 2,30 = 4,62$$

Nestas condições, o resultado probabilístico alcançado para os 50 eventos foi 4,62.

Analogamente, para o fator multiplicativo k ajustado referente ao instante 100 ms, têm-se, na figura 4, a distribuição de pontos obtidos para os 50 eventos analisados das correntes de inrush em carga fria (e indicação do valor médio resultante):

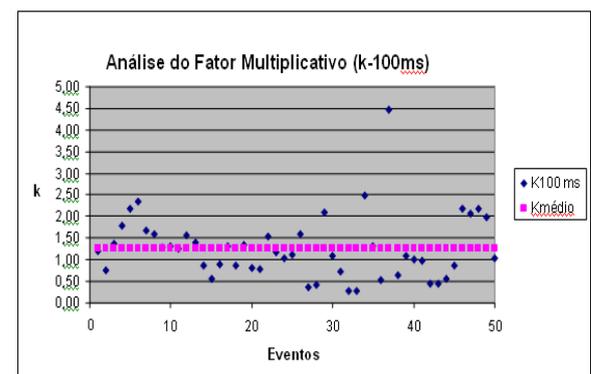


Figura 4: Análise do fator multiplicativo k referente ao instante 100 ms (6 ciclos)

Desta forma, de modo similar as análises anteriores, a partir dos valores levantados pelos 50 eventos referentes ao instante 100 ms, obtem-se os resultados a seguir:

$\mu$ : 1,26 (média aritmética do fator  $K_{100\text{ ms}}$ )  
 $\sigma$ : 0,74 (desvio padrão do fator  $K_{100\text{ ms}}$ )  
 $n$ : 50 (número de eventos analisados)

Adotando-se a condição de média e duas vezes o valor do desvio padrão da amostra tem-se.  
 $\mu \pm 2\sigma \rightarrow 1,26 \pm 2 \cdot 0,74$

Adotando-se o intervalo positivo tem-se.  
 $1,26 + 1,48 = 2,74$

Portanto, o resultado probabilístico alcançado entre os 50 eventos foi 2,74.

Desta forma, de acordo com os resultados das medições, na tabela 4 estão indicados os valores probabilísticos dos fatores multiplicativos em intervalos de confiança referente ao instante 16,67 ms das correntes de inrush em carga fria, em função de algumas faixas pré-definidas de corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos.

Tabela 4 – Fator multiplicativo (k) em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos (1 ciclo – 16,67 ms)

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,67 ms
0 – 500	5,08
500 – 1000	2,70
> 1000	1,51

A tabela 5 apresenta valores sugeridos de fatores multiplicativos em função de algumas faixas de corrente nominal referente aos transformadores atendidos, para as correntes de inrush em carga fria referente ao instante de 100 ms.

Tabela 5 – Fator multiplicativo (k) em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos (6 ciclos – 100 ms)

Faixa de corrente nominal (A)	Valores sugeridos para o fator multiplicativo k no instante 16,67 ms
0 – 500	3,13
500 – 1000	1,54
> 1000	0,48

Analogamente, em relação à condição de carga fria, na tabela 6 estão indicados os valores referenciais sugeridos para o fator multiplicativo k visando a obtenção das correntes de inrush correspondentes em função da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, de acordo com as medições de campo.

Comparando os resultados apresentados nas tabelas 3 e 6, os resultados finais das análises dos fatores multiplicativos para as correntes de inrush nas condições de carga quente e carga fria indicam que, embora o número de eventos analisados seja distinto nos dois casos, em linhas gerais, as correntes de inrush na condição de carga fria tendem a ser maiores que em carga quente.

Tabela 6 – Valores sugeridos para os fatores multiplicativos visando a estimativa das correntes de inrush na condição de carga fria

Faixa de corrente nominal (A)	Valores p/ o fator k (16,67 ms)	Valores p/ o fator k (100 ms)
0 – 500	6,0	3,5
500 – 1000	3,0	2,0
> 1000	2,0	0,5

### ANÁLISE DAS CORRENTES DE INRUSH COM AS POTÊNCIAS DE CURTO-CIRCUITO

Tendo em vista que a potência de curto-circuito também constitui um dos parâmetros que contribuem para a caracterização e magnitude das correntes de inrush em um determinado alimentador [9], analisou-se a relação deste parâmetro com as amostras (carga quente e carga fria) das correntes de inrush estudadas, com o intuito de se observar a interação entre estes dois fenômenos.

De acordo com as informações obtidas neste trabalho, tanto para as correntes de inrush oriundas da condição de carga fria quanto para as de carga quente, nos instantes correspondentes a 1 e 6 ciclos observou-se que as diferenças de magnitude das potências de curto-circuito nas barras de suprimento dos alimentadores analisados não influenciaram os valores (em magnitude) das correntes de inrush.

