



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 02 7704
Tópico: Aplicação de Novas Tecnologias

SISTEMA INTELIGENTE DE APOIO À DECISÃO DE CORTE DE CARGA

C. CELSO DE
BRASIL
CAMARGO

UFSC

JORGE
COELHO

UFSC

ANA BÁRBARA
KNOLSEISEN

UFSC

FABIANO
FERREIRA
ANDRADE

UFSC

EDUARDO
GAULKE

UFSC

RAQUEL
SABOIA DA
ROCHA

UFSC

RESUMO

O aumento da qualidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores tem sido o principal objetivo das empresas distribuidoras nos últimos anos. A necessidade de executar cortes de carga no sistema de distribuição quando a geração e/ou transmissão não atendem toda a demanda impacta diretamente nos indicadores de qualidade e satisfação dos clientes. Nestes termos, este artigo apresenta uma metodologia para otimizar as técnicas de corte de carga na distribuição atendendo as solicitações do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

PALAVRAS-CHAVE

Corte de Carga, Qualidade da Energia, Demanda Probabilística, Regulação de Tensão.

1.0 INTRODUÇÃO

As redes de distribuição são o elo final da interconexão entre os sistemas de potência e os consumidores. Cada vez mais as empresas concessionárias de energia elétrica têm sido incentivadas a melhorar a qualidade do serviço prestado aos seus clientes, seja pelo rigor das metas de continuidade definidas pelo órgão regulador ou pela busca da excelência no atendimento aos seus consumidores frente à outras distribuidoras. Entretanto, eventuais limitações nos sistemas de geração e/ou transmissão obrigam o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) a solicitar cortes de carga às distribuidoras [1].

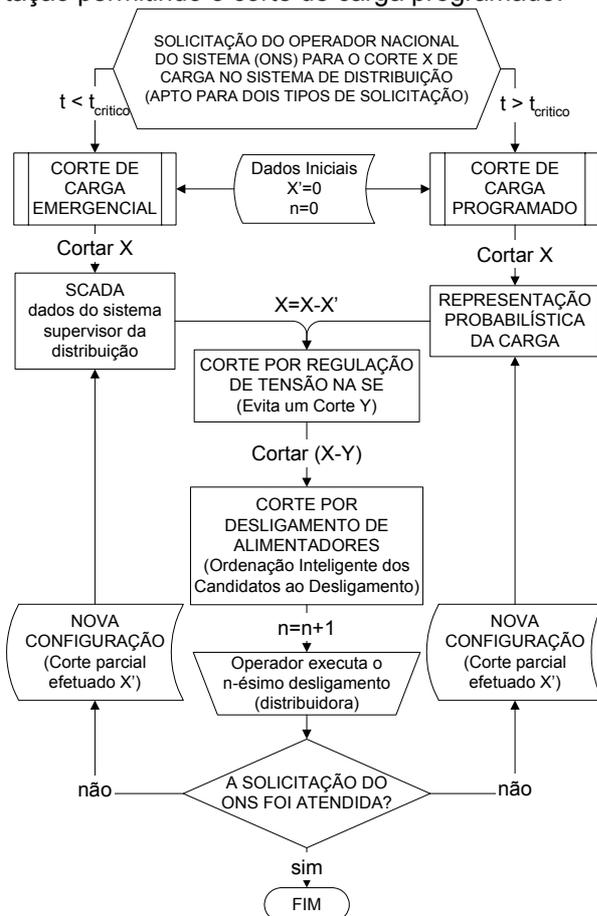
Assim, este artigo apresenta uma metodologia para otimizar as técnicas de corte de carga na distribuição de forma emergencial e programada. As técnicas empregadas na execução do corte têm influência direta nos índices de qualidade e custos que a interrupção no fornecimento reflete aos consumidores e concessionária. Tipicamente, os planejadores e operadores desses sistemas utilizam suas experiências passadas e estudos operacionais realizados periodicamente para a tomada de decisões. Contudo, avaliar as possibilidades para a efetivação do corte pode exigir do operador um tempo demasiadamente longo para a tomada de decisões. A análise e identificação da melhor seqüência de ações com o auxílio de uma ferramenta computacional de apoio à decisão permitem ganhos significativos no processo. A metodologia desenvolvida para otimização da execução do corte de carga visa a melhoria da qualidade no fornecimento de energia elétrica com o uso em conjunto de técnicas de inteligência artificial (algoritmos genéticos), análise multicritério, fluxo de carga probabilístico em sistema de distribuição e regulação dos perfis de tensão. Como o sistema está ainda em desenvolvimento, será apresentado um estudo de caso de corte de carga baseado na regulação de tensão na subestação. À medida que forem obtidos novos resultados estes serão apresentados.

