SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GAT 10
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

DEFINIÇÃO DA MODELAGEM DA CARGA DA LIGHT E SEU IMPACTO NA ANÁLISE DE GRANDES PERTURBAÇÕES

Carlos Eduardo Vizeu Pontes (*) **João Carlos de Oliveira Aires**
Henrique de Oliveira Henriques **Wanda Beatriz Massiére y Corréa**

RESUMO

O artigo descreve a seqüência de ensaios, manobras operativas e simulações realizadas em subestações distribuidoras da LIGHT com o objetivo de modelar a representação da carga a ser considerada em estudos de estabilidade dinâmica. As medições realizadas em campo foram comparadas com outras medições feitas em laboratório - modelo reduzido - e com simulações em programa digital. Destaca-se também a elevada participação dos motores de indução na composição das cargas residenciais.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem de Carga, Manobras em Subestações, Medição, Estabilidade Dinâmica

1.0 - INTRODUÇÃO

Dentre os estudos desenvolvidos nos órgãos responsáveis pelo planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional Brasileiro - SINB, destacam-se os relacionados com a implantação de diversos esquemas envolvendo cortes de carga. O objetivo destes esquemas é aumentar os limites de intercâmbio de potência entre áreas, salvaguardando o sistema diante da ocorrência de determinadas situações. Estas situações, muitas vezes não identificadas na fase de planejamento, são decorrentes de atraso de obras, razões de otimização energética, etc.

O comportamento do sistema elétrico diante das situações de emergência é influenciado por diversos fatores, entre eles, a modelagem da carga com relação às variações de tensão que ocorrem durante as perturbações. Assim, a correta modelagem da carga, é fator importantíssimo nos estudos dos esquemas de controle de emergência, os quais possibilitam: a operação do sistema com menores margens de erro, a melhor representação das restrições de operação e a melhor exploração dos recursos sistema.

Para obter um modelo de carga capaz de representar as peculiaridades específicas do sistema, a LIGHT, com o apoio a UFF realizou uma seqüência de ensaios, manobras e estudos, cujo ponto de partida foi o levantamento das características das cargas das seguintes subestações:

- SE 138/13,8 kV, 3 x 40MVA, Cachambi –Localizada na Zona Norte e com carga comercial
- SE 138/13,8 kV, 3 x 20MVA, Vila Valqueire – Localizada na Zona Oeste e com carga residencial
- SE 138/13,8 kV, 2 x 20MVA, ZIN – Localizada na Zona Industrial de Santa Cruz, e com carga industrial

2.0 - DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

A seqüência de estudos para a modelagem da carga desenvolveu-se em 4 etapas:

2.1 Ensaios em subestações

Foram realizados ensaios em 3 subestações com predominâncias de carga Residencial, Industrial e Comercial. Esses ensaios visaram a determinação da variação de potência para uma variação forçada da tensão. A variação da tensão foi obtida a partir de manobras operativas em subestações com três transformadores 138/13,8 kV (Cachambi e Vila Valqueire) e com dois transformadores 138/13,8 kV (ZIN).

- inicialmente um transformador foi colocado em vazio com o tap ajustado no limite superior da faixa; um segundo

(*) LIGHT SESA, Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2211-7804 – Email: carloseduardo.vizeu@light.com.br

transformador ficou atendendo 2/3 da carga com o tap ajustado na condição de tap mínimo.
- execução de manobra na SE para permitir a operação em paralelo dos transformadores
- restabelecimento das condições normais de operação.

2.2 Avaliação dinâmica em programa de estabilidade

Cada um dos ensaios em subestações foram reproduzidos em simulação dinâmica no programa ANATEM para a obtenção da modelagem ZIP + Motores de Indução

2.3 Modelo Reduzido

Os resultados da simulação dinâmica forneceram subsídios para a definição de um conjunto de cargas resistivas, indutivas e de motores consideradas no modelo reduzido montado para cada uma das subestações. Os resultados da simulação em laboratório serviram para validar os resultados das simulações.

2.4 Classificação das Subestações

De posse dos resultados obtidos em 2.1, 2.2 e 2.3 foi estabelecida uma modelagem padrão para todas as subestações da LIGHT e analisado o impacto em grandes perturbações causadas por contingências no sistema supridor da área da Área Rio.

