



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 096

Tópico: Modelagens e Simulações

## UMA DISCUSSÃO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE ÍNDICES TRIFÁSICOS NA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO EM ACIONAMENTOS À VELOCIDADE VARIÁVEL

Viviane Reis de Carvalho Fonseca  
PUC-MG

Mario Fabiano Alves  
PUC-MG

**Resumo:** Este artigo descreve os índices trifásicos para caracterização do afundamento de tensão já apresentados em trabalhos anteriores com o objetivo de discutir a aplicabilidade destes índices na avaliação do impacto dos afundamentos de tensão nos acionamentos à velocidade variável CA e CC. Serão discutidas as vantagens e desvantagens destes índices, incluindo uma discussão relativa à necessidade de simulações e medições que forneçam os dados exigidos para a avaliação dos mesmos.

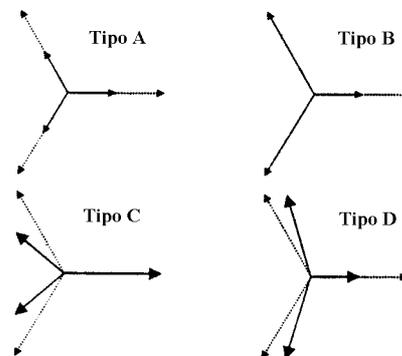
Em geral, a análise feita do distúrbio, considera a menor tensão (pior fase) como valor característico do afundamento de tensão. Isto só é real quando a falta é trifásica, e conseqüentemente, equilibrada. Já para faltas FT (Fase – Terra), FF (Fase – Fase) e FFT (Fase – Fase – Terra), os afundamentos de tensão gerados são desequilibrados, como mostrado na figura 1 [4]. Como a maioria das faltas é FT, conseqüentemente, a maioria dos afundamentos é desequilibrada.

**Palavras Chave:** Qualidade da energia elétrica, afundamento de tensão, índices trifásicos, acionamentos à velocidade variável.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

A imensa maioria dos trabalhos publicados na área utiliza a menor tensão remanescente entre as três fases para caracterizar a amplitude do afundamento de tensão [1,2,3]. Alguns trabalhos mais recentes [4,5,6,7,8,9,10,11] trazem propostas de índices trifásicos para o cálculo da amplitude característica do afundamento.

Os acionamentos à velocidade variável são exemplos de cargas muito sensíveis ao afundamento de tensão. Este artigo descreverá o comportamento dos acionamentos à velocidade variável CA e CC frente aos afundamentos de tensão [4], e dará ênfase à necessidade de avaliação do desempenho desta carga através de índices trifásicos. Para cargas trifásicas sensíveis como os acionamentos à velocidade variável, o desequilíbrio entre fases e o salto de ângulo de fase são tão importantes quanto à intensidade de um afundamento de tensão.



**Figura 1 – Diferentes tipos de afundamentos para diferentes tipos de falta. A – Falta Trifásica; B, C e D – Faltas Monofásicas e Bifásicas**

O salto de ângulo de fase devido ao afundamento de tensão, isto é, a mudança no ângulo de defasagem das fases durante a condição de afundamento de tensão também é uma característica importante na análise do impacto do distúrbio em cargas sensíveis [4]. A real sensibilidade de uma carga trifásica ao distúrbio só pode ser avaliada quando a análise feita engloba a combinação da amplitude, do desequilíbrio, e do salto de ângulo de fase causados pelo afundamento de tensão.

## 2.0 – COMPORTAMENTO DOS AVV'S (ACIONAMENTOS À VELOCIDADE VARIÁVEL) FRENTE AO AFUNDAMENTO DE TENSÃO [4]

### 2.1 – Acionamento CA

A maioria dos acionamentos ca são do tipo VSI – PWM, com exceção de acionamentos de grande porte. A configuração típica de um acionamento VSI – PWM é mostrada na figura 2. A tensão de saída do retificador é filtrada através de um capacitor conectado ao barramento cc. Em seguida temos o estágio inversor, normalmente controlado, que alimenta o motor.

