

# Desenvolvimento de Ferramentas Computacionais de Apoio à Análise de Sistemas de Potência

David Rodrigues Parrini, Bolsista de Iniciação Científica do CNPq/PIBIC  
Tatiana Mariano Lessa Assis, Orientadora

**Resumo**--Este relatório técnico-científico apresenta o desenvolvimento de ferramentas computacionais de apoio à análise estática e dinâmica de sistemas de potência de grande porte. Inicialmente, uma ferramenta de alteração automática de carga para auxiliar no estudo estático de sistemas de potência é apresentada, possibilitando a realização de variações de carga e geração global no sistema em análise. Em seguida, é descrita a modificação de um aplicativo de simulação dinâmica no tempo visando a monitoração gráfica de medidores e do comportamento de elementos do sistema, além da redução do esforço computacional. Os algoritmos e cálculos executados pela ferramenta são descritos e exemplificados. Os desenvolvimentos foram realizados com base no software de simulação de sistemas de energia elétrica, Simulight, desenvolvido no Laboratório de Sistemas de Potência (LASPOT) da COPPE/UFRJ, como parte do projeto de Desenvolvimento de Modelos e Métodos Computacionais Aplicados à Melhoria de Segurança de Sistemas de Energia Elétrica.

## I. INTRODUÇÃO

REQUISITOS mais severos de qualidade e segurança para o suprimento de energia elétrica compõem a atual perspectiva para a operação de sistemas de potência. Relacionado a ela, o atual contexto de aumento no número de interconexões entre regiões, de introdução de novas tecnologias e de expansão para o atendimento da demanda gerada pelo crescimento econômico tem por consequência sistemas com maior complexidade e susceptíveis aos mais diversos fenômenos. Dessa forma, são necessárias ferramentas de apoio que proporcionem agilidade nos estudos e análise de redes elétricas, especialmente nos ambientes de planejamento e operação em tempo real.

Um sistema de potência é operado num ambiente sujeito a mudanças contínuas em suas cargas, despacho de geradores, além da ocorrência de distúrbios. Neste contexto, é importante avaliar diferentes pontos de operação e as perturbações que podem ocorrer. Os pontos de operação para, por exemplo, diferentes patamares de carga, definem estados iniciais de equilíbrio [1]. O conjunto dos possíveis estados para uma condição de operação segura determina a robustez do sistema. Para uma rede de grande porte, a tarefa de se avaliar diferentes patamares de carga e geração se torna árdua, uma vez que demanda tempo.

Uma vez avaliados os diferentes pontos de operação de interesse, a simulação dinâmica no tempo permite estudar a transição de um estado de equilíbrio para outro, verificando a estabilidade do sistema, a qual depende da gravidade do

distúrbio aplicado.

Um sistema seguro é aquele que atende requisitos mínimos em regime permanente e dinâmico [2]. Assim, há necessidade de se monitorar algumas variáveis do sistema, bem como a adequada atividade de alguns dos dispositivos, com a finalidade de atender as condições de qualidade e segurança exigidas antes e após uma contingência.

Esse trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de ferramentas de apoio à análise de sistemas de potência visando fornecer uma maneira ágil para se estudar diferentes cenários de carga e geração e acompanhar o comportamento em tempo de simulação de variáveis do sistema.

A Seção II descreve a metodologia do trabalho, apresentando a plataforma computacional utilizada (A), a ferramenta para alteração automática de carga desenvolvida (B) e a estratégia de programação do aplicativo de simulação dinâmica no tempo para permitir a monitoração de variáveis em tempo de simulação e torná-lo computacionalmente mais rápido. Resultados da ferramenta de alteração de carga, do método de monitoração desenvolvido e do tempo computacional ganho na simulação dinâmica são apresentados na Seção III. Finalmente, a Seção IV apresenta as conclusões do trabalho. É apresentado ainda um relatório de atividades e a avaliação do bolsista.

