

Desenvolvimento da Plataforma Anadyn para Análise de Estabilidade dos Sistemas Elétricos de Potência

Development of the Anadyn Platform for Stability Analysis of Electric Power Systems

RESUMO

Para análise dinâmica dos sistemas elétricos de potência, eles são representados matematicamente por um conjunto de equações algébrico-diferenciais. Como a maior parte destas equações são não-lineares e não apresentam uma solução analítica, é necessário utilizar métodos numéricos para alcançar uma solução ao longo do tempo. Na plataforma computacional desenvolvida neste trabalho, foi empregado o método Trapezoidal de integração numérica juntamente com o método Newton Raphson de solução de equações algébricas para solucionar o conjunto de equações algébrico-diferenciais. Sendo assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento da plataforma de simulação computacional Anadyn, que foi desenvolvida no *software* MATLAB e validada com o *software* ANATEM. A plataforma Anadyn realiza a simulação dinâmica dos sistemas elétricos de potência com o objetivo de analisar sua estabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema Elétrico de Potência. Análise Dinâmica. Estabilidade.

ABSTRACT

For dynamic analysis of the power electrical systems, they are represented mathematically by a set of algebraic-differential equations. Since most of these equations are non-linear and do not present an analytical solution, it is necessary to use numerical methods to reach a solution over time. In the computational platform developed in this work, we used the Trapezoidal method of numerical integration together with the Newton Raphson method of solving algebraic equations to solve the set of algebraic-differential equations. Thus, this work presents the development of the Anadyn computational simulation platform, which was developed in MATLAB software and validated with ANATEM software. The Anadyn platform performs the dynamic simulation of electric power systems in order to analyze their stability.

KEYWORDS: Electrical Power System. Dynamic Analysis. Stability.

Antonio Almeida de Sousa Neto
neto.sous@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

Diogo Marujo
diogomarujo@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) estão frequentemente sujeitos a inúmeras perturbações, sendo algumas de grande intensidade, como perda de linhas e curtos-circuitos, já outras menos severas, como as variações de carga que ocorrem a todo instante ao longo do dia. Nesse sentido, as simulações computacionais são essenciais para verificar, antecipadamente, o comportamento dos SEP na ocorrência desses eventos, principalmente, no que tange a análise de sua estabilidade para essas perturbações. Portanto, cria-se a necessidade de desenvolver plataformas computacionais que realizem a simulação dinâmica dos SEP e que sejam flexíveis em relação ao acesso do seu código fonte e das variáveis, como a matriz Jacobiana, e a inclusão de outros equipamentos pelo usuário.

Este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento da plataforma de simulação computacional Anadyn (Dynamic Analysis) que foi desenvolvida no software MATLAB para análise de estabilidade de curto-prazo e longo-prazo dos SEP. A plataforma Anadyn inclui os modelos matemáticos dos principais equipamentos que fazem parte dos SEP para análise dinâmica, como as máquinas síncronas, turbinas hidráulicas e térmicas, reguladores de velocidade e de tensão, limitadores de sobrecarga, transformadores de tap variável e as cargas elétricas.

MATERIAL E MÉTODOS

A análise do comportamento dinâmico dos SEP é feita, de maneira geral, mediante a solução do conjunto de equações algébrico-diferenciais (EAD) (1) e (2), que representa a modelagem matemática dos equipamentos que fazem parte dos SEP para análise dinâmica.

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (1)$$

$$0 = g(x, y) \quad (2)$$

sendo x o vetor das variáveis dinâmicas, y o vetor das algébricas, f o conjunto de equações diferenciais e g o conjunto de equações algébricas.

Uma das dificuldades enfrentadas para solucionar o conjunto EAD é que a grande maioria das equações são não-lineares e não apresentam solução analítica, sendo necessário empregar métodos numéricos. Neste trabalho, é empregado o método Trapezoidal de integração numérica para transformar as equações diferenciais (1) em algébricas (3), sendo, então, estas equações solucionadas simultaneamente com as demais equações algébricas (2) empregando o método de Newton Raphson de solução de equações algébricas (SOUZA; LOPES, 2008, p.174).