3.0 - CARACTERÍSTICAS DAS SUBESTAÇÕES

3.1 Fator de Potência

A subestação Cachambi atende uma região com forte predominância de cargas comercial com um fator de carga médio de 84,5% e demanda de cerca de 63 MVA

Tabela 1 Fator de potência da carga – VVQ e ZIN

VVQ - DIA ÚTIL			SAB	DOM / FER
04h	15h	22h	22h	04h
0,85	0,84	0,89	0,88	0,84
ZIN - DIA ÚTIL			SAB	DOM / FER
04h	15h	22h	22h	04h
0,93	0,93	0,95	0,96	0,94

3.2 Curvas de Carga

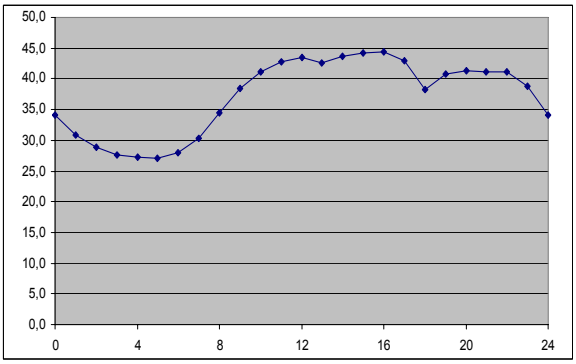
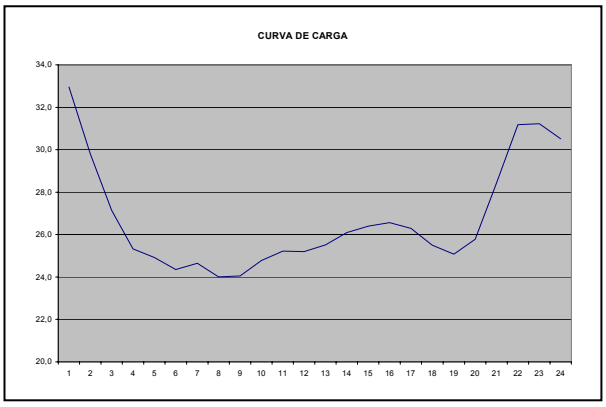
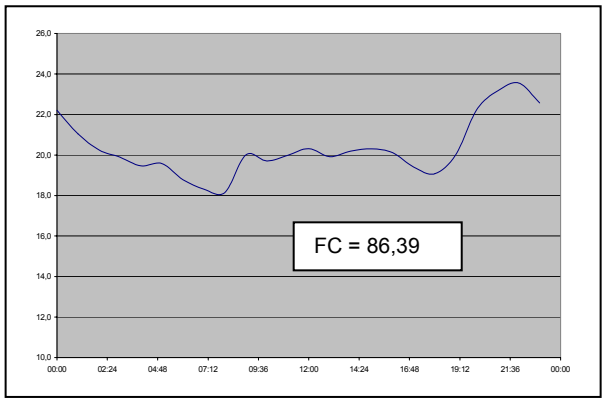


Figura 1 – Curvas de carga da SE Cachambi (





Figuras 2 e 3 – Curvas diárias das SEs Vila Valqueire (direita) e ZIN (esquerda)

4.0 - MANOBRAS OPERATIVAS

A título de ilustração apresenta-se a seguir as manobras de paralelismo efetuadas na SE Vila Valqueire que possui três transformadores de 20 MVA instalados e localiza-se na Zona Oeste da Cidade do Rio de Janeiro. Conforme ressaltado em 2.2 possui também uma acentuada característica residencial, ficando, inclusive, localizada dentro de um condomínio residencial de proporções semelhantes a um bairro típico de classe média.

O equipamento blindado de 13.8 kV (ou simplesmente blindada), da subestação possui um esquema de automatismo que, em caso de defeito em um dos transformadores, efetua o desligamento do transformador defeituoso e transfere sua carga para os transformadores remanescentes.

O objetivo do ensaio foi a execução de uma seqüência de manobras para verificar o desempenho da carga face a uma pequena perturbação de tensão no barramento de 13,8 kV desta SE. O ensaio foi realizado em 28/06/2006.

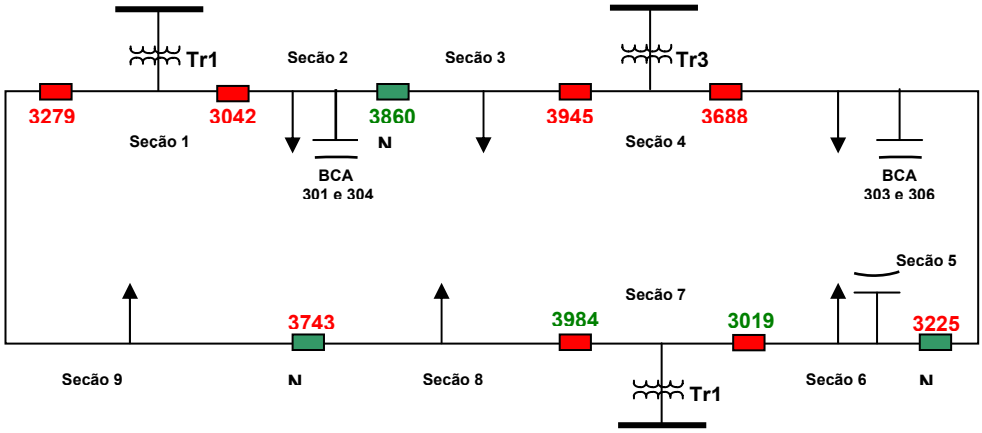


Figura 4 Diagrama simplificado da SE Vila Valqueire.