## II. METODOLOGIA

### A. Plataforma Computacional

A plataforma computacional utilizada [3] emprega modelagem orientada a objetos em C++ para descrever a topologia e conexões dos Sistemas de Energia Elétrica (SEE), como também os dispositivos e seus modelos matemáticos. A Fig. 1. mostra o diagrama de classes [3] que indica os relacionamentos entre objetos que descrevem parte da topologia (SEE, Área e Subestação) e alguns dispositivos elétricos, como Gerador, Carga e o Transformador de Tapa variável (LTC) [3].

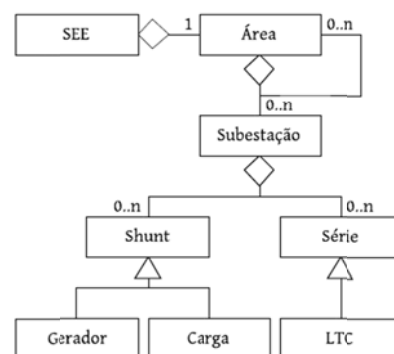


Fig. 1. Diagrama de Classes simplificado que representa um Sistema de Energia Elétrica (SEE)

O trabalho apresentado neste relatório foi apoiado financeiramente pelo CNPq.

D. R. Parrini é aluno de graduação do Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

T. M. L. Assis é professora do Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Conforme será evidenciado neste trabalho, as ferramentas desenvolvidas requerem a pesquisa sequencial através dessa estrutura para obter informações de dispositivos dos tipos Carga, Gerador e LTC do sistema.

Na plataforma, estão disponíveis aplicativos como o fluxo de potência [4], para análise estática, e a simulação no domínio do tempo, para análise dinâmica [1]. Em razão dos diferentes regimes, alguns dispositivos possuem modelos estáticos e dinâmicos distintos, que são alternados convenientemente com o tipo de aplicativo utilizado. Por exemplo, um gerador é modelado com equações algébricas na análise estática. Por outro lado, na simulação dinâmica, sua modelagem inclui um conjunto de equações algébrico-diferencial.

Os modelos de cargas e geradores possuem em comum alguns parâmetros, como a componente de potência ativa ( $P$ ), a de potência reativa ( $Q$ ), o módulo da tensão ( $V$ ) e o ângulo da tensão ( $\theta$ ). Na análise estática, apenas dois desses parâmetros são especificados, em diferentes combinações. Por exemplo, uma carga com modelo PQ terá os dois componentes da potência parametrizados e a informação da tensão deverá ser calculada pelo algoritmo de fluxo de potência.

### B. Alteração Automática de Carga

Foi desenvolvida uma ferramenta para alteração automática de carga. Essa ferramenta, totalmente integrada à plataforma computacional descrita na Seção A, permite a análise imediata de diferentes patamares de carga usualmente presentes nos sistemas elétricos (pesada, média e leve).

O aplicativo de Alteração Automática de Carga possui dois modos de funcionamento: alteração de carga relativa (percentual) e alteração absoluta. Na primeira, a alteração é realizada baseada nas informações presentes dos dispositivos, enquanto que na segunda um valor fixo e igual é somado/subtraído de cada dispositivo do sistema.

No modo de alteração de carga percentual, para uma carga qualquer do sistema, dadas suas componentes da potência originais,  $P_{original}$  e  $Q_{original}$ , e os coeficientes  $x_P$  e  $x_Q$ , que representam os percentuais de alteração, os valores finais das componentes são dados por (1) e (2). Como toda a carga do sistema sofre uma alteração de uma mesma quantidade percentual, a quantidade de carga repartida para os geradores segue a mesma proporção.

$$P_{final} = (1 + x_P) * P_{original} \quad (1)$$

$$Q_{final} = (1 + x_Q) * Q_{original} \quad (2)$$

No modo absoluto, definidos os respectivos incrementos (ou decrementos) de potência ativa e reativa,  $P_x$  e  $Q_x$  respectivamente, os valores finais das componentes são determinados por (3) e (4).