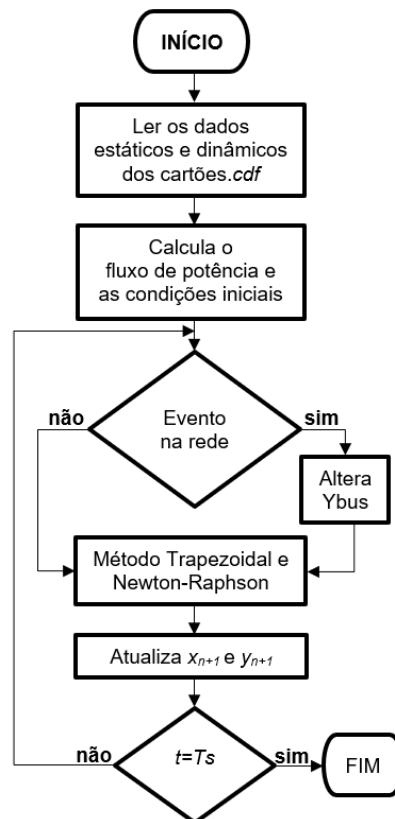
$$0 = F(x_{n+1}, y_{n+1}) = -x_{n+1} + x_n + \frac{h}{2} [f(x_{n+1}, y_{n+1}) + f(x_n, y_n)] \quad (3)$$

sendo h o valor do passo de integração e n um determinado instante de tempo.

Na figura 1, as principais etapas que algoritmo da plataforma de simulação computacional realiza para obter a solução ao longo do tempo do conjunto EAD

são mostradas por meio do fluxograma, sendo t o instante de tempo da simulação, T_s o instante de tempo final da simulação e Y_{bus} a matriz de admitância de barra. Inicialmente, a leitura dos dados estáticos (dados de linha e de barra) e dinâmicos (dados dos modelos matemáticos dos equipamentos) é feita de dois cartões de dados em formato *.cdf*. Após isso, calcula-se o fluxo de potência para encontrar os valores iniciais das variáveis. A partir desse momento, inicia-se o processo iterativo de solução do conjunto EAD utilizando os métodos Trapezoidal e Newton Raphson.

Figura 1 – Fluxograma da plataforma Anadyn



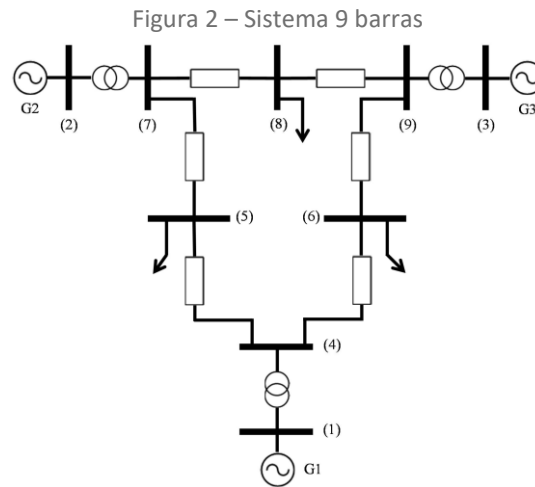
Fonte: Autoria própria (2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validar a plataforma de simulação computacional Anadyn, o comportamento do SEP encontrado utilizando a plataforma foi comparado com o do *software* ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) para a análise dinâmica de um evento curto-circuito trifásico franco. A validação foi realizada utilizando o sistema teste (ANDERSON; FOUAD, 2003, p.38), mostrado na figura 2.

O sistema teste é equipado com uma máquina síncrona, um regulador de tensão e um conjunto turbina/regulador de velocidade em cada umas das Barras 1, 2 e 3. As máquinas síncronas e os reguladores de tensão são representados pelos modelos matemáticos de quarta ordem e o IEEE *Type* DC1, respectivamente. Além disso, o conjunto turbina/regulador de velocidade é do tipo hidráulico para a Barra 1 e do tipo térmico para as Barras 2 e 3, sendo que tanto o conjunto hidráulico quanto o conjunto térmico são representados por modelos matemáticos de

terceira ordem, três equações diferenciais. Os dados estáticos e dinâmicos desse sistema podem ser encontrados em (MARUJO, 2017, p.42-43).