2.0 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA

Um corte de carga 'inteligente' irá determinar, adequadamente, quais alimentadores devem ser

desligados para executar o corte de carga solicitado pela operação para a região atingida.

A solicitação do ONS refere-se basicamente à quantidade de MW a serem cortados (X) e ao prazo para sua execução (t). Como o grau de incerteza quanto ao fluxo de potência no sistema de distribuição depende das condições de carregamento do sistema (horário), o tempo para a execução do corte de carga indicará o tipo de solução. Caso este tempo seja menor que o tempo crítico (tempo limite para que as condições de tensão e corrente não se alterem substancialmente), serão utilizados os dados do sistema de aquisição e processamento de dados da concessionária (SCADA) para iniciar a solução de um corte de carga emergencial. Caso contrário, o aumento do grau de incerteza leva ao uso dos dados de tensão e corrente calculados através da representação probabilística da carga. Esta técnica permite a previsão do carregamento dos alimentadores, com certa probabilidade, para o horário da solicitação permitindo o corte de carga programado.



A partir do conhecimento das condições de carregamento do alimentador onde será efetuado o corte de carga, o sistema inteligente verifica a potência ativa que pode ser aliviada (Y) da rede através da regulação de tensão na saída da(s)

subestação(ões), respeitando os limites para o adequado fornecimento da energia elétrica.

A diferença conseguida através da regulação só poderá ser atendida através do efetivo desligamento de alimentadores. O sistema inteligente promove a ordenação dos alimentadores candidatos ao desligamento. Essa etapa da metodologia é de suma importância para a melhoria dos indicadores de qualidade da distribuidora.

Um algoritmo genético irá gerar alternativas para o corte de carga. A população (número de alternativas de cortes) será avaliada segundo diversas variáveis (dec/fec, serviços essenciais, energia não suprida) com seus pesos determinados através de uma matriz multicritério. Em seguida, cada indivíduo da população (cada alternativa de corte) será avaliado por uma função de aptidão, buscando-se minimizar a receita não atendida no corte, minorar as penalidades referentes aos níveis de dec/fec e os desligamentos de serviços considerados essenciais. Essa população sofre então reproduções sucessivas até que o resultado seja considerado satisfatório.

O operador da distribuição deve efetuar o desligamento do primeiro alimentador da lista ordenada. Este procedimento gera um corte (n) de carga parcial (X') que pode não ser suficiente para atender a solicitação do ONS, mas modifica as condições de carregamento do sistema e justifica uma reavaliação da regulação de tensão e do algoritmo genético. Então, após o processamento deste dois módulos, o operador pode desligar o segundo alimentador (primeiro da nova lista gerada) para atender ao corte de carga solicitado. O procedimento segue até que toda a solicitação seja atendida. As seções seguintes apresentam os detalhes de cada etapa da metodologia.

3.0 FLUXO DE CARGA PROBABILÍSTICO

O fluxo de carga (ou fluxo de potência) é a ferramenta básica para determinar o perfil de tensão de um alimentador ou rede, e pode ser utilizado para simular o estado operativo de um sistema. Vários algoritmos têm sido desenvolvidos com este objetivo, diferindo muito em fundamentos matemáticos e desempenhos, contudo a maioria trabalha com condições determinísticas e variáveis de entrada fixas.

Quando se trabalha com incertezas estatísticas, o problema da estimação das variáveis de entrada pode ser superado via aproximação estocástica, usando variáveis randômicas e aplicando métodos da teoria probabilística, minimizando a imprecisão na solução [2].

O Fluxo de Carga Probabilístico (FCP) tem sua contribuição em estudos de corte de carga, com a

representação probabilística desta, servindo de base para o desenvolvimento da modelagem para representar analiticamente a incerteza nas tensões nodais de sistemas de distribuição, quando ocorre uma variação na demanda. Essa modelagem é a base que possibilitará a análise de redução do corte de carga através da regulação de tensão na subestação de distribuição, conforme será apresentado mais adiante.

A técnica do FCP reconhece a natureza probabilística dos parâmetros de entrada, dentro de cada solução [3]. Um algoritmo de FCP transforma as variáveis randômicas de entrada em variáveis randômicas de saída, ambas definidas em termos de função densidade de probabilidade. Os métodos usados para transformar as variáveis randômicas de entrada têm levado ao desenvolvimento de muitas formulações.

O desenvolvimento da técnica de FCP vem sendo empregado com maior frequência a partir das publicações [4, 5], as quais utilizam modelo DC¹ para análise do fluxo de carga e consideram a parte real das cargas como variáveis randômicas. A não linearidade das equações de fluxo de carga tem sido superada pela linearização ao redor do ponto de operação esperado, e pode ser considerada uma boa hipótese mesmo para níveis razoáveis de incerteza nas variáveis de entrada [2, 6]. Porém, quando as incertezas são grandes, métodos de simulação devem ser usados, como, por exemplo, simulação Monte Carlo ou algoritmos mais elaborados [7].

Considerando que a maioria dos trabalhos propostos para resolver probabilisticamente o problema do fluxo de carga, levam em conta somente as incertezas nos dados de carga e geração, modelando a rede elétrica por uma configuração fixa. Alguns trabalhos publicados apresentam formulações que analisam os efeitos das contingências dos elementos das redes no problema do FCP.

Em [6], por exemplo, é apresentado um algoritmo de FCP que considera a configuração da rede como uma variável aleatória, tendo em vista a influência das incertezas na configuração devido à natureza probabilística das contingências de seus elementos. O modelo de fluxo de carga é AC linear e o modelo probabilístico de contingências é estruturado de forma a compensar os efeitos do truncamento. A avaliação da probabilidade associada a cada configuração pode ser obtida por levantamento histórico ou pelo cálculo basea-

do nas indisponibilidades, considerando todas as contingências de primeira ordem e algumas de ordem superior.

4.0 CORTE DE CARGA VIA REGULAÇÃO DE TENSÃO NA S.E.

É possível determinar a sensibilidade da variação das tensões em cada barra do sistema de distribuição, quando ocorre uma variação na sua demanda, sem que seja necessária uma nova solução do fluxo de carga [8].

Assim, com base na aplicação para a análise de sensibilidade apresentada por [9] e na formulação apresentada [10], foi desenvolvida uma representação do fluxo de carga de sistemas de distribuição, a partir de uma descrição probabilística dos dados de demanda em cada barra. Esta modelagem permite representar analiticamente a sensibilidade das tensões das barras da rede quando ocorre uma variação na sua demanda, sem que seja necessária uma nova solução do fluxo de carga para cada novo perfil da demanda.

A descrição probabilística dos dados de demanda em cada barra possibilita, por exemplo, a identificação dos nós da rede mais sensíveis à variação da tensão, auxiliando nos procedimentos de corte de carga.

Para a análise da variação da tensão (sensibilidade) em todas as barras da rede, dado um corte de carga em uma determinada barra, deve ser observado que os termos que contêm as derivadas da tensão em relação ao ponto mais a jusante devem ser convenientemente calculados.

A obtenção das derivadas da tensão em relação a potência ativa $\frac{\partial V}{\partial P}$ e em função da potência

reativa $\frac{\partial V}{\partial Q}$, para todas as barras de um sistema

de distribuição, quando uma determinada barra sofre uma variação na demanda, permite obter uma matriz que representa analiticamente a sensibilidade das tensões de cada barra, denominada Matriz de Sensibilidade, mostrada abaixo.

$$MS_P = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial P_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial P_n} \end{bmatrix} \quad MS_Q = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial Q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial V_n}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial V_n}{\partial Q_n} \end{bmatrix}$$

A descrição probabilística dos dados de demanda em cada barra possibilita, por exemplo, a identificação dos nós da rede mais sensíveis à variação da tensão.

¹ Utilizar modelo DC ou modelo linear de rede na formulação do fluxo de carga implica em considerar somente a parte ativa das variáveis.