$$P_{final} = P_{original} + P_x \quad (3)$$

$$Q_{final} = Q_{original} + Q_x \quad (4)$$

Considerando  $n$  cargas do sistema, onde para uma carga  $i$  uma quantidade de potência ativa  $P_i^x$  e de potência reativa  $Q_i^x$  foi acrescentada, os totais  $P_{acrescentado}$  e  $Q_{acrescentado}$  de potência adicionada ao sistema podem ser obtidos por (5)

e (6).

$$P_{acrescentado} = \sum_{i=0}^n P_i^x \quad (5)$$

$$Q_{acrescentado} = \sum_{i=0}^n Q_i^x \quad (6)$$

Esses totais acrescentados são repartidos, então, entre os geradores do sistema, utilizando como peso a participação de cada gerador em relação à geração total do sistema, antes da alteração de carga. Assim, a participação de potência ativa  $p_P$  (reativa  $p_Q$ ) de um gerador é dada pela razão entre o valor de potência ativa (reativa) do gerador e a potência ativa (reativa) total gerada pelo sistema:

$$p_P = P_{Gerador} / P_{Sistema} \quad (7)$$

$$p_Q = Q_{Gerador} / Q_{Sistema} \quad (8)$$

Os novos valores de geração serão, portanto:

$$P_{final} = P_{original} + p_P * P_{acrescentado} \quad (9)$$

$$Q_{final} = Q_{original} + p_Q * Q_{acrescentado} \quad (10)$$

Definidas as equações para os dois modos de operação, a ferramenta de alteração automática de carga possui um algoritmo básico para cada modo. A diferença entre eles não apenas se dá pelas equações como pela forma com que a carga é repartida entre os geradores. O algoritmo básico da alteração de carga percentual é definido no Quadro 1.

```

Algoritmo Alteração Percentual
Listar dispositivos (carga e gerador)
Para cada dispositivo:
    Se o parâmetro P estiver disponível:
        Alterar parâmetro P, Eq. (1)
    Fim-Se
    Se o parâmetro Q estiver disponível:
        Alterar parâmetro Q, Eq. (2)
    Fim-Se
Fim-Para
Fim.

```

Quadro 1. Algoritmo de Alteração Percentual

Já o algoritmo básico para a alteração de carga absoluta é dado no Quadro 2.

```

Algoritmo Alteração Absoluta
Listar Cargas
Para cada carga:
    Se parâmetro P estiver disponível:
        Alterar parâmetro P, Eq. (3)
    Fim-Se
    Se parâmetro Q estiver disponível:
        Alterar parâmetro Q, Eq. (4)
    Fim-Se
Fim-Para

Listar geradores
Para cada gerador:
    Calcular participação, Eq. (7) e (8)
    Se o parâmetro P estiver disponível:
        Alterar parâmetro P, Eq. (9)
    Fim-Se
    Se o parâmetro Q estiver disponível:
        Alterar parâmetro Q, Eq. (10)
    Fim-Se
Fim-Para
Fim.

```

Quadro 2. Algoritmo de Alteração Absoluta de Carga

Note-se que a diferença entre os dois algoritmos está na repartição entre os geradores. Além disso, nos dois casos, a disponibilidade ou não de um determinado parâmetro dependerá exclusivamente do modelo adotado para o dispositivo (carga ou gerador).

### C. Monitoração de Simulação em tempo de execução

Foi desenvolvida uma ferramenta de acompanhamento da simulação dinâmica do sistema elétrico em tempo de execução. Essa ferramenta possibilita a análise da evolução do sistema ao longo do tempo. As principais funcionalidades desenvolvidas neste trabalho foram a monitoração de medidores e a automação de mensagens sobre mudança na característica de alguns dispositivos, conforme será descrito a seguir.

Para a implementação da monitoração, com o objetivo de melhorar o desempenho computacional, o aplicativo de simulação dinâmica foi modificado, de forma a separar tarefas em processos diferentes, como pode ser visto no diagrama de classes da Fig. 2. A frequência de atualização da tela do programa é controlada pelo processo de simulação, bem como as mensagens trazidas pelo aplicativo simulador.