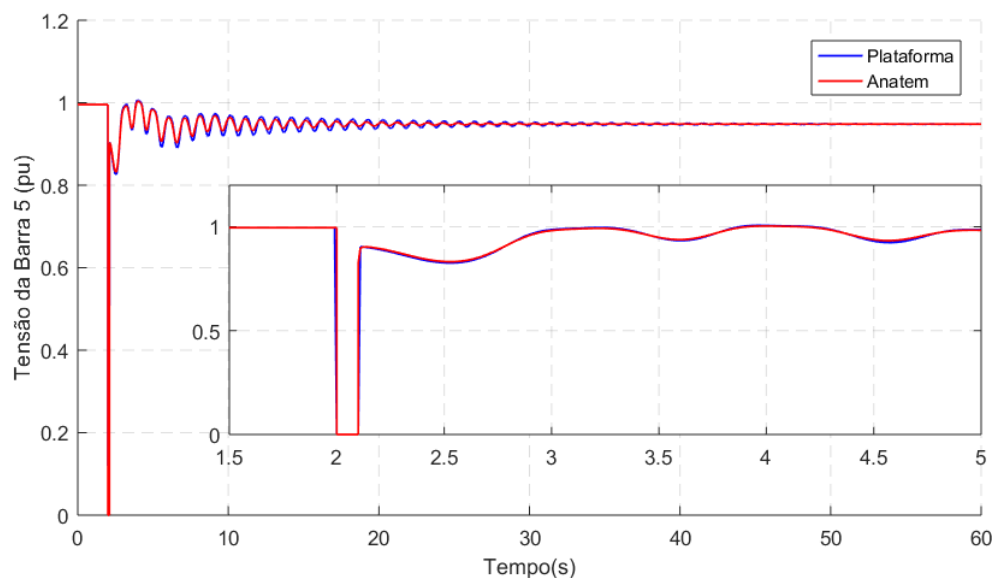


Fonte: Marujo (2017).

O evento curto-circuito trifásico franco foi aplicado à Barra 5 no instante de tempo 2 s, tendo sido eliminado através da abertura da linha de transmissão que interliga a Barra 5 à Barra 7 no instante de tempo 2,1 s. Os resultados da simulação são mostrados nas figuras 3 e 4 para algumas variáveis por um período de 60 s, tempo suficiente para avaliar a estabilidade do SEP.

Analisando a figura 3, nota-se que o valor da tensão da Barra 5 antes da ocorrência do evento é aproximadamente igual a 1 pu. No momento em que ocorre o evento, seu valor é reduzido a 0 pu por conta de o evento ser um curto-circuito trifásico franco. Já após a eliminação do curto-circuito, a tensão dessa barra passa por algumas oscilações, até alcançar um novo ponto de equilíbrio a longo prazo. Dessa forma, sendo o sistema estável do ponto de vista de estabilidade de tensão.

Figura 3 – Tensão da Barra 5

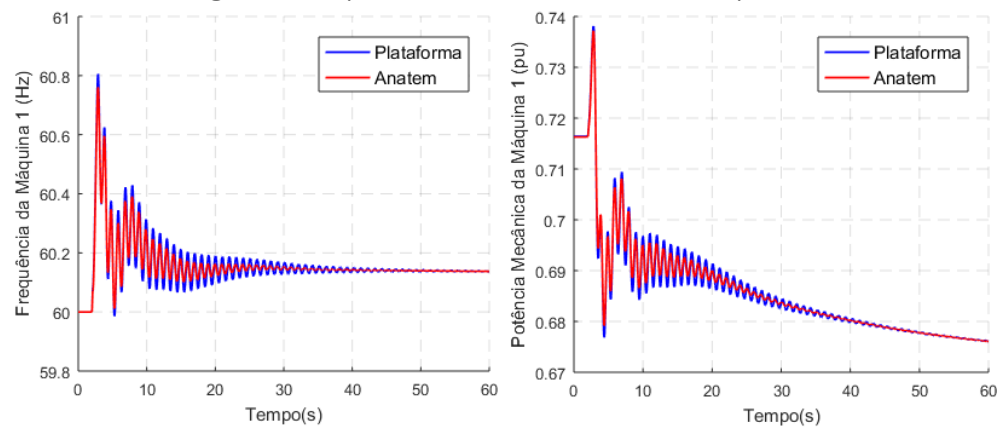


Fonte: Autoria própria (2019).

Além disso, ainda analisando a figura 3, percebe-se que os resultados obtidos por meio da plataforma são praticamente idênticos aos obtidos utilizando o ANATEM. A pequena diferença entre os dois resultados deve-se ao fato de que o modelo de máquina síncrona disponível no ANATEM inclui parâmetros subtransitórios, sendo que, no modelo de quarta ordem de máquina síncrona da plataforma Anadyn, esses parâmetros não estão presentes.