4.1 <u>Seqüência de Ações e Manobras Planejadas</u>

A seqüência de manobras planejadas para o ensaio de paralelismo dos transformadores TR1 e TR2 da SETD Vila Valqueire, foram:

a) Instalação dos medidores RMS na Seção 1 e Seção 7 da blindada, em paralelo os registradores eletrônicos de potência REP1 e REP2 e medidores de energia ativa e reativa.

b) Desligamento dos bancos de capacitores 301 e 304 associados ao trafo TR1 e desligamento dos bancos de capacitores 302 e 305 associados ao trafo TR2.

c) Retirada do automatismo entre os disjuntores 3279 e 3743. Fechamento manual do disjuntor 3743 e abertura do disjuntor 3279. Neste momento ocorrerá a transferência de parte da carga do trafo TR1 para o trafo TR2.

d) Fechamento manual do disjuntor 3860. Neste momento ocorrerá a transferência da outra parte da carga do trafo TR1 para o trafo TR3 pelo Esquema de Automatismo da blindada, que abrirá o disjuntor 3042. O trafo TR1, então, ficará em vazio. Este instante está indicado na Figura 5 como instante t1. Observe-se que após o instante t1 os transformadores TR2 e TR3 dividem metade da carga da SE.

e) Desligamento do Regulador Automático de Tensão do trafo TR2 e atuação no OLTC, manualmente, elevando o tap do transformador TR2 para a posição máxima permitida. Durante esta operação a tensão no secundário do trafo TR2 irá se reduzir até o valor mínimo permitido de 13.0 kV. Esta redução, por steps, pode ser observada na Figura 5 entre os instantes t3 e t4.

f) Desligamento do Regulador Automático de Tensão do trafo TR1 e atuação no OLTC, manualmente, elevando o tap do transformador TR1 para a posição máxima. Durante esta operação a tensão no secundário do trafo TR1 irá se elevar até o valor máximo de 15 kV. Este aumento, por steps, pode ser observado na Figura 5 também entre os instantes t3 e t4.

g) Fechamento do disjuntor 3279, paralelando os trafos TR2 e TR1. Este instante está indicado na Figura 5 como instante t4. A tensão secundária de ambos os trafos, por sua vez, ficará num valor intermediário entre os valores anteriores ao instante t4 (valores em t4-). A partir deste instante, então, as condições para a apuração da variação da carga com a tensão estão atendidas.

h) Abertura do disjuntor 3279. Este instante está indicado na Figura 5 como instante t5. Com esta manobra a tensão sofre, instantaneamente, uma variação ΔV, conforme pode ser observado na figura. Simultaneamente, a potência ativa sofre uma variação ΔP devido, exclusivamente, à variação de tensão.

i) Religamento do Regulador Automático de Tensão dos trafos TR1 e TR2. Este instante está indicado na Figura 5. como instante t6. Do instante t6 ao instante t7, tanto o trafo TR1 (em vazio) quanto o trafo TR2 (com metade da carga da SE) irão corrigir a tensão secundária para a tensão de ajuste do período de carga. Do instante t7 ao instante t8, as tensões dos três trafos estarão ajustadas com o mesmo valor.

j) Religamento dos bancos de capacitores 301 e 304 associados ao trafo TR1. A variação de tensão devida ao religamento destes bancos de capacitores não está representada na Figura 5.

k) Religamento dos bancos de capacitores 302 e 305 associados ao trafo TR2. A variação de tensão devida ao religamento destes bancos de capacitores não está representada na Figura 5, embora possa ser registrada pelos medidores instalados.

l) Recomposição do automatismo entre os disjuntores 3279 e 3743.

m) Fechamento dos disjuntores 3279 e 3042. Este instante está indicado na Figura 10.6 como instante $\mathbf{t_8}$. A partir deste instante o trafo TR1, que estava em vazio, passa a assumir 1/3 da carga da SE. A partir do instante $\mathbf{t_8}$ até o instante $\mathbf{t_9}$, os respectivos reguladores de tensão, irão promover a comutação dos tapes até que a tensão secundária atinja novamente a tensão de ajuste do período de carga.

n) Fim do período de ensaio e liberação da SE para a operação normal, instante $\mathbf{t_9}$..

4.2 Eventos críticos

Evento 1. Fechamento manual do disjuntor 3860. Neste momento ocorrerá a transferência da outra parte da carga do trafo TR1 para o trafo TR3 pelo Esquema de Automatismo da blindada, que abrirá o disjuntor 3042. O trafo TR1, então, ficará em vazio. Este instante está indicado na Figura 5 como instante t1. Note que neste instante a tensão do trafo T1 sofre uma elevação e a potência cai a zero. No trafo T2, a tensão sofre uma redução e a potência sofre uma elevação.

Evento 2. Fechamento do disjuntor 3279, paralelando os trafos TR2 e TR1. Este instante está indicado na Figura 5 como instante t4. A tensão secundária de ambos os trafos, por sua vez, ficará num valor intermediário (14.2 kV).

Evento 3. Abertura do disjuntor 3279. Este instante está indicado na Figura 5 como instante t5. Com esta manobra a tensão sofre, instantaneamente, uma variação ΔV, conforme pode ser observado na figura 5. Simultaneamente, a potência ativa sofre uma variação ΔP devido, exclusivamente, à variação de tensão. Esta redução pode ser observada no instante t5

4.3 Cronologia

- **13:07 h:** é desfeito o paralelo para que o Trafos 1 e 2 voltem às tensões de aproximadamente15kV e 13,2kV, respectivamente.
- **13:11h:** os Trafos 1 e 2 são colocados novamente em paralelo, a fim de provocar o degrau de tensão positivo no Trafo 2 (**Evento 2**)
- **13:20h:** é novamente desfeito o paralelo entre os Trafos 1 e 2, provocando um degrau de tensão negativo no Trafo 2 (**I**

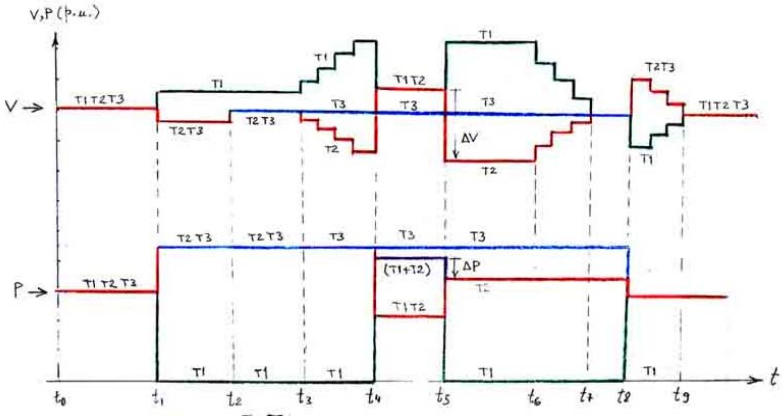


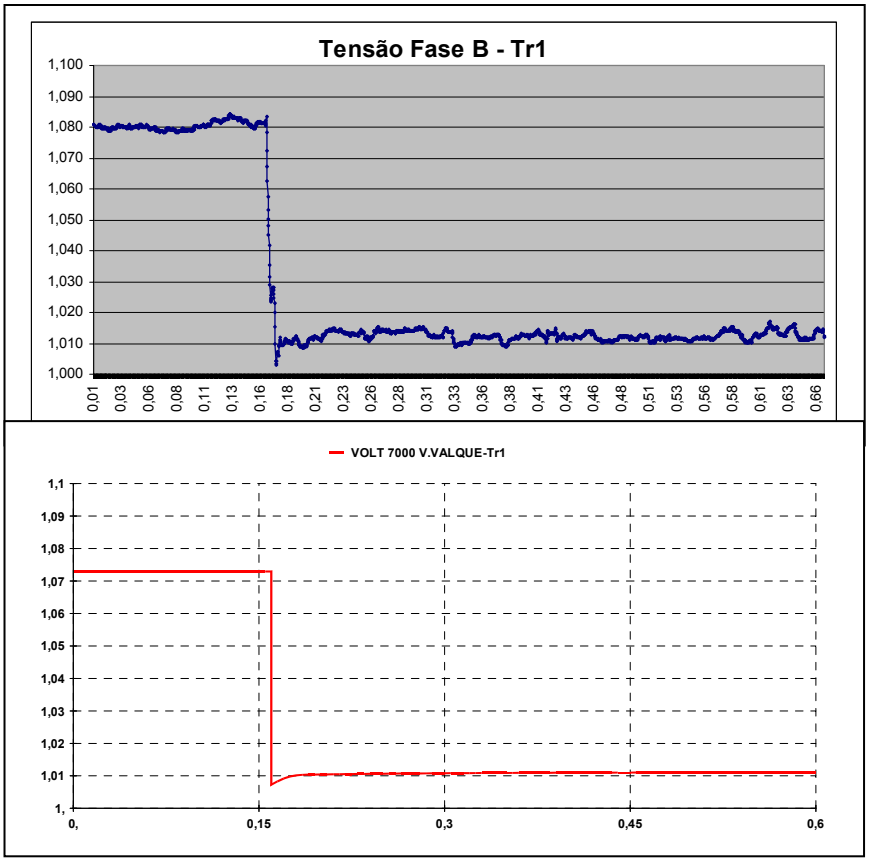
Figura 5 Seqüência dos ensaios

5.0 - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS

A reprodução do comportamento das grandezas medidas foi feita através de simulações dinâmicas e permitiu o estabelecimento de uma modelagem pautada na participação dos motores de indução (MI). Utilizando-se parâmetros típicos MI, conforme Van Cutsen e Praba Kundur (1) em seus livros, obteve-se as figuras 7 e 9. Os gráficos a seguir mostram as grandezas medidas e as simuladas, com 30% carga estática (75% Zcte) + 70% motor de indução. A análise abordou também percentuais de motores de indução (MI) de 40%, 50% e 60%, sendo que as de 70% aquelas que melhor representaram a carga real medido no ensaio. Analise semelhante para as demais SEs (Cachambi e ZIN) indicaram os resultados da tabela 3.

Tabela 3 Modelagem das Cargas

Tipo	Subestação	MI	Z cte.
Residencial	Vila Valqueire	70%	30%
Comercia	Cachambi	60%	30%
Industrial	ZIN	70%	30%



Figuras 6 e 7 Tensão medida no trafo 1 (acima) e tensão simulada (abaixo) - intervalo 13:07h - 13:20h

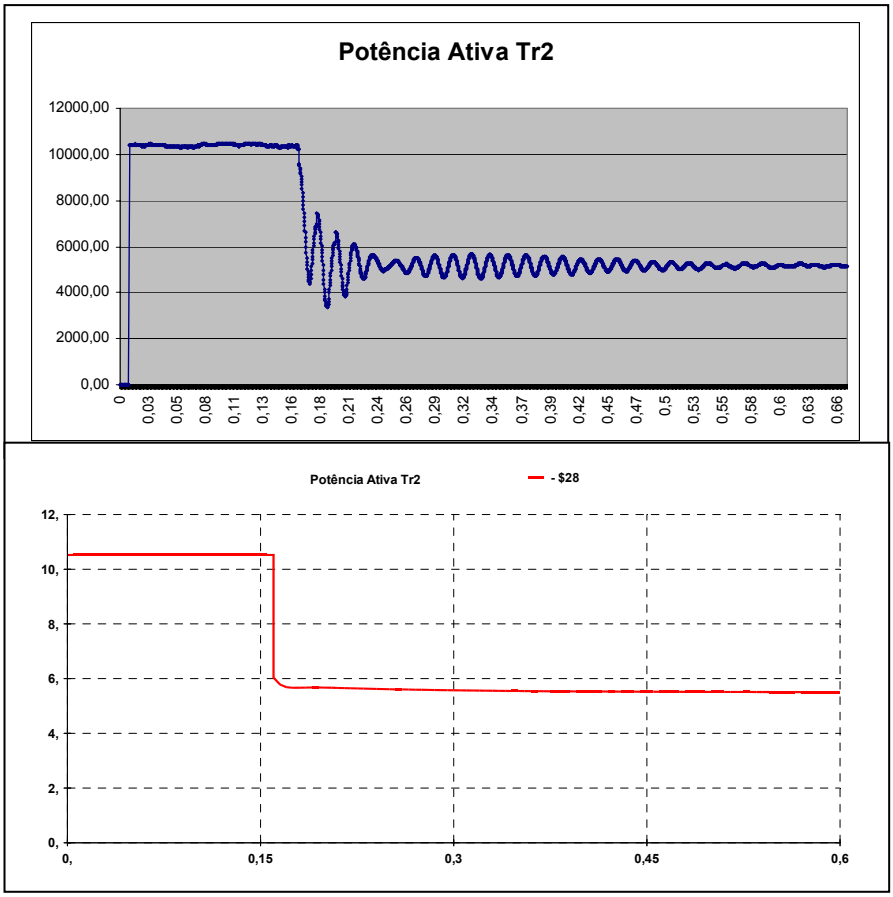


Figura 8 e 9 Potência ativa medida (acima) e simulada (abaixo) no trafo 2 - intervalo 13:07h - 13:20h

6.0 - SIMULAÇÃO DE GRANDES PERTURBAÇÕES

6.1 Classificação das Cargas

Basicamente, os componentes da carga podem ser divididos em grupos, tais como:

- Motores – pequenos (uso residencial até aproximadamente 2,5 HP); médios (uso comercial, industrial e rural, entre 2,5 e 50 HP) e grandes (uso industrial, acima de 50 HP).
- Iluminação – incandescente (maior utilização na classe residencial) e de descarga (classes comercial, industrial e iluminação pública).
- Equipamentos com potência constante – televisões, computadores e outros aparelhos eletrônicos, cuja participação na curva de carga e na demanda diária é considerada de pouca relevância, conforme a figura 10, obtida por pesquisa de posses e hábitos de consumo.
- Equipamentos com impedância constante – chuveiros, aquecedores, ferros elétricos, fornos, etc