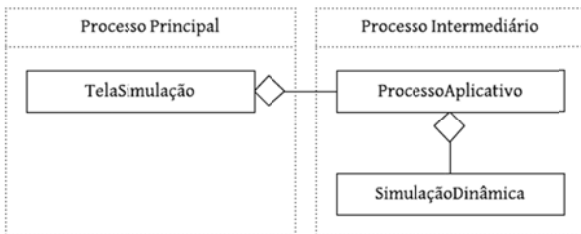


Fig. 2. Separação do aplicativo em diferentes processos para permitir a monitoração e melhora no desempenho do aplicativo.

A classe do aplicativo *SimulaçãoDinâmica* é agregada à classe *ProcessoAplicativo*, que disponibiliza informações atuais de um medidor monitorado. Essa classe, por sua vez, está agregada à *TelaSimulação*, que é a classe responsável pela interface gráfica e o gráfico de monitoração. As execuções das funções das classes *TelaSimulação* e *ProcessoAplicativo* ocorrem em processos diferentes. Com essa divisão, a tela de simulação se torna disponível para outras ações enquanto a simulação é executada, como a exibição do progresso e dados monitorados, e é atualizada numa frequência menor. Dessa forma, a simulação não é interrompida para atualizar o progresso atual na tela de simulação.

Além disso, pelo fato da plataforma computacional apresentar outros tipos de simulação dinâmica, tais como a simulação rápida e a simulação combinada [3], métodos comuns entre os diferentes aplicativos foram generalizados para permitir uma reestruturação mais concisa da simulação, como pode ser visto no diagrama de classes da Fig. 3.

A partir da nova estrutura desenvolvida para o aplicativo de simulação dinâmica, foi implementada a ferramenta de monitoração, que permite o acompanhamento de medidores e verificam mudanças importantes em dispositivos, mais especificamente a atuação de tapetes de transformadores LTC e a atuação de limitadores [1].

Procedimentos específicos controlam a forma com que um medidor, dispositivos ou controles do sistema são monitorados, bem como a frequência com que o usuário é

informado. O algoritmo básico do processo de simulação foi atualizado para o descrito no Quadro 3.

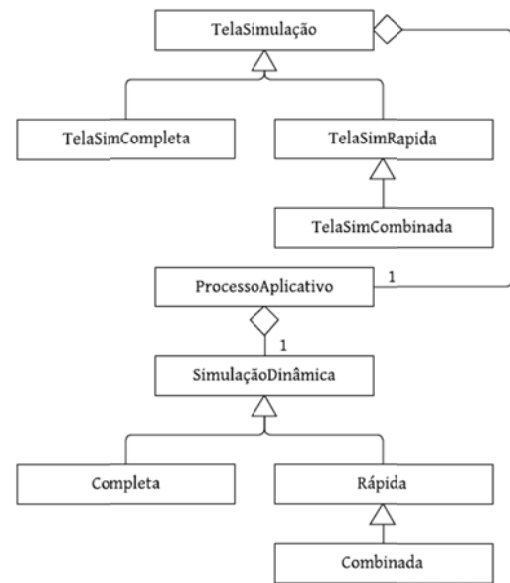


Fig. 3. Diagrama de classes detalhando a nova estrutura do aplicativo de simulação, com detalhes das telas e dos aplicativos.

```

Algoritmo Processo de Simulação Dinâmica
Inicializar Parâmetros e Controles
Listar LTCs e Limitadores
Enquanto tempoAtual < tempoFinal:
    Executar Passo de simulação
    Verificar Estabilidade
    Verificar Convergência
    Monitorar Mensagens
    Monitorar dados de Medidor
    Monitorar Atividade de LTCs
    Monitorar Atividade de Limitadores
    Atualizar Tela
    Atualizar Tempo
Fim-Enquanto
Finalizar Simulação
Fim.
  
```

Quadro 3. Algoritmo do Processo de Simulação Dinâmica

O procedimento de monitoração de dados de medidor recupera o último par instante/valor medido e disponibiliza para a tela de simulação que, por sua vez, adiciona esse ponto a um gráfico, como visto na Fig. 4, atualizado durante a simulação.