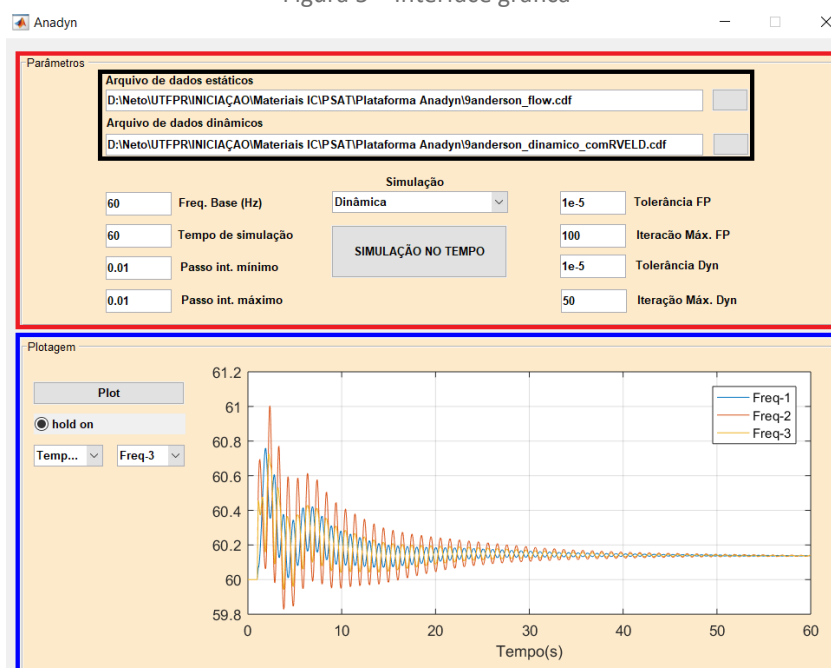
Em relação a performance do SEP em termos de estabilidade de frequência, na figura 4, o comportamento da frequência da máquina 1 é mostrado. Percebe-se pela figura 4 que o sistema é estável do ponto de vista de estabilidade de frequência, pois consegue alcançar um novo ponto de equilíbrio viável a longo prazo. Na mesma figura, ainda é mostrado o comportamento da potência mecânica da máquina 1, confirmando-se novamente para essa variável a coerência entre a resposta da plataforma com a do ANATEM.

Figura 4 – Frequência e Potência Mecânica da Máquina 1



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 5 – Interface gráfica



Fonte: Autoria própria (2019).

A plataforma Anadyn desenvolvida neste trabalho conta com uma interface gráfica do tipo *guide* no *software* MATLAB mostrada na figura 5. De acordo com a figura 5, a interface é dividida em dois espaços: o espaço Parâmetros demarcado em vermelho e o espaço Plotagem demarcado em azul.

O espaço Parâmetros é destinado a inserção dos dados necessários para realizar a simulação, como os arquivos de dados estáticos e dinâmicos do SEP, demarcado em preto na figura 5. Já no espaço Plotagem, é possível realizar a plotagem das variáveis que fazem parte da modelagem matemática e da simulação no tempo dos SEP.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentado o desenvolvimento da plataforma Anadyn de simulação computacional. A plataforma permite realizar a análise de estabilidade de curto-prazo e longo-prazo dos SEP através da abordagem de simulação dinâmica.

Os resultados alcançados com a plataforma mostraram-se satisfatórios devido a coerência com os obtidos com o *software* ANATEM. Não obstante a validação da Anadyn ter sido feita utilizando um SEP de pequeno porte, a plataforma pode simular SEP maiores, com limitação somente em relação aos modelos dos equipamentos atualmente presentes na plataforma. Entretanto, como a plataforma possibilita ao usuário ter acesso ao seu código fonte, outros modelos de equipamentos e controles, como geradores eólicos e controle automático de geração, podem ser implementados pelo usuário.

REFERÊNCIAS

SOUSA, A. C. Z. D.; LOPES, B. I. L. Unified computational tool for transient and long-term stability studies. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 3, n. 2, p. 173-181, 2008.

ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. Power System Control and Stability. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

MARUJO, D. Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência com a Presença de Redes de Distribuição Ativas. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2017.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Araucária FA – Paraná/Brasil.