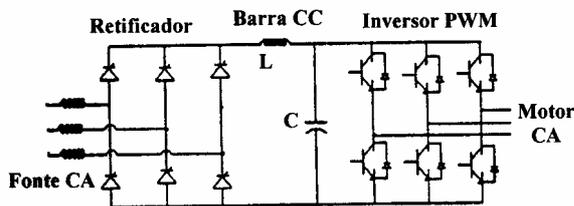


Figura 2 – Configuração Típica de um AVV CA

#### 2.1.1 – Funcionamento de um AVV CA frente a um afundamento equilibrado

No caso de um afundamento equilibrado, o desligamento ou mau funcionamento de um acionamento CA pode ocorrer devido a problemas no controlador ou no inversor PWM por causa da baixa tensão. Mas pode ocorrer também por causa da intervenção da proteção contra baixa tensão do barramento cc. O mais comum é que a proteção atue antes que o equipamento apresente alguma má operação.

#### 2.1.2 – Funcionamento de um AVV CA frente a um afundamento desequilibrado

Quando o acionamento está em operação normal, a tensão do barramento cc é filtrada pelo capacitor existente. Quanto maior o capacitor, menor o ripple da tensão. Para um retificador trifásico, o capacitor é carregado seis vezes a cada ciclo. Para um afundamento tipo C ou tipo D, diferentes fases tem diferentes quedas de tensão. O comportamento do acionamento, neste caso é completamente diferente do que foi colocado anteriormente (afundamento de tensão equilibrado).

O principal problema destes tipos de afundamentos não está relacionado com a queda de tensão, mas com o aumento da corrente no

barramento cc. O acionamento que possui um capacitor de tamanho significativo, tem a tensão mínima do barramento cc mantida num nível bem razoável [4]. O que ocorre então é que, o barramento cc tenta suprir o inversor com a mesma tensão pré-afundamento, e com isso, o aumento da corrente é inevitável.

Para um afundamento tipo D, uma tensão é muito menor que as outras duas. Enquanto na operação normal o capacitor carrega seis vezes por ciclo, agora ele carregará apenas quatro vezes por ciclo. Estes quatro pulsos devem conter a mesma quantidade de energia que os seis pulsos originais. A consequência disto é que os pulsos de corrente podem ser 50% maiores em amplitude, que os originais. Para um afundamento tipo C a situação é ainda pior. Uma tensão é bem maior que as outras duas. Neste caso o número de pulsos de corrente é reduzido de seis para dois pulsos por ciclo, o que acarreta uma sobrecorrente de 200%. Diante do exposto, o mais comum de ocorrer é a atuação da proteção contra sobrecorrente.

#### 2.1.3 – Funcionamento de um AVV CA frente ao salto de ângulo de fase provocado por um afundamento de tensão

No item anterior a análise foi feita sob a consideração de que o salto de ângulo de fase era zero. Isto faz com que duas das fases tenham o mesmo valor de pico: as duas fases maiores para um afundamento D, e as duas fases menores para o afundamento C. Quando acontece o salto de ângulo de fase, uma destas duas fases fica um pouco menor e a outra maior. Portanto, o efeito do salto de ângulo não é significativo em acionamentos ca.

### 2.2 – Acionamento CC

Um acionamento CC típico pode ser representado esquematicamente pela figura 3. A fonte CA é ligada à armadura do motor CC através de um retificador controlado, e ao enrolamento de campo através de outro retificador, que geralmente não é controlado. O mais comum é usar a topologia de seis pulsos com seis SCR's. O tempo de disparo dos SCR's é precisamente controlado em relação à forma de onda da fonte, de forma a obter a tensão média de saída desejada. Quanto maior o ângulo de disparo, menor a tensão na armadura. Usualmente um loop de realimentação (tensão ou velocidade) é usado para controlar este ângulo de disparo. Os acionamentos CC modernos possuem um circuito de sincronismo com o zero

da tensão da fonte. Porém, quando ocorre um afundamento de tensão, este circuito mantém o sincronismo por pouco tempo.