O procedimento de monitoração de atividade de transformadores LTC compara o valor do tapete no instante de tempo atual da simulação com um valor anterior armazenado. Caso esses valores sejam diferentes, a mudança é anunciada em uma listagem na parte inferior da tela de simulação da Fig. 4. O valor anterior armazenado é atualizado para o valor atual para ser usado numa futura comparação.

Também é verificada a entrada  $x_{Entrada}$  e a saída  $x_{Saída}$  de cada limitador do sistema. A condição da Eq. (11) indica que esse limitador está ativo e a informação é anunciada na tela de simulação sempre que verdadeira.

$$x_{Saída} \neq x_{Entrada} \quad (11)$$

Para evitar uma busca intensa por transformadores e limitadores na estrutura da Fig. 1 a cada passo de integração e reduzir o esforço computacional, é criada uma listagem desses elementos no início da simulação.

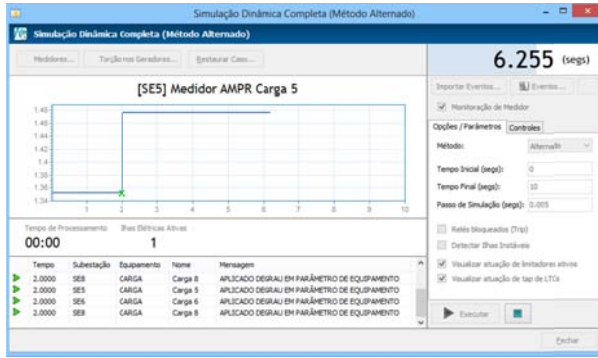


Fig. 4. Tela de simulação e gráfico de monitoração de medidor em ênfase.

#### D. Desenvolvimentos Complementares

Além das adições ao aplicativo de simulação dinâmica, ajustes foram feitos na ferramenta de análise gráfica pós-simulação. Essa ferramenta foi totalmente remodelada para permitir a visualização e comparação de dois ou mais gráficos de medidores, como pode ser visto na Fig. 5, permitir a modificação dos elementos visuais, escala, adição de curvas e retas auxiliares e a exportação dos dados formatados para outros aplicativos, tais como Matlab e Excel.

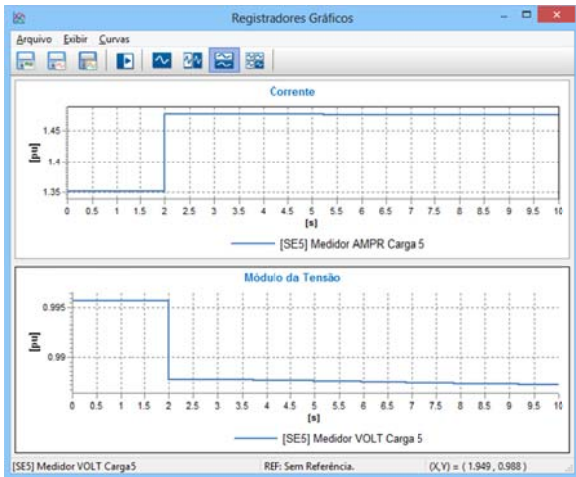


Fig. 5. Tela de visualização gráfica pós-simulação. Em detalhe, a modificação para permitir a comparação entre diferentes medidas, como corrente e tensão, em diferentes gráficos.

### III. RESULTADOS

Com a finalidade de demonstrar o uso do aplicativo de alteração automática de carga, um sistema de 9 barras extraído de [5] e representado na Fig. 6 foi utilizado.

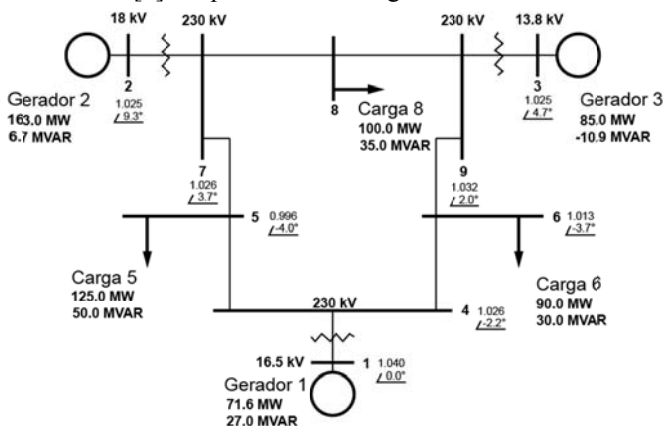


Fig. 6. Sistema 9 barras retirado de [5] utilizado como exemplo para a ferramenta de alteração automática de carga.