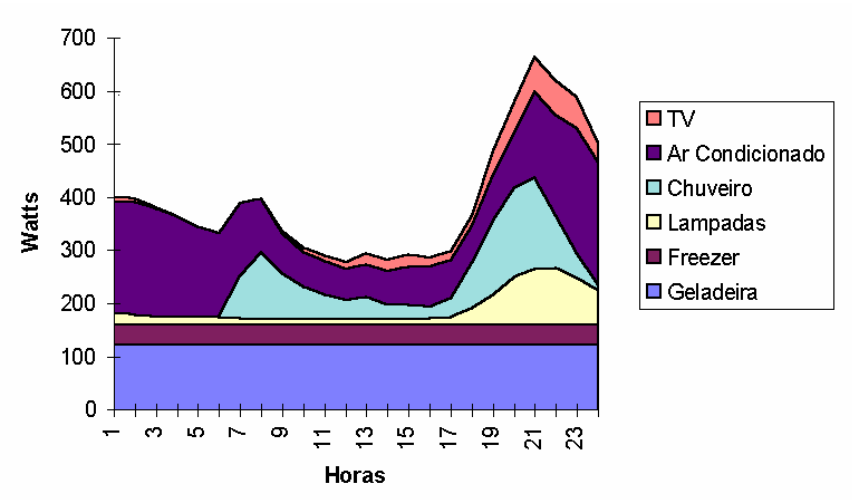


Figura 10 Caracterização da curva de carga pelo uso final

As cargas, historicamente também vem sendo classificadas de acordo com suas atividades finais, como: Residencial; Comercial / Serviços; Industrial; e Rural.

A partir dessas classificações e do conhecimento da natureza da carga do sistema LIGHT, é possível elaborar uma classificação das subestação levando em conta o grau de pertinência aos conjuntos formados pelas características que mais se assemelham às SEs Vila Valqueire, Cachambi e ZIN.

6.2 Simulações Efetuadas

Para as simulações efetuadas, utilizou-se o caso do PAR – Plano de Ampliações e Reforços, elaborado pelo ONS, ciclo 2006-2008, para abril de 2007, sendo necessário inserir os dados de motores de indução nos programas utilizados (ANAREDE e ANATEM). As simulações efetuadas para a avaliação do desempenho dinâmico do sistema tanto em casos de instabilidade angular como em situações de colapso de tensão, foram:

- Curto circuito aplicado no terminal de um dos circuitos do tronco 765 kV Itaberá / Tijuco Preto, provocando a abertura deste circuito. Esta contingência provoca uma instabilidade angular com conseqüências para a Área Rio de Janeiro/Espírito Santo, dependendo do cenário de geração considerado. SIMULAÇÃO 1
- Curto circuito nos terminais das linhas de transmissão em 500 kV Adrianópolis / São José e Angra / São José, com conseqüente abertura e perda do suprimento ao barramento de 500 kV da subestação de São José. Esta contingência envolve perda de importantes linhas de suprimento da Área Rio de Janeiro/Espírito Santo, provocando sobrecargas em linhas e transformadores, bem como afundamento de tensão. SIMULAÇÃO 2

As simulações foram feitas usando-se a representação da carga com modelo estático (ZIP) e com a introdução de modelagem de motores de indução na carga da LIGHT, a fim de comparar o desempenho destas duas condições. Uma vez definidos os parâmetros típicos de motores e sua participação dentro das classes de carga, estes dados foram introduzidos no caso de referência, que foi novamente ajustado. Este novo ajuste deve-se ao fato de que a carga ativa será a mesma (ou bem próxima) do caso inicial, visto que o tipo de motores, a quantidade e o carregamento são dados de entrada no programa. Porém, a carga reativa consumida pelos motores de indução será uma resposta do modelo usado e do ponto de operação do caso, ocorrendo valores diferentes dos inicialmente estimados

Como pode ser observado na figura 11, o evento não provoca alterações significativas nos níveis de carregamento e tensão nas barras da área, porém verifica-se maior amortecimento no caso com a representação dos motores de

indução. Na simulação 2 (figura 12) observa-se uma diferença significativa nos valores finais de carregamento e tensão entre os casos com e sem a representação de motores de indução