A velocidade de um motor cc pode ser dada pela expressão (1). A velocidade aumenta quando a tensão de armadura aumenta ou quando a tensão de campo diminui.

$$\omega_m = \frac{R_f}{k} \times \frac{V_a}{V_f} \quad (1), \quad \text{onde:}$$

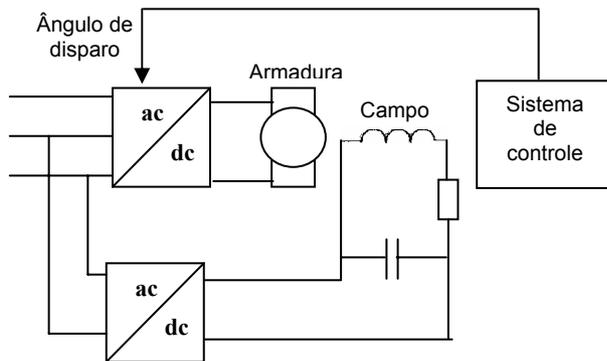
$\omega_m$  é a velocidade do motor,

$R_f$  é a resistência do circuito de campo,

$V_a$  é a tensão no enrolamento da armadura, e

$V_f$  é a tensão no enrolamento de campo.

O controle de velocidade de um motor cc pode ser feito pelo aumento da tensão de armadura ou pela diminuição da tensão de campo.



**Figura 3 – Acionamentos CC modernos: excitação separada para a armadura e para o enrolamento de campo do motor CC**

### 2.2.1 – Funcionamento de um AVV CC frente a um afundamento equilibrado

De acordo com a equação (1), a velocidade do motor é proporcional à razão entre a tensão de armadura e a tensão de campo. Um afundamento de tensão nas três fases faz com que a tensão de armadura e a tensão de campo caiam na mesma proporção: a velocidade deveria se manter a mesma. Porém, devido aos efeitos transitórios, esta não é a realidade.

A queda das correntes de armadura e de campo leva a uma queda no torque que por sua vez causa uma queda de velocidade. A queda de velocidade e a queda na corrente de campo causam uma redução do campo eletromagnético de reação. Mais cedo ou mais tarde este campo eletromagnético de reação será menor do que a tensão de armadura. Devido à queda da velocidade e da corrente de campo, a nova

corrente de armadura é maior que o valor anterior ao evento. Quanto mais a velocidade cai, mais o campo eletromagnético de reação cai, mais a corrente de armadura aumenta, e mais o torque aumenta. O torque se torna maior do que o torque da carga, e assim ela sofre uma aceleração. A carga estabiliza na velocidade e torque originais, porém para uma corrente de campo menor e uma corrente de armadura maior. A queda na corrente de campo é equivalente à queda de tensão. A corrente de armadura aumenta tanto quanto a corrente de campo diminui, pois o produto delas (o torque) permanece constante.

O sistema de controle de um acionamento cc pode controlar uma série de parâmetros: tensão de armadura, corrente de armadura, torque, ou velocidade. Se o sistema de controle fosse capaz de manter as tensões de armadura e de campo estáveis o acionamento não sentiria o afundamento de tensão equilibrado. Porém, o mais comum é que o controle só venha a agir depois de alguns ciclos, e assim, a proteção do acionamento pode atuar devido a qualquer dos fatores transitórios discutidos anteriormente. O mais comum é a proteção contra subtensão no barramento cc atuar.

### 2.2.2 – Funcionamento de um AVV CC frente a um afundamento desequilibrado

No caso de um afundamento de tensão desequilibrado, a tensão de armadura e a tensão do enrolamento de campo não caem na mesma proporção. A tensão de armadura é obtida através de um retificador trifásico, enquanto a tensão de campo é obtida através de um retificador monofásico. Inicialmente tanto a corrente de campo quanto a corrente de armadura caem, levando a uma queda no torque e conseqüentemente de velocidade. Mas o regime permanente de funcionamento será:

- Se a tensão de campo cair mais que a tensão de armadura, o campo eletromagnético de reação rapidamente se tornará menor do que a tensão de armadura, acarretando num aumento da corrente de armadura. Conseqüentemente a velocidade pós evento será maior que a velocidade anterior. Os principais riscos são a sobrecorrente na armadura e a sobrevelocidade;
- Se a tensão de campo cair menos que a tensão de armadura, a corrente de armadura decairá, sendo limitada somente pela queda de velocidade do motor. O torque do motor demora um longo tempo para se recuperar. A velocidade pós evento será menor que a anterior. O principal risco é a velocidade reduzida.

### 2.2.3 – Funcionamento de um AVV CC frente ao salto de ângulo de fase

O salto de ângulo de fase afeta o ângulo de disparo dos tiristores. O instante de disparo é determinado pelo circuito de disparo, o qual leva alguns ciclos para reagir ao salto de ângulo. Como resultado deste atraso, a tensão do sistema fica deslocada da tensão de referência, levando os tiristores a serem disparados no ponto errado da onda de tensão.

Para afundamentos de tensão equilibrados o salto de ângulo de fase é igual nas três fases, e assim a mudança no ângulo de disparo será a mesma para cada fase. Se o salto for menor que o ângulo de disparo, a tensão de saída do retificador será maior do que se não tivesse ocorrido o salto de ângulo. Este fato supõe que o salto de ângulo de fase é negativo, o que ocorre na maioria das vezes. Um salto de ângulo de fase negativo compensa, em parte, a queda de tensão gerada pelo afundamento. Para um salto de ângulo positivo a tensão de saída será reduzida, ou seja, o salto de ângulo de fase positivo agrava a intensidade do afundamento de tensão.

Para afundamentos desequilibrados a situação é mais complicada. Em muitos casos diferentes fases apresentam salto de ângulo de fase positivos e negativos. Portanto, para algumas fases o resultado é o agravamento do afundamento, e para outras não. Algumas fases podem perder seu pulso de disparo, e outras não. O enrolamento de armadura pode ser influenciado diferentemente do enrolamento de campo.

### 3.0 – ÍNDICES TRIFÁSICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Existem diversos métodos propostos para a caracterização do afundamento de tensão que consideram dados trifásicos. Um primeiro grupo de métodos propõe a caracterização do afundamento através de uma amplitude e de uma duração, porém, sem considerar fatores como o desequilíbrio de fases e o salto de ângulo de fase [1,2,7]. A tabela 1 sintetiza esses métodos.

No segundo agrupamento de métodos a proposta é usar somente um parâmetro para caracterização do distúrbio [5,6,11]. Esses métodos também não levam em consideração o desequilíbrio de fases e o salto de ângulo de fases. A tabela 2 apresenta um resumo deste grupo de métodos.

**Tabela 1 – Métodos de Caracterização de Afundamentos de Tensão Trifásicos – Grupo 1**

Método	Parâmetros	
	Amplitude	Duração
UNIPEDE (Europa) [8,9]	Menor tensão remanescente entre as três fases	Período de tempo decorrido a partir de quando uma das fases chega ao limite de 90% até o momento em que nenhuma fase seja inferior a 90%.
NRS – 048 (África do Sul) [7]	Menor tensão remanescente entre as três fases	Duração associada à pior fase afetada pelo distúrbio
EPRI – ELECTROTEK [8,10]	Menor tensão remanescente entre as três fases	Duração associada à pior fase afetada pelo distúrbio, a partir de um limite de tensão especificado. *

\* Obs.: No caso de afundamentos de tensão que não possuem forma retangular este método atribui durações diferentes conforme limiares específicos.

**Tabela 2 – Métodos de Caracterização de Afundamentos de Tensão Trifásicos – Grupo 2**

Método	Parâmetro
Perda de Tensão [11]	Integral da queda de tensão durante o evento: $L_V = \int \{1 - V(t)\} dt$ onde: $V(t)$ é a magnitude da tensão em função do tempo (pu)
Perda de Energia [11]	Integral da queda de energia durante o evento: $L_E = \int \{1 - V(t)^2\} dt$ onde: $V(t)$ é a magnitude da tensão em função do tempo (pu)
Proposição de Thallam [11]	Energia do Afundamento: $E_{VS} = \left\{1 - \frac{V}{V_{Nom}}\right\}^2 \times T$ onde: $V$ é a magnitude do afundamento em Volt e $T$ é a duração do evento
Proposição de Heydt [5]	Perda de Energia no Afundamento $E_{VS} = \left\{1 - \frac{V}{V_{Nom}}\right\}^{3,14} \times T$ onde: $V$ é a magnitude do afundamento em Volt e $T$ é a duração do evento

\*Obs.: Para a análise trifásica o valor de cada parâmetro é somado para as três fases.

Existem dois métodos propostos por Bollen [4,6], que são fundamentados na teoria de componentes simétricas. O item a seguir descreve o primeiro deles e comenta sobre o segundo.