Todas as cargas foram definidas com modelo PQ, ou seja, com parâmetros P e Q definidos e V e  $\theta$  desconhecidos. O Gerador 1 foi definido como gerador de referência e utiliza o modelo V $\theta$ , com parâmetros P e Q desconhecidos. Os demais geradores foram modelados como PV [4]. A Fig. 6 indica o ponto de operação inicial do sistema, o qual foi calculado através do aplicativo de fluxo de potência.

Foi realizada uma alteração de carga percentual de 15% em todo o sistema no estado inicial, cujos dados anteriores e posteriores a alteração estão disponíveis na Tabela I. Os parâmetros não especificados nos modelos, tais como a potência reativa nos geradores PV, não são afetados pela ferramenta. De fato, os valores não especificados são obtidos após o cálculo do fluxo de potência [4].

TABELA I  
RESULTADO DA ALTERAÇÃO DE CARGA PERCENTUAL DE 15%

Dispositivo	$P_{original}$ [MW]	$Q_{original}$ [Mvar]	$P_{final}$ [MW]	$Q_{final}$ [Mvar]
Gerador 1 (V $\theta$ )	71.6	27.0	83.3	41.5
Gerador 2 (PV)	163.0	6.7	187.5	20.2
Gerador 3 (PV)	85.0	-10.9	97.8	-1.8
Carga 5 (PQ)	125.0	50.0	143.8	57.5
Carga 6 (PQ)	90.0	30.0	103.5	34.5
Carga 8 (PQ)	100.0	35.0	115	40.3

Partindo do estado inicial de equilíbrio do sistema da Fig. 6, foi feita uma alteração de carga absoluta de 10MW e 5Mvar nas cargas do sistema. A Tabela II mostra os dados originais e finais, após a solução do fluxo de potência.

TABELA II  
RESULTADO DA ALTERAÇÃO DE CARGA ABSOLUTA DE 10MW E 5MVAR

Dispositivo	$P_{original}$ [MW]	$Q_{original}$ [Mvar]	$P_{final}$ [MW]	$Q_{final}$ [Mvar]
Gerador 1 (V $\theta$ )	71.6	27.0	79.0	37.7
Gerador 2 (PV)	163.0	6.7	178.5	16.3
Gerador 3 (PV)	85.0	-10.9	93.1	-3.6
Carga 5 (PQ)	125.0	50.0	135.0	55.0
Carga 6 (PQ)	90.0	30.0	100.0	35.0
Carga 8 (PQ)	100.0	35.0	110.0	40.0

Sobre a reestruturação do aplicativo de simulação dinâmica, a Fig. 7. mostra o tempo de processamento da nova versão (com e sem monitoração habilitada) e da antiga versão para a simulação de um sistema de 979 barras, com tempo de 10 segundos e passo de integração de 5ms. A diferença de tempo entre a antiga e a nova versão é de aproximadamente  $\approx 84s$ , o que demonstra um ganho de tempo considerável em relação ao modo antigo.

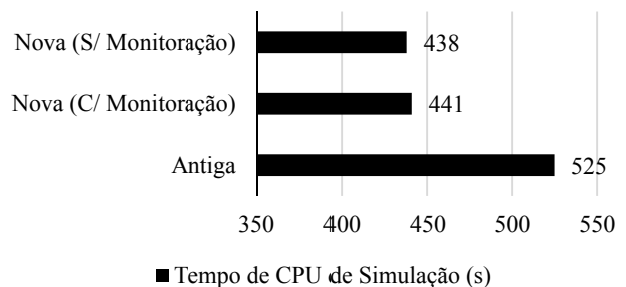


Fig. 7. Tempos de CPU, em segundos, do aplicativo de simulação. Nova se refere à nova estrutura do aplicativo de simulação, enquanto a série Antiga se refere à versão anterior da estrutura do aplicativo.