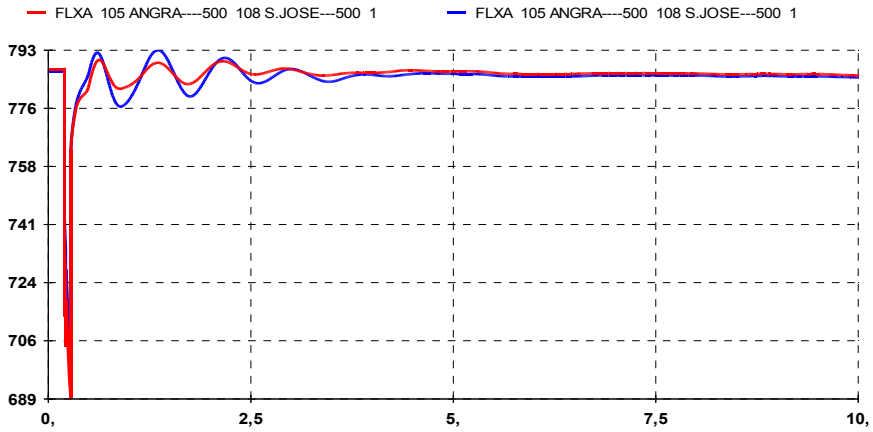


Figura 11 Simulação 1 – Tensão em São José 500 kV

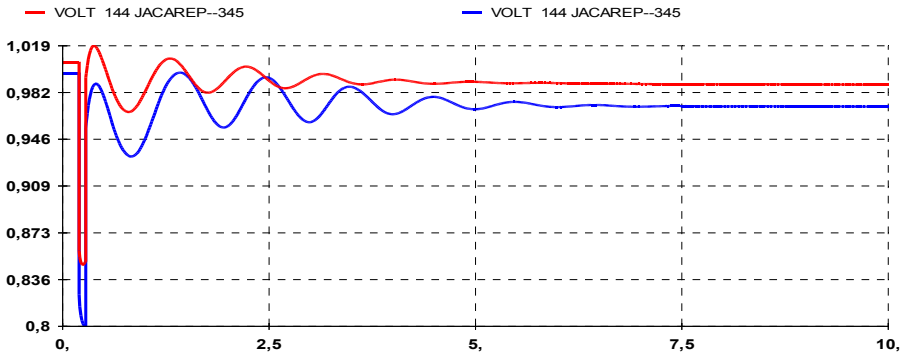


Figura 12 Simulação 2 – Tensão em Jacarepaguá 345 kV

7.0 - CONCLUSÕES

1) A partir dos resultados das medições e simulações em programa de estabilidade e em modelo reduzido, obteve-se uma representação da carga nas três subestações ensaiadas que foram extrapoladas para as demais subestações da LIGHT. Para a participação de motores de indução dentro da carga total de cada classe de consumo foi considerado o percentual que varia entre 50 e 70% da carga total de cada subestação, O restante da carga de cada subestação foi modelado como impedância constante tanto para a parte ativa como para parte reativa. É interessante ressaltar o aumento da participação de motores de indução na classe residencial.

2) Pelo fato de os ensaios terem sido realizados durante o dia, onde não pode ser medido o impacto da iluminação e de equipamentos eletrônicos como as televisões. Considera-se que os resultados do trabalho são válidos apenas para estudos do sistema para as condições de carga média. Uma constatação significativa foi a de que as cargas residenciais possuem um elevado percentual de motores de indução. Esta indicação pode ser também observada nas curvas de carga obtidas por declaração de posse em PPH (Figura 10).

4) A fim de se observar o desempenho dinâmico do sistema tanto em casos de instabilidade angular como em situações de colapso de tensão, foram realizadas duas simulações típicas de contingências na área Rio usando-se a representação da carga com modelo estático (ZIP), conforme representado nos estudos do Sistema Interligado Nacional e com a introdução de modelagem de motores de indução na carga da LIGHT, a fim de comparar o desempenho destas duas condições.

4) Conforme observado na Simulação 1, para pequenas variações de freqüência e tensão (normalmente em torno de 5%), o modelo proposto apresenta desempenho ligeiramente mais satisfatório. Isso pode ser verificado pelo melhor amortecimento das oscilações de tensão e potência. Porém para grandes excursões de tensão e/ou freqüência (Simulação 2), o modelo proposto apresenta um menor afundamento na tensão nos primeiros instantes da simulação.

5) Recomenda-se o prosseguimento das investigações sobre a modelagem da carga das subestações da LIGHT. Os principais pontos a serem enfocados em futuras avaliações são:

a) **Modelagem Geral.** Diante dos resultados apresentados nas simulações verifica-se a necessidade de melhor representar a carga de empresas distribuidoras, visto que diante de um evento no Sistema Interligado a carga representa o fator decisivo entre uma situação de blecaute ou corte excessivo de carga.

b) **Modelagem para a condição de carga pesada.** Necessidade de novos ensaios no período noturno. Esses ensaios não foram realizados por motivo de segurança. Mas, com a experiência obtida, considera-se viável a realização de ensaios em subestações do Centro e Zona Sul.