### 3.1 – Tensão característica complexa

A grande maioria dos afundamentos de tensão desequilibrados são do tipo C ou D (fig. 1). Portanto, é necessário a distinção entre esses dois tipos de afundamento, mais a amplitude da tensão característica e seu ângulo de fase para a caracterização do afundamento de tensão desequilibrado. A tensão característica  $\bar{V}$  é definida pelo fasor complexo representando a tensão na fase de menor valor no caso de afundamentos tipo D, e para afundamentos tipo C este fasor é obtido pela tensão entre as duas fases de menor intensidade.

As tensões complexas para as três fases, para um afundamento de tensão do tipo C, são dadas pelas seguintes relações:

$$\begin{aligned}\bar{V}_a &= \bar{F} \\ \bar{V}_b &= -\frac{1}{2}\bar{F} - \frac{1}{2}j\bar{V}\sqrt{3} \\ \bar{V}_c &= -\frac{1}{2}\bar{F} + \frac{1}{2}j\bar{V}\sqrt{3}\end{aligned}\quad (2)$$

Para um afundamento do tipo D os valores resultantes são:

$$\begin{aligned}\bar{V}_a &= \bar{V} \\ \bar{V}_b &= -\frac{1}{2}\bar{V} - \frac{1}{2}\bar{F}j\sqrt{3} \\ \bar{V}_c &= -\frac{1}{2}\bar{V} + \frac{1}{2}\bar{F}j\sqrt{3}\end{aligned}\quad (3)$$

Onde  $\bar{F}$  é um fator que permite considerar valores diferentes para as impedâncias de seqüência positiva e negativa [6].

Essas relações são usadas para calcular  $\bar{V}$  e  $\bar{F}$  através das equações abaixo:

Para um afundamento tipo C:

$$\begin{aligned}\bar{V} &= \bar{V}_1 - \bar{V}_2 \\ \bar{F} &= \bar{V}_1 + \bar{V}_2\end{aligned}\quad (4)$$

Para um afundamento tipo D:

$$\begin{aligned}\bar{V} &= \bar{V}_1 + \bar{V}_2 \\ \bar{F} &= \bar{V}_1 - \bar{V}_2\end{aligned}\quad (5)$$

A tensão característica de um afundamento também pode ser obtida através de um método alternativo proposto por Bollen [4,6]. Este método usa os valores calculados das tensões de fase e de linha para classificar um afundamento de tensão entre seis subtipos.

### 4.0 – APLICABILIDADE DOS ÍNDICES TRIFÁSICOS À ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS AVV's

Os métodos descritos na tabela 2 utilizam dados das três fases para o cálculo de parâmetros de caracterização do afundamento de tensão. Porém não incorporam à análise parâmetros como o desequilíbrio de fases e o salto de ângulo de fase. Estas duas características são de suma importância para a análise da sensibilidade dos AVV's, como foi descrito no item 2 deste artigo. Portanto os indicativos são que esses métodos não se mostram adequados à esse tipo de análise, sendo necessário estudos adicionais para sua aplicação com segurança.

Dentre os métodos citados neste artigo, o que mais se adequa à análise de sensibilidade dos AVV's é o proposto por Bollen [4,6] e descrito no item 3.1. Este é o único método que incorpora à análise do afundamento, características como o desequilíbrio de fases e o salto de ângulo de fase.

Porém é importante salientar que ainda existe um longo caminho a percorrer para que este método seja realmente usado para avaliar a sensibilidade de cargas trifásicas. É necessário que as cargas trifásicas sejam testadas de acordo com esses parâmetros para que se estabeleça um padrão de comportamento das mesmas. De acordo com [12] o comportamento das cargas trifásicas frente ao afundamento de tensão deve ser avaliado com relação aos três tipos principais de afundamentos: A, C e D (figura 1). Para cada tipo de afundamento deve ser avaliado em separado os seguintes efeitos:

- variação da tensão característica;
- variação do salto de ângulo de fase;
- variação da duração do afundamento.

A aplicabilidade deste método, bem como de outros similares que venham a ser propostos, além dos testes dos acionamentos na forma mencionada acima, exige, portanto, que dados de monitoramento ou de simulações computacionais estejam disponíveis em formato adequado.

O trabalho em desenvolvimento pelos autores [13,14,15] tem o objetivo de integrar ferramentas de gerenciamento e análise da qualidade de energia como um todo [13]. Este projeto engloba o tratamento de dados sobre qualidade de energia tanto de origem em monitorações quanto em simulações. Os dados armazenados por medição e simulação estão suficientemente detalhados para uma futura análise trifásica pelo método do item 3.1.