#### IV. CONCLUSÕES

Conforme os sistemas elétricos de potência crescem em complexidade e número de dispositivos, aumenta a dificuldade de análise para planejar e operar tais sistemas, mantendo-se o nível de qualidade e confiabilidade exigidos.

No estudo de possíveis estados de equilíbrio, é de interesse observar a possibilidade de estudar diferentes patamares de carga e geração. A ferramenta de alteração automática de carga desenvolvida neste trabalho auxilia esse estudo, pois substitui a modificação manual desses valores, que seria uma tarefa exaustiva para sistemas de grande porte.

Durante uma simulação no domínio do tempo, além da necessidade de se acompanhar a transição para um estado de equilíbrio após uma contingência, é de interesse poder observar o comportamento de alguma medição enquanto a simulação ocorre, além de poder ter registrado o comportamento de alguns dispositivos. Com as novas funcionalidade e modificações na estrutura computacional efetuadas neste trabalho, além da redução do esforço computacional, se tornou possível monitorar mais elementos do sistema, como os limitadores e tapes dos transformadores, auxiliando assim a análise do engenheiro de sistemas de potência na sua tomada de decisão.

As ferramentas criadas e modificadas cumprem, então, os objetivos de apoiar os estudos de sistemas mais complexos.

#### V. REFERÊNCIAS

- [1] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem and V. Vittal, "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, May, 2004.
- [2] K. Morison, L. Wang and P. Kundur, "Power System Security Assessment", IEEE Power & Energy Magazine, September/October, 2004.
- [3] A. Manzoni, "Desenvolvimento de um Sistema Computacional Orientado a Objetos para Sistemas Elétricos de Potência: Aplicação a Simulação Rápida e Análise da Estabilidade de Tensão", Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Março, 2005.
- [4] J. Monticelli, "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", Editora Edgard Blücher LTDA., 1983.
- [5] P. M. Anderson e A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", 2ª ed., John Wiley & Sons, Inc., 2003.

#### VI. RELATÓRIO DE ATIVIDADES

Com relação ao projeto, fiz duas visitas técnicas, uma ao Centro Regional de Operações Sudeste (COSR-SE) do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em 04/11/2011, onde conheci mais sobre o processo de operação da rede e o contato com um importante usuário de ferramentas computacionais de análise e simulação de sistemas elétricos de potência. A segunda visita foi ao complexo Lajes de usinas da Light em 17/11/2011.

Estive presente em duas defesas de teses, "Alocação de Monitores de Qualidade de Energia e Unidades de Medição Fasorial usando Programação Dinâmica Aproximada" de

Débora Costa Soares Dos Reis, em 04/2012, de doutorado e "Detecção da Proximidade de Instabilidade de Tensão utilizando Sincrofasores" de Carlos Alberto Oyarce Infante, em 12/07/2012, de mestrado.

#### VII. AVALIAÇÃO DO BOLSISTA

Desde que iniciei minhas atividades de aluno de Iniciação Científica no Laboratório de Sistemas de Potência, em 2011, venho aprendendo sobre sistemas elétricos, diversas técnicas matemáticas e computacionais para a análise desses e, principalmente, sobre a responsabilidade requerida para se participar de um trabalho de pesquisa e desenvolvimento em engenharia elétrica. Durante esse período de atividade no laboratório, verifiquei amadurecimento próprio em relação aos cuidados com a precisão dos dados e informações do programa. Nas frequentes reuniões com minha orientadora recebi instruções para solucionar como também pude propor a solução de alguns problemas. Não menos importante, o laboratório é um local de muita troca de informações da área com outros alunos. Por essas razões, avalio que a minha estadia no Laboratório de Sistemas de Potência é de grande valor para a minha formação e futura carreira como engenheiro.