c) **Carga residencial.** Para verificar a consistência da modelagem de motores de indução em função da renda, fator de carga e de potência, sugere-se também a realização de ensaio em SEs do Interior ou Baixada Fluminense.

d) **Classificação das subestações quanto a modelagem de carga.** Utilizar um critério embasado em Inteligência Artificial para classificar a carga das subestações não ensaiadas. Poderão ser definidos grupos homogêneos de SEs levando em conta parâmetros elétricos e sócio-econômicos.

d) **Modelo Reduzido.** Aprimoramento das análises em modelos reduzidos para uma representação mais rigorosa da carga, principalmente com relação aos motores de indução.

e) **Padrões de comportamento da carga.** Prosseguimento dos esforços de classificação dos padrões de comportamento da carga levando em conta os fatores típicos como FC e FP e outras características endógenas e exógenas.

8.0 - AGRADECIMENTOS

O artigo pautou-se em um projeto de P&D da ANEEL para o ciclo 2005/2006 e contou com o apoio das áreas de Operação, Manutenção, Proteção, Medição e Planejamento da LIGHT. Também tiveram participação importante nesse trabalho: Prof. Marcus Theodor Shilling – UFF, Prof. Marcos da Rocha Vaz – UFF, Eng. Diego Ázara – UFF (Bolsista), Eng. Jorge Antonio Areas da Silva (UFF – Laboratório de Máquinas), Eng. Álvaro Luiz de Almeida Faria (UFF – Laboratório de Máquinas), Eng. Maximino Moreira Frade - LIGHT

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) PRABA KUNDUR, B GAO. *Power System Stability and Contro*l, McGraw-Hill, Inc., 1993.

(2) PRABA KUNDUR, B GAO. *Practical Considerations in Voltage Stability* – IV SEPOPE, 1994.

(3) MASSIÈRE Y CORRÊA, W.B, *Modelagem de Carga em Empresas de Distribuição para Estudos Dinâmicos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, D46/03, IC/UFF, Niterói, Fevereiro, 2003

(4) W. B. MASSIÈRE Y CORRÊA; M. TH. SCHILLING, M. B. DO COUTTO FILHO; J. C. S. SOUZA; *Modelagem de Carga em Empresas de Distribuição para Estudos Dinâmicos*, Rio de Janeiro, IX SEPOPE, 23 a 27 de maio de 2004

(5) VALGAS, H.M., PINTO, R.G.R., FRANÇA, C., LAMBERT-TORRES, G., ALVES DA SILVA, A.P., PIRES, R.C., COSTA JR., R.A., *Electrical Load Modelling* – IV SEPOPE, May, 1994.

(6) IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance – *Load Representation for Dynamic Performance Analysis* – IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol.8, n.º2, p. 472 – 482, May 1993.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Carlos Eduardo Vizeu Pontes.
Nascido em Paraíba do Sul, Rio de Janeiro, em 17 de agosto de 1955. Graduado em Engenharia Elétrica-ênfase em Sistemas de Potência pela UFF em 1980. Cursos de pós-graduação na ABB/Westinghouse:Advanced School In Power Systems Engineering - Pensilvania-USA. Pós-graduação em Gerência de Projetos pela FGV-Rio de Janeiro. Trabalha na Light S.E.S.A. desde 1981 na área de estudos, planejamento da operação e da expansão do sistema e qualidade da energia.

João Carlos de Oliveira Aires
Nascido em Fortaleza, Ceará, em 22 de setembro de 1953. Graduado em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 1976, com Especialização em Controle de Sistemas Elétricos pelo CCSE/UFSC, Mestrado pela COPPE/UFRJ em 1982 e Doutorado em pela PUC-Rio em 2001. Trabalhou na LIGHT SESA de 1977 a 2002 e atualmente atua como Consultor e professor da UGF. jcaires@ajato.com.br

Henriques de Oliveira Henriques
Nascido no Rio de Janeiro em 25 de janeiro de 1956. Graduado em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 1978, com Especialização em Engenharia de Distribuição em 1981pela COPPE / UFRJ, Mestrado em Computação Aplicada e Automação em 1998 pela UFF, Doutorado em Engenharia Elétrica em 2003 pela COPPE / UFRJ. Trabalhou na LIGHT de 1979 a 2002 e atualmente é professor, coordenador do Laboratório de Estudos de Transmissão e Distribuição (LETD) e subchefe de DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA da UFF, onde atua como consultor e pesquisador.

Wanda Beatriz Massiére y Corréa
Nascida em Niterói, RJ em 30/11/1955. Graduada em Engenharia Elétrica pela UCP (1978) e obteve o Mestrado pelo IC/UFF (2002). Trabalhou na CERJ de 1990 a 2004 e atualmente atua no Departamento de Planejamento de Furnas. wanda@furnas.com.br