MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM POSICIONADOR DE MÁQUINA-FERRAMENTA

André Freitas da SILVA (1); Valdemir MARIANO (2); Manoel Henrique de O. P. FILHO (3)

(1) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – Campus Pesqueira, Rodovia BR 232, km 214 - Pesqueira - PE - Brasil - CEP: 55200-000, e-mail: proandre21hotmail.com

(2) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rodovia BR 232, KM 241 – Pesqueira – PE - Brasil - CEP: 55200-000, e-mail: valdemir@pesqueira.ifpe.edu.br

(3) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rodovia BR 232, KM 241 – Pesqueira – PE - Brasil - CEP: 55200-000, e-mail: manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo dos métodos numéricos Diferença Central e Houbolt descrevendo as vantagens da aplicação destes métodos na simulação do comportamento dinâmico de um sistema posicionador de Máquina-Ferramenta (MF). Com base em modelagem matemática e dados obtidos experimentalmente foi possível obter a equação diferencial que rege o comportamento dinâmico do posicionador axial de uma MF, bem como, a sua solução através de métodos de integração numérica em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, após a aplicação de um sinal de entrada. Considera-se primordial a escolha do método de integração utilizado tendo em vista alguns requisitos como: a precisão da resposta avaliada quanto à eficiência dos métodos de estimação de parâmetros dinâmicos e de perturbações externas, facilidade de implementação e custo computacional. Com base nos resultados obtidos foi satisfatório o uso dos Métodos da Diferença Central e Houbolt, os quais foram implementados através de poderosa ferramenta computacional de processamento numérico. A eficiência dos métodos numéricos empregados neste estudo foi avaliada comparando os resultados obtidos com os resultados dos integradores de Wilson θ e Newmark apresentados nas referências especializadas.

Palavras-Chave: Método Numérico, Diferença Central, Houbolt, Simulação Computacional

1. INTRODUÇÃO

Em um mundo cada vez mais industrializado as modernas máquinas-ferramenta (MF) têm o objetivo constante de aumentar a qualidade, confiabilidade e competitividade dos produtos confeccionados, o que aponta para a necessidade de processos de fabricação cada vez mais eficientes, requisitando destas máquinas características de desempenho bastante elevadas principalmente quanto ao aspecto de precisão de seus sistemas de posicionamento. No caso das MF, uma boa exatidão de posicionamento somente é possível se a dinâmica da mesa posicionadora for bem conhecida, bem como, as fontes de erro atuantes, o que sem dúvida fornecerão informações que permitirão um bom desempenho do sistema de controle. Uma mesa de (MF) é formada por diversos componentes mecânicos como fuso, porca, mancais, guias, entre outros, porém, as características dinâmicas deste conjunto nem sempre são fornecidas pelos fabricantes.

É possível descrever o comportamento dinâmico de uma mesa posicionadora através de uma equação diferencial e por meio de métodos de integração numérica obter a solução do sistema para um determinado sinal de excitação e condições iniciais. Os métodos numéricos da Diferença Central, Houbolt, Newmark e Wilson θ, ainda são pouco empregados na solução numérica das equações que descrevem o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos, eletromecânicos e mecatrônicos não obstante apresentarem diversas vantagens, como boa precisão da resposta avaliada quanto à eficiência dos métodos de estimação de parâmetros dinâmicos e de perturbações externas. Por outro lado, são largamente explorados nos problemas de dinâmica estrutural da engenharia civil em função da relevância nos seguintes aspectos: precisão, facilidade de implementação e estabilidade numérica. Além disso, já é possível encontrar pesquisas que apontam resultados pertinentes quanto à aplicação dos Métodos Numéricos Diferença Central e Newmark na geração de configurações equilibradas de sistemas de linhas flexíveis na área de engenharia oceânica, bem como, em outras áreas.

Pretende-se nesta pesquisa aplicar os integradores Diferença Central e Houbolt, para fins de avaliação da eficiência de seus resultados comparando-os com os resultados dos demais integradores: Wilson θ e Newmark possibilitando a aplicabilidade destes no estudo da dinâmica estrutural de uma MF.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O levantamento do estado da arte em termos de aplicação de métodos numéricos ao processo de simulação do comportamento dinâmico de um posicionador de máquina-ferramenta dividiu-se em temáticas pertinentes ao estudo do problema em análise, tais como: Equações Diferenciais, Modelagem e Simulação de Sistemas, Software MATLAB e solução de Equações Diferenciais via Métodos Numéricos.

(ANTON; BIVENS; DAVIS, 2007) consideram que provavelmente a aplicação mais importante do cálculo envolva o estudo das equações diferenciais, uma vez que, estão constantemente sendo empregadas por físicos, engenheiros e cientistas sociais para a modelagem de algum problema real. Em geral, uma equação diferencial é aquela que contém uma função desconhecida e uma ou mais de suas derivadas, vendo por esse ângulo não é estranheza esse fato, visto que, em um problema real normalmente mudanças sempre ocorrem e daí é onde surge o importante papel dessas equações que é nada mais nada menos do que tentar prever o comportamento futuro tendo por base acontecimentos presentes. É importante ressaltar que frequentemente ocorre o fato de não se encontrar uma fórmula explicita para a solução de uma equação diferencial, no entