

Ensaio e Manobras Operativas para Determinação da Modelagem de Cargas de Subestações Distribuidoras

C. E. VIZEU Pontes¹, J. C. O. AIRES & H. O. HENRIQUES²

Abstract - O artigo apresenta os procedimentos de ensaios e modelagens, bem como resultados obtidos para a representação da carga das subestações distribuidoras da LIGHT (138/13,8kV). Os resultados das medições efetuadas durante manobras nas subestações são comparados com as simulações dinâmicas e avaliações em modelos reduzidos (em Laboratório). Essas comparações permitiram a validação do processo e dos resultados. De posse dos modelos de carga obtidos para subestações representativas dos segmentos Residencial, Comercial e Industrial a etapa final trata da simulação do desempenho global do sistema supridor da Área Rio.

Palavras-Chaves: modelo de carga; modelo dinâmico; motor de indução; estabilidade; sistema de energia elétrica.

I. INTRODUÇÃO

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, melhor representação das restrições de operação e 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

II. MODELAGEM DA CARGA

Os modelos de carga apresentados a seguir foram utilizados na representação da carga da LIGHT

A. Modelo ZIP

Classicamente, a representação estática da carga é feita através da combinação dos três modelos citados acima, quais sejam, impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P), também conhecido como *modelo ZIP* (vide Figura 1).

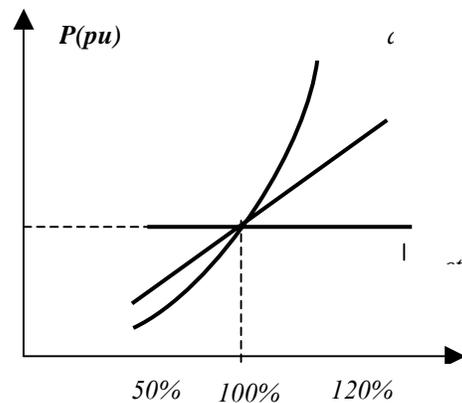


Figura 1 Representação da carga em relação à tensão

A representação da carga através da combinação linear de potência, corrente e impedância constante pode ser expressa na forma polinomial como:

$$P = k_1 Zc + k_2 Ic + k_3 Pc \quad (1)$$

$$Q = k_4 Zc + k_5 Ic + k_6 Pc \quad (2)$$

onde os coeficientes k_1 e k_4 representam a parcela de impedância constante, k_2 e k_5 a parcela de corrente constante e k_3 e k_6 a parcela de potência constante das componentes ativa e reativa da carga, sendo $k_1 + k_2 + k_3 = 1$ e $k_4 + k_5 + k_6 = 1$, ou na forma exponencial em função da tensão:

$$P = P_0 (a + bV + cV^2) \quad (3)$$

$$Q = Q_0 (d + eV + gV^2) \quad (4)$$

Quando se considera a influência da frequência no modelo da carga, um fator que representa esta dependência deverá ser multiplicado a esta expressão.

B. Modelagem Dinâmica da Carga:

O modelo dinâmico expressa a potência ativa e reativa da carga como função da magnitude da tensão e da frequência ao longo do tempo. Durante a operação em condição normal do sistema elétrico as variações de tensão e frequência são pe-

quenas e o sistema rapidamente atinge a condição de regime permanente. Para estas condições a representação da carga pelo modelo estático mostra-se satisfatória. Porém, para estudos de colapso de tensão, oscilações entre áreas e estabilidade de longo termo a representação adequada do comportamento dinâmico da carga é vital para obtenção de resultados confiáveis.

A grande participação de motores de indução na carga de um sistema elétrico leva à necessidade da representação da dinâmica desses motores em substituição a uma parcela importante da carga das subestações. A definição dessa parcela foi um dos objetivos desse trabalho.

III. DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

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

A. Ensaio 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 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

B. Avaliação Dinâmica em Programa de Estabilidade

Cada um dos ensaios/manobras em subestações foi reproduzido em simulações dinâmicas no programa ANATEM (desenvolvido pelo CEPTEL) para a obtenção da modelagem ZIP + Motores de Indução

C. 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.

D. Classificação das Subestações

De posse dos resultados anteriores foram estabelecidos padrões de modelagem das subestações da LIGHT, levando em conta características como: predominância de consumidores residenciais, comerciais e industriais, curva diária de fator de potência e curva de carga. A partir da classificação das subestações foi analisado o impacto em grandes perturbações causadas por contingências no sistema supridor da Área Rio.

IV. BASES PARA OS ENSAIOS, REGISTRO E CÁLCULO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS

A. Base Para Os Ensaio

Tendo em conta o escopo de Projeto, optou-se por obter, conforme já mencionado, as variações dinâmicas da potência ativa e reativa das subestações, forçando-se um degrau de tensão (ΔV), positivo e negativo, na barra de Média Tensão (13.8 ou 25 kV), na qual as cargas estão diretamente conectadas.

Este degrau de tensão foi obtido paralelando-se dois transformadores de potência, um com carga e outro sem carga, os quais tinham suas tensões secundárias ajustadas em valores diferentes devido à posição diferenciada dos tapes.

O paralelismo dos transformadores foi feito através de manobras de fechamento e abertura de disjuntores e as medições de tensão e corrente foram realizadas por medidores adequadamente instalados nos pontos de totalização das cargas.

A premissa considerada é que, logo após a manobra de paralelismo, pode-se desprezar a entrada ou saída de carga do sistema, ou seja, a carga no momento antes da manobra será a mesma alguns segundos após a mesma.

O enfoque da pesquisa foi o período transitório dinâmico e não o período transitório eletromagnético, embora o medidor pudesse registrar também este último.

É importante destacar também que, embora muito parecidas, as variações de potência ativa e reativa diante do degrau de tensão não foram exatamente as mesmas nas três fases.

Isto se deve ao fato de, no nível da Média Tensão, as cargas nas três fases serem diferentes, tanto quantitativamente (as correntes em cada uma das três fases não têm o mesmo valor) quanto qualitativamente (motores de indução, retificadores, lâmpadas de iluminação, etc, podem estar, para aquele ponto do sistema e para aquele momento, desigualmente presentes em cada uma das três fases).

A Figura 7 ilustra o arranjo típico das subestações ensaiadas e a Figura 8 ilustra o gráfico de tensão que se esperava reproduzir com o ensaio (não constando do gráfico os transitórios eletromagnéticos).

B. Registro Das Grandezas

O aparelho utilizado para o registro das grandezas elétricas foi o RMS MARH-21 (modelo 993), adquirido com recursos do projeto. Trata-se de um medidor e registrador de grandezas em tempo-real para sistemas elétricos. Como este tipo de equipamento pode ser utilizado em diferentes situações e para diferentes finalidades, torna-se necessário adaptar o registrador a cada situação e finalidade que se deseja, através da programação apropriada de seus parâmetros.

Um exemplo de parametrização utilizada nos ensaios é mostrada na Figura 2. que reproduz a tela do aparelho com os valores dos parâmetros para a captura dos grandezas elétricas do ensaio realizado.

Figura 2 Parametrização do Medidor RMS

C. Cálculo das Potências Ativa e Reativa Com Base Nas Correntes e Tensões

De posse das leituras de corrente e tensão verificadas durante os eventos induzidos, foram traçados gráficos, no programa EXCEL, para interpretação dos resultados. As análises iniciais destes gráficos mostraram incoerências de comportamentos da potência face a variação de tensão. Estas incoerências foram também confirmadas pelos resultados das simulações no programa ANATEM.

Analisando-se a massa de dados, observou-se que as medições de corrente e tensão durante os eventos são feitas em intervalos de $1/64$ ciclos, ou seja, para cada ciclo são feitos 64 registros de tensão e corrente, durante 40 ciclos (sendo 10 ciclos antes do evento e 30 ciclos após o evento) totalizando 665 ms.

Inicialmente pensou-se em manter o fator de potência constante durante todo o evento. As medições de fator de potência, que ocorrem apenas a cada minuto, provocaram desvios significativos na potência reativa e conseqüentemente na potência total, evidenciados nas análises das curvas de potência quando comparadas com as curvas de variação de tensão.

Para resolver este problema foram traçadas as curvas de tensão e corrente das três fases dos transformadores 1 e 2 da SE Cachambi para cada evento, com detalhe dos dois primeiros ciclos destacados na Figura 3. O fator de potência foi então calculado a partir da defasagem entre a curva de tensão e corrente, no momento em que estas cruzam o eixo no sentido ascendente.

A Figura 6 mostra os registros de tensão e corrente durante o Evento 2 (Ver definição do Evento 2 no item V-A, adiante), no qual se observa o momento (meio do gráfico) em que o trafo 2, em vazio, é paralelo com o trafo 1, assumindo parte da carga da SE.

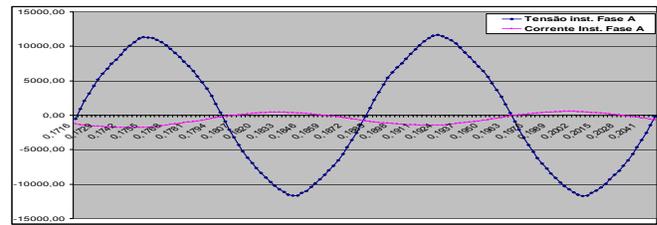


Figura 3 Detalhe dos valores de tensão e corrente instantâneos referentes aos transformadores ensaiados, durante os dois ciclos iniciais do evento.

O resultado deste processo pode ser visto nas Figuras 4 e 5, que mostram os valores do fator de potência da Fase A, para cada transformador, calculado a partir da metodologia anteriormente descrita. Como isto ocorre a cada ciclo, considerou-se este fator de potência constante ao longo de cada ciclo. Ou seja, para cada 64 pontos de medição (aproximadamente 16,6 ms) que compõe um ciclo, o fator de potência permanece inalterado.

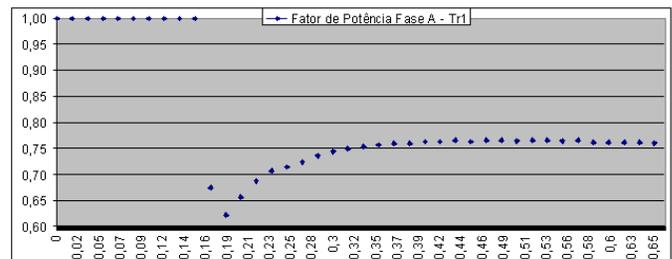


Figura 4 Fator de Potência do Trafo 1 da SE Cachambi, durante o evento.

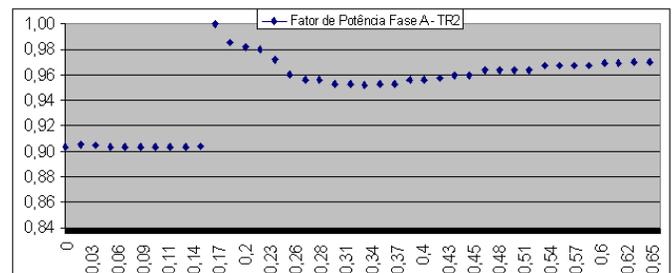


Figura 5 Fator de Potência do Trafo 2 da SE Cachambi, durante o evento.

A diferença final apresentada entre as curvas de fator de potência dos transformadores 1 e 2 deve-se a diferença de tensão imposta a estes equipamentos (tapes em posições diferentes), que resulta em elevada circulação de reativo entre os dois transformadores.

A partir destes dados foram traçadas novas curvas de cada transformador para o Evento 2, em substituição as curvas calculadas com fator de potência constante.

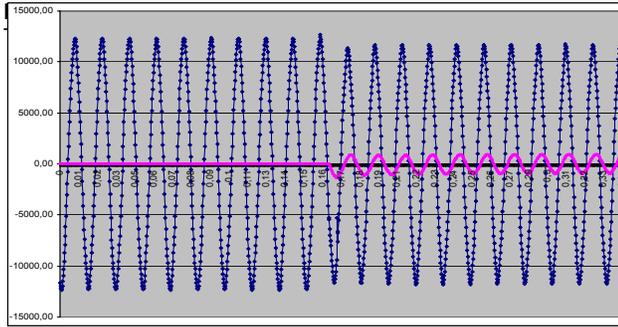


Figura 6 Valores de Tensão e Corrente Instantâneas Referentes ao Transformador 2 da SE Cachambi Durante o Evento.

V. 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 mencionado em III-A e III-B, esta área possui 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.

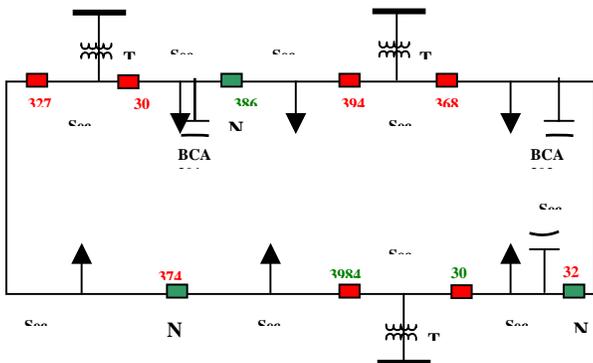


Figura 7. Diagrama simplificado da SE Vila Valqueire

A. 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 8 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 8 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 8 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

B. Cronologia

- **13:07 h:** é desfeito o paralelo para que os Trafos 1 e 2 voltem às tensões de aproximadamente 15kV 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 (**Evento 3**)

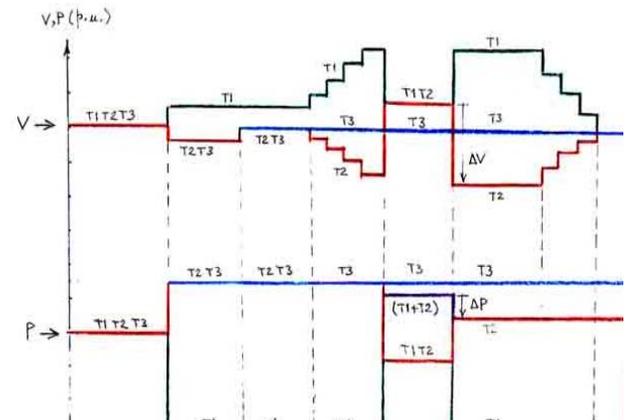


Figura 8. Seqüência dos ensaios

VI. 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 9A, 9B, 10A e 10B. Essas figuras mostram as grandezas medidas e as simuladas, com 30% carga estática (75% Zcte) + 70% motor de indução, para a subestação Vila Valqueire. 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 medida no ensaio. Análise semelhante para as demais SEs (Cachambi e ZIN) indicaram os resultados da Tabela 1.

TABELA I. MODELAGEM DAS CARGAS

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

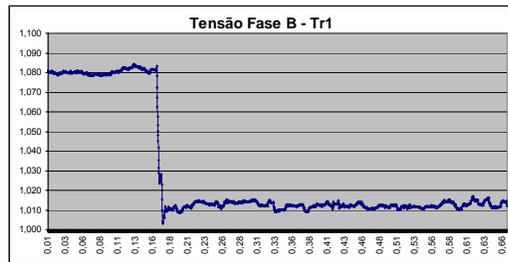


Figura 9A. Tensão medida no trafo 1

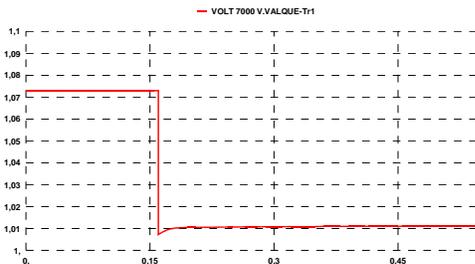


Figura 9B. Tensão simulada no trafo 1

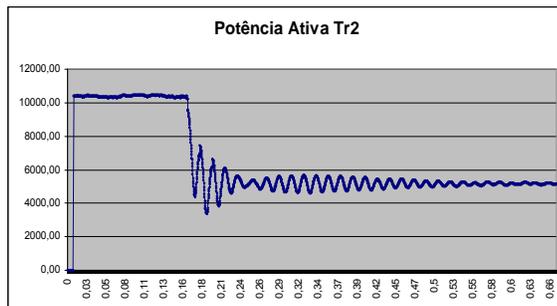


Figura 10A. Potência ativa medida no trafo 2

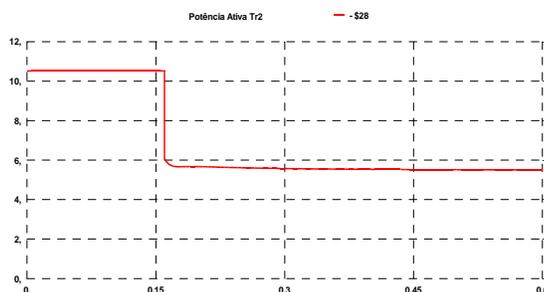


Figura 10B. Potência ativa simulada para o trafo 2

VII. O MODELO REDUZIDO

O Modelo reduzido, composto de cargas resistivas e de motores de indução foi utilizado para reproduzir o comportamento das cargas (tensão e potência) registrada pelos medidores. As figuras 11 e 12 mostram uma foto dos equipamentos utilizados e o diagrama das ligações, respectivamente.



Figura 11. Equipamentos utilizados pelo modelo reduzido

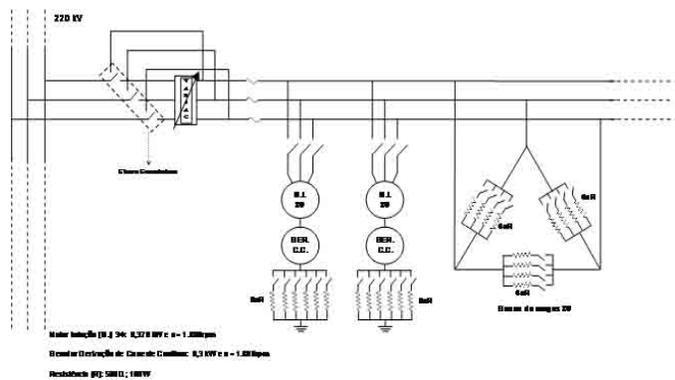


Figura 12. Diagrama do modelo reduzido

Com o objetivo de reproduzir em laboratório o comportamento das grandezas elétricas medidas e simuladas, foram aplicados ao sistema do modelo reduzido valores de ΔV e medidos os ΔP_s para diferentes combinações de $p1$ e $p3$. Os ensaios foram repetidos até encontrar os valores que melhor representam os valores do ensaio na subestação da LIGHT. Dessa forma:

$$P = p1.V^0 + p3.V^2 + p4 \quad (5)$$

\uparrow \uparrow \uparrow
P cte Z cte M.I.

VIII. SIMULAÇÃO DE GRANDES PERTURBAÇÕES

A. 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 13, obtida por pesquisa de poses e hábitos de consumo.

Equipamentos com impedância constante – chuveiros, aquecedores, ferros elétricos, fornos, etc.

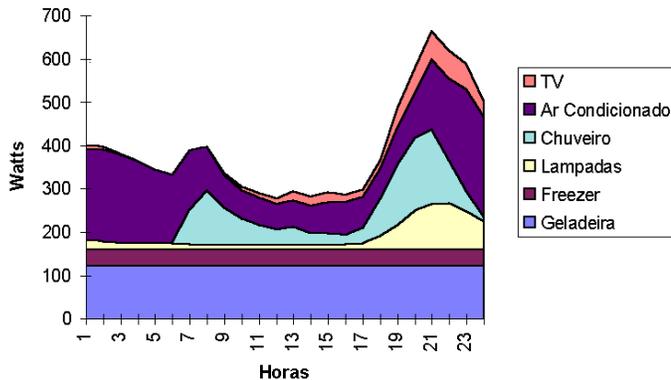


Figura 13. Caracterização da curva de carga pelo uso final

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.

B. 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. Foram utilizados também os modelos e parâmetros apresentados no Apêndice.

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 14, 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 15) observa-se uma diferença significativa nos valores finais de carregamento e tensão entre os casos com e sem a representação de motores de indução

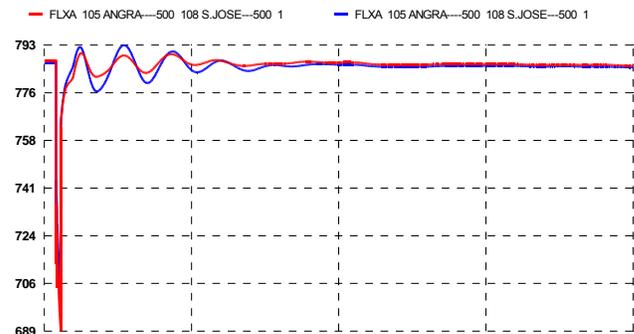


Figura 14. Simulação 1 – Tensão em São José 500 kV

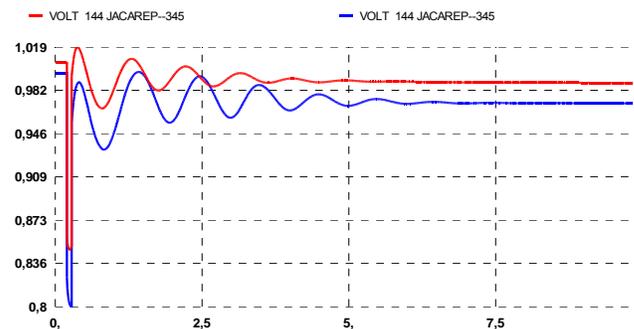


Figura 15. Simulação 2 – Tensão em Jacarepaguá 345 kV

IX. 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 13).

3) Constatou-se, a partir das medições realizadas nos ensaios, que a variação da carga (tanto ativa quanto reativa) devido à variação dinâmica da tensão, ocorreu diferentemente para cada uma das três fases do sistema. Tal comportamento poderia já ser esperado, uma vez que para cada uma das fases a carga conectada é necessariamente diferente, pois abrange uma variedade muito grande de equipamentos monofásicos ligados na Baixa Tensão. Estas cargas, ao serem refletidas para a Média Tensão (ponto em que foi instalado o Medidor RMS) revelaram que o desequilíbrio de fases e, conseqüentemente, o comportamento das grandezas elétricas, são significativos.

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.

5) Conforme observado na Simulação 1, para pequenas variações de frequência 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 frequência (Simulação 2), o modelo proposto apresenta um menor afundamento na tensão nos primeiros instantes da simulação.

6) 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.

7) Ensaios da natureza dos apresentados neste trabalho não são usuais de serem realizados no sistema elétrico real. As manobras efetuadas requereram um planejamento muito bem elaborado envolvendo pessoal de Operação e Proteção de Sistemas.

Apesar de todo o cuidado empregado, problemas inesperados acontecem - conforme aconteceram nos três ensaios realizados nas subestações selecionadas.

Justamente por ser sabido que estes problemas provavelmente ocorrerão é que, no sistema real, deve-se tomar todo o cuidado para não pôr em risco, não só, obviamente, o pessoal presente o local das manobras, como também a carga suprida pela subestação ensaiada (escolha do horários não críticos, evitar cargas nobres, etc).

Dos principais problemas verificados nos ensaios podemos citar o defeito de disjuntor de junção da subestação, que impedindo as manobra de serem realizadas (o disjuntor foi reparado no local) e o mau contato dos TPs que permitiam a normalização do arranjo da SE (a normalização atrasou muito além do estimado).

X. AGRADECIMENTOS

O artigo pautou-se no Projeto P&D LIGHT/UFF 017/2005 - MODELAGEM DAS CARGAS DO SISTEMA LIGHT PARA VARIAÇÕES DINÂMICAS DE TENSÃO, 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 Anto-

nio Areas da Silva (UFF – Laboratório de Máquinas), Eng. Álvaro Luiz de Almeida Faria (UFF – Laboratório de Máquinas), Eng. Maximino Moreira Frade – LIGHT e Eng. José Tenório Barreto Júnior, coordenador de projetos de P&D da LIGHT.

XI. REFERÊNCIAS

Livro

- [1] Praba Kundur, B Gao. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1993.

Artigos em Anais de Conferência (Publicados)

- [2] Praba Kundur, B Gao. *Practical Considerations in Voltage Stability – IV SEPOPE*, 1994.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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

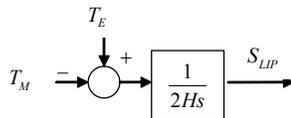
Dissertações e Teses

- [6] W. B. Massière Y Corrêa; *Modelagem de Carga em Empresas de Distribuição para Estudos Dinâmicos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, D46/03, IC/UFF, Niterói, Fevereiro, 2003

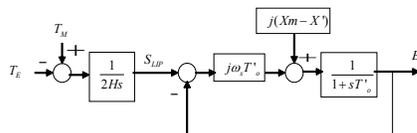
Motor	HP	Rs	Xs	Xm	Rr	Xr	Sistema
A	0 a 2,5	7,70	10,70	222,00	7,90	9,80	Residencial
B		0,10	23,00	300,00	2,00	23,00	Alimentador
C	2,5 a 25	7,80	6,50	267,00	4,40	4,90	Ind. Pequeno
D	25 a 50	3,10	10,00	320,00	1,80	18,00	Ind. Pequeno
E	50 a 100	1,60	6,30	96,00	0,90	1,70	Ind. Médio
F	> 100	1,30	6,70	380,00	0,90	17,00	Ind. Grande

XII. APÊNDICE – MODÉLO DE MOTOR DE INDUÇÃO

Tipo 1



Tipo 2



$$T_M = FAT[k_3 - k_1(1 - SLIP) + k_2(1 - SLIP)^n]$$

$$T_E = \text{Real}(E \times I^*)$$

Tipo 1 - gaiola simples sem efeito transitório

Tipo 2 - gaiola simples com efeito transitório

H - constante de inércia do conjunto motor de indução-carga mecânica, em segundos

k1, k2 e k3 - parâmetros de curva de torque de carga para motor de indução

H - expoente da curva de torque de carga para motor de indução

X' - reatância própria do enrolamento de estator, em p.u.

Xm - reatância própria do enrolamento de estator, em p.u.

X' - reatância própria do enrolamento de estator, em p.u.

E - fasor tensão através da reatância transitória X', em p.u.

I - fasor corrente de estator, em p.u.

T'o - constante de tempo do rotor a circuito aberto, em segundos

Te - torque elétrico em p. u. na base da máquina

Tm - torque mecânico em p. u. na base da máquina

ωs - velocidade síncrona, em rad/seg

FAT - constante da curva de torque de carga, em p.u.

SLIP - escorregamento do rotor (adimensional)

TABELA II PARÂMETROS TÍPICOS DOS MOTORES DE INDUÇÃO