## 6.0 - CONCLUSÕES

A caracterização dos afundamentos de tensão para uma análise mais apurada do comportamento dos acionamentos à velocidade variável, exige que os desequilíbrios de tensão entre fases bem como o salto de ângulo de fase, sejam devidamente considerados. Dentre os métodos discutidos neste artigo, aquele proposto por Bollen [4,6] é o mais adequado para esta análise. A aplicação do método exige ainda o estabelecimento de procedimentos de testes, e portanto elaboração de normas técnicas, para que seja possível obter-se os parâmetros definidores da sensibilidade dos acionamentos em formato apropriado.

A utilização de métodos do tipo um parâmetro (Tabela 2), poderá se mostrar conveniente, particularmente para os acionamentos cc, pendente entretanto de mais investigação. Os métodos clássicos (Tabela 1), amplamente utilizados, requerem bastante cuidado quando utilizados para a avaliação do comportamento dos AVVs.

## 7.0 - REFERÊNCIAS

- [1] Conrad, L., Little, K., Grigg, C., "Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault-Clearing Voltage Dips", IEEE Transactions on Industry Applications, v. 27, n. 1, p. 167-172, Jan/Feb, 1991.
- [2] Becker, C., Braun, W. Jr., Carrick, K. et al, "Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std 493, the *Gold Book*", IEEE Transactions on Industry Applications, v. 30, n. 3, p. 805-821, May/Jun, 1994.
- [3] Bollen, M. H. J., Qader, M. R., et al, "Stochastic Assessment of Voltage Dips in Large Transmission Networks – Theory and Case Study", Int. Conf. on Large High-Voltage Electric Networks - CIGRE, August, 1998, Paris.
- [4] Bollen, M. H. J., "Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press Series on Power Engineering, 543p, 1999, New York.
- [5] Thallam, R. S. and Heydt, G. T., "Power Acceptability and Voltage Sag Indices in the Three Phase Sense", IEEE PES Summer Meeting 2000, Seattle, WA, USA, July 2000.
- [6] Bollen, M. H. J. and Styvaktakis, S., "Characterization of Three-phase Unbalanced Sags, as easy as one, two, three", IEEE PES Summer Meeting 2000, Seattle, WA, USA, July 2000.
- [7] NRS – 048, "ELECTRICITY SUPPLY – QUALITY OF SUPPLY – Part1 Minimum Standards", for Application by the National Electricity Regulator, South Africa, 1998.
- [8] Brooks, D. L. , Dugan, R. C., Waclawiak, M. and Sundaram, A. , "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance", [www.PQNET.ELECTROTEK.com](http://www.PQNET.ELECTROTEK.com)
- [9] Brooks, D. L. , Dugan, R. C. and Sundaram, A. , "Recommendations for Tabulating RMS Variations Disturbances with Specific Reference to Utility Power Contracts " , [www.PQNET.ELECTROTEK.com](http://www.PQNET.ELECTROTEK.com) .
- [10] Sabin, D.D., Grebe, T. E. and Sundaram, A, " RMS Voltage Variation Statistical Analysis for a Survey of Distribution System Power Quality Performance"
- [11] Thallam, R., "Comments on Voltage Sags Indices", IEEE P1564 Internal Document, 2 January 2000.
- [12] Bollen, M. H. J., Svenson, J., Zhang, L. D., "Testing of Grid-connected Power-electronics Converters for the Effects of Short Circuits in the Grid", 8th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'99), Lausanne, Switzerland, 7-9 September 1999.
- [13] ALVES, M. F., FERNANDES, D. E., "Development of an Automated Power Quality Management System", 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 2, pag. 579-584, ISBN 07803-5515-6, New Orleans, USA, Abril, 1999.
- [14] Fonseca, V. R. C., "Cálculo Estocástico do Afundamento de Tensão Devido à faltas em Sistemas de Transmissão e Distribuição", IV SBQEE - (Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica), p. 275-280, Porto Alegre/RS, Brasil, 12 a 17 de agosto de 2001.
- [15] Fonseca, V. R. C., Alves, M. F., "A Dedicated Software for Voltage Sag Stochastic Estimate", 10th IEEE PES International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), October 06-09, 2002, Rio de Janeiro, Brazil.