4.1 Estudo de caso

Seja o alimentador radial com 7 pontos de carga candidatos a corte de carga apresentado na figura abaixo:

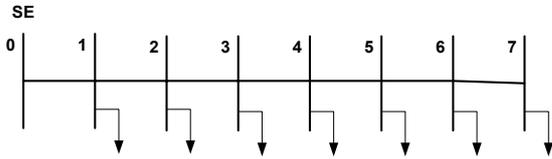


Figura 1: Subestação com um alimentador radial com 7 pontos onde pode haver cortes de carga.

A matriz de sensibilidade obtida para a variação da tensão em relação à potência ativa é dada por:

Tabela 1: Matriz de sensibilidade em relação à potência ativa.

$\frac{\partial V_i}{\partial P_j} \times 10^3$	1	2	3	4	5	6	7
1	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3	-7,3
2	-7,3	-46,8	-46,8	-46,8	-46,8	-46,8	-46,8
3	-7,4	-46,9	-76,3	-76,3	-76,3	-76,3	-76,3
4	-7,4	-47,1	-76,5	-107,2	-107,2	-107,2	-107,2
5	-7,5	-47,5	-77,2	-108,1	-174,9	-174,9	-174,9
6	-7,5	-47,7	-77,4	-108,5	-175,5	-190,9	-190,9
7	-7,5	-47,9	-77,9	-10,9	-176,5	-192,0	-250,2

Pela matriz de sensibilidade é possível verificar que a barra 7 é a barra mais sensível à variação da tensão quando ocorre um corte em qualquer uma das barras do sistema. Assim, considerando iguais cortes de potência ativa (mesmo montante) em cada uma das barras, a sensibilidade da própria barra que sofreu o corte pode ser verificada na Figura 2, onde se observa a barra 7 como a mais sensível do sistema.

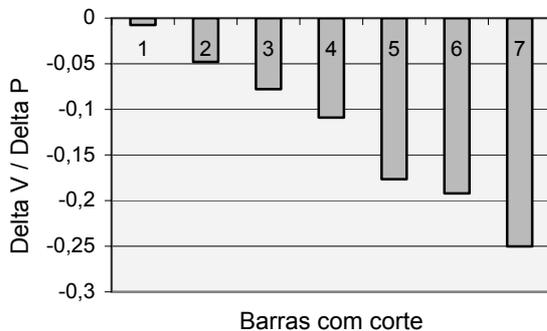


Figura 2: Sensibilidade da tensão para cortes de carga iguais em cada barra do sistema

Da mesma forma, considerando iguais cortes de carga ativa em cada uma das barras do sistema,

a sensibilidade percebida em cada uma das barras é apresentada na Figura 3. Cada seqüência apresenta a sensibilidade da tensão nas 7 barras do sistema, considerando o corte de carga ativa em apenas uma delas.

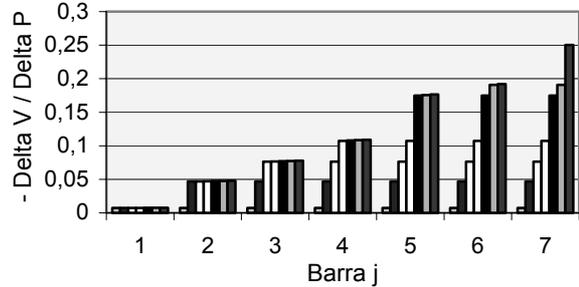


Figura 3: Variação de tensão na barra i devido ao corte em cada barra j

Pelo gráfico da sensibilidade da tensão em relação à potência ativa fica visível que o maior ganho de tensão, ou seja, um maior aumento na tensão das barras do sistema será obtido quando o corte de carga for realizado na barra 7. Esta solução em sistemas radiais sem laterais é quase trivial, o mesmo não ocorre em redes mais complexas.

Pelos resultados apresentados é possível comprovar a eficiência do método desenvolvido para auxiliar no corte de carga, tendo em vista que os índices obtidos indicam as barras mais sensíveis, em termos de tensão, para variações de carga. Assim, é possível estabelecer uma ordem para efetuar os cortes de carga. Da mesma forma, para cada corte realizado é fácil obter uma nova ordem para dar continuidade aos cortes no sistema caso o corte anterior não tenha sido suficiente para alcançar a tensão desejada em determinado ponto do sistema.