Estes resultados provavelmente se devem ao fato de que os alimentadores da AES Eletropaulo analisados têm características similares (distâncias curtas e cargas concentradas), além de níveis de curto-circuito de mesma ordem de grandeza das subestações. É provável que a potência de curto-circuito apresente maior influência na caracterização dos valores das correntes de inrush tratando-se nos pontos de inserção de cada um dos transformadores ao longo dos circuitos, e não nas barras de suprimento na subestação.

### CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho contemplou a avaliação dos valores alcançados (magnitude) pelas correntes de inrush nas saídas dos alimentadores primários de distribuição da AES ELETROPAULO.

Desta forma, os métodos utilizados consideram algumas simplificações que permitem estimar a corrente de inrush em função de fatores multiplicativos aplicados à corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador.

As análises descritas referentes à corrente de inrush fundamentaram-se na comparação dos dados provindos de medição com os resultados de cálculo segundo o modelo tradicional (aplicação de fatores multiplicativos), onde se observa que os valores referenciais tradicionalmente utilizados conduzem a uma clara majoração das correntes elétricas resultantes.

Desta forma, este trabalho viabilizou a sugestão de valores (ou faixa de valores) mais adequados e que tendem a garantir uma aproximação mais consistente das correntes de inrush estimadas com as medições.

Comparando os valores dos resultados finais das análises dos fatores multiplicativos (k) para as correntes de inrush nas condições de carga quente e carga fria, embora o número de eventos analisados seja distinto nos 2 casos, observou-se que em linhas gerais, na condição de carga fria tendem a ser obtidas correntes transitórias mais elevadas.

Tanto para as correntes de inrush na condição de carga quente como na condição de carga fria, nos dois instantes analisados (16,67 ms e 100 ms), ambas demonstraram uma certa dependência da potência instalada total e da corrente nominal do conjunto de transformadores atendidos pelo alimentador, uma vez que o fator k ajustado é decrescente com estes parâmetros.

Observa-se também que tanto para as correntes de inrush na condição de carga fria quanto na condição de carga quente, nos instantes 16,67 e 100 ms, as diferenças de magnitude das potências de curto-circuito nas barras de suprimento dos alimentadores analisados não influenciaram nos respectivos valores (em magnitude) das correntes de inrush, provavelmente devido as características similares dos alimentadores (curtos e com carga concentrada) e subestações (potências de curto circuito de mesma ordem de grandeza).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Souza, H. G. B., 2007, “Análise das Correntes Transitórias de Inrush em Redes de Distribuição”, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.
- [2] A. R. Sedighi, M. R. Haghifam, 2004, “Detection of inrush current in distribution transformer using wavelet transform”, *Electrical Power and Energy Systems*, pages 361-370.
- [3] J. Rico, E. Acha, M. Madrigal, 2001, “The study of inrush phenomenon using operational matrices”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16.
- [4] M. Petit, P. Bastard, 2005, “Simulation of a zero-sequence for a distribution network with EMTP-RV. Discrimination between fault current and magnetizing inrush current”, *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, Montreal, Canada, Paper N° IPST05 – 148.
- [5] S. Giguier, 1988, “Proteção de Sistemas de Distribuição”, Porto Alegre, Sagra Livraria Editora.
- [6] P. K. Maezono, 2001 “Análise de perturbações – parte 1 – Conceitos e conhecimentos básicos”, Apostila técnica Schweitzer Engineering Laboratories, Brasil LTDA.
- [7] W. A. Granville; P. F. Smith; W. R. Longley , 1961, “Elementos de Cálculo Diferencial e Integral”, Editora Científica, Rio de Janeiro.
- [8] A. U. Antunes; P. S. Rosa; N. Kagan, 2005, “Diagnóstico dos sistemas de aquisição de dados da AES ELETROPAULO”, Documento técnico Daimon Engenharia e Sistemas / ENERQ-USP / AES ELETROPAULO.
- [9] R. E. Furrh, 1999, “ Power quality and protective device coordination: Problems & Solutions Part 2 – High inrush currents for dry type transformers”, P. E.
- [10] Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto, 1977, “Estatística”, Editora Edgard Blucher LTDA, São Paulo.
- [11] J. D. Gibbons, 1971, “Nonparametric Statistical Inference”, McGraw-Hill, New York.
- [12] E. J. S. Montenegro, 1980, “Estatística programada passo à passo”, Volume 5, Centrais Impressoras Brasileiras LTDA.