5.0 CORTE DE CARGA VIA DESLIGAMENTO DE ALIMENTADORES

Com a regulação de tensão na subestação, mostrada na seção anterior, pode-se conseguir uma significativa redução do efetivo corte de carga, dependendo basicamente da tipologia das redes e da magnitude das cargas nessa área.

Contudo, normalmente essa redução no consumo não atende por completo à solicitação de corte de carga, restando à empresa concessionária desconectar seletivamente alimentadores na área de interesse. Nessa situação, é necessário analisar uma série de alternativas e executar uma seqüência de comandos que conduza ao corte desejado, fazendo uso dos recursos de chaveamento que possui o sistema (disjuntores e chaves seccionadoras). Dois objetivos sempre persegui-

dos são a minimização da demanda cortada (energia não faturada) e atendimento de serviços essenciais.

Na seqüência deste trabalho comenta-se sobre algumas das metodologias para corte de carga apresentadas na literatura, que estão sendo aplicadas na continuação desta nova proposta metodológica, atentando para importantes critérios que devem ser considerados na execução de corte de carga em sistemas de distribuição.

Tipicamente essas técnicas, empregadas na identificação dos alimentadores candidatos ao corte de carga descritas na literatura, priorizam apenas algum dos critérios na função objetivo de otimização do corte. Dentre eles pode-se citar:

- Custo da interrupção para os consumidores [11];
- Metas de continuidade cobradas pelo órgão regulador (DEC e FEC) [12];
- Controle de Tensão e Níveis de Carregamento;
- Duração da operação com chaveamento [13];
- Perdas elétricas e outros.

A preocupação com o tempo para execução das operações de corte de carga foi abordada em [13], onde se propõe um esquema para corte de carga local devido a sobrecargas em equipamentos de uma rede de transmissão subterrânea. Nessa abordagem o custo que a interrupção de energia representa para os consumidores não é considerada no processo decisório, estando focadas na minimização da carga cortada e rapidez na identificação de estratégias de atuação.

Buscando englobar na função objetivo os aspectos financeiros decorrentes do desligamento de demanda, em [11] foi descrita uma técnica de corte de carga na qual a função objetivo sugere a desconexão de cargas buscando a minimização dos custos que a interrupção de energia elétrica causa para os consumidores.

Uma condição básica para a aplicação dessa proposta em sistemas de distribuição é conseguir desenvolver modelos que possam valorar o custo de interrupção para diferentes classes de consumidores. Outro aspecto que pode ser inserido na função objetivo para indicação dos alimentadores candidatos ao corte, é a observação do atendimento das metas de continuidade (DEC e FEC) estabelecidas pelo órgão regulador (ANEEL). Muitas vezes pode ser vantajoso para a concessionária poupar do desligamento consumidores que estão conectados a alimentadores com altas taxas de duração e frequência de falhas, evitando penalizações pelo não cumprimento das metas.

Focado neste tema, em [12] foi apresentada uma metodologia para avaliar a performance de um sistema de distribuição considerando diferentes prioridades para o corte de carga. Mostra-se que pode haver uma grande variação nas soluções

dentre as distintas estratégias possíveis para o corte. Dependendo das características do sistema pode-se optar por uma estratégia que não conduza ao menor custo de interrupção, mas que prioriza outro parâmetro, como frequência e duração da falha, vitais para o funcionamento de certos processos.

Outros critérios que podem compor a função objetivo na busca pelas cargas a serem desconectadas do sistema de distribuição, são o controle de tensão e níveis de carregamento da rede.

Levando em consideração esses dois critérios, o corte de carga é realizado nos pontos do sistema que reduzem o carregamento nos componentes e melhoram o perfil de tensão ao longo dos alimentadores. Com a melhoria nos níveis de carregamento pode-se conseguir a redução das perdas elétricas, além do aumento da vida útil dos equipamentos da rede.

Para executar o corte de carga solicitado, baseado em qualquer um dos critérios acima, o operador responsável pelo comando e acompanhamento das manobras de emergência na distribuidora deve estar apto a lidar com um volume enorme de informações. A pressão sobre a decisão a ser tomada e possivelmente a grande quantidade de casos para analisar, tornam ainda mais difícil o cumprimento das tarefas. Além disso uma operação equivocada pode ter conseqüências em toda rede, até mesmo além da fronteira de domínio do responsável pela manobra.

6.0 CONCLUSÕES

Com o intuito de auxiliar o operador na tomada de decisão, a equipe de autores desse trabalho continua desenvolvendo um sistema computacional que prioriza diversos critérios importantes na seleção dos alimentadores candidatos ao corte de carga. Além da importante ajuda no processo decisório em tempo real, essa ferramenta computacional é importante para o treinamento de operadores, simulando situações já vivenciadas.

O sistema proposto utiliza técnicas de inteligência artificial incorporando análise multiobjetivo.

Dentre as ferramentas analisadas apontam-se os algoritmos genéticos como a mais favorável a ser implementada no desenvolvimento do sistema inteligente de corte de carga, sendo elas úteis na solução de problemas em que outras técnicas de otimização apresentam dificuldades para encontrar a solução.

O sistema computacional apontará uma lista com os alimentadores mais propícios para complementar o corte de carga solicitado pela operação para a região atingida.

Essa ferramenta, portanto, propiciará resultados positivos tanto para a concessionária, que poderá efetuar o corte solicitado pelo operador do sistema com o menor prejuízo em suas contas, assim como para o consumidor que receberá por parte da distribuidora uma atenção maior na qualidade do serviço prestado.

7.0 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as Centrais Elétricas de Santa Catarina – CELESC pelo suporte a este trabalho.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A.M. Leite da Silva et al. "Optimum Load Shedding Strategies in Distribution Systems". IEEE Porto Power Tech Conference, Set. 2001.
- [2] A. Dimitrovski e R. Ačkovski, "Probabilistic Load Flow in Radial Distribution Networks", IEEE Proceedings – Transmission and Distribution Conference, Sept. 1996, pp. 102-107.
- [3] A.M. Leite da Silva e V.L. Arienti, "Probabilistic Load Flow by a Multilinear Simulation Algorithm", Proc. IEE, Vol. 137, Pt. C, No. 4, July 1990, pp. 276-282.
- [4] B. Borkowska, "Probabilistic Load Flow", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-93, No. 3, May/June 1974, pp. 752-759.
- [5] R.N. Allan et al., "Probabilistic Analysis of Power Flows", Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, Dec. 1974, pp. 1551-1556.
- [6] A.M. Leite da Silva, "Métodos Probabilísticos para Avaliação de Índices de Segurança em Sistemas de Potência", IV CBA – Congresso Brasileiro de Automática, Campinas – SP, Set. 1982, pp. 508-513.
- [7] R.N. Allan e A.M. Leite da Silva, "Probabilistic Load Flow using Multilinearization", Proc. IEE, Pt. C, Vol. 128, No. 5, Sep. 1981, pp. 280-287.
- [8] A.B. Knolseisen e J. Coelho, "Improvement of the Voltage Profile in Distribution Systems using Load Balancing and Probabilistic Load Modeling", IEEE/PES T&D 2004 Latin America, São Paulo, SP, Nov. 2004a.
- [9] A. Soares e L. M. V. G. Pinto, "Uma Nova Metodologia para Análise e Controle em Sistemas de Distribuição", 2o. Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Palneamento e Exploração de Redes de Distribuição de Energia, LAB'93, Cidade do Porto, Portugal, 1993.
- [10] A.B. Knolseisen e J. Coelho, "Modelagem Probabilística da Variação da Carga em Fluxo de Potência de Sistemas de Distribuição", CBA 2004 – XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado, RS, Set. 2004b.
- [11] P. Wang e R. Billinton. "Optimum load-shedding technique to reduce the total customer interruption cost in a distribution system". IEE Transmission and Distribution, Vol. 147, Jan. 2000, pp. 51-56.
- [12] A.M. Leite da Silva et al. "Optimum Load Shedding Strategies in Distribution Systems", IEEE Porto Power Tech Conference, Set. 2001.
- [13] M.M. Adibi e D.K. Thorne. "Local load shedding", IEEE Trans., 1988, pp. 1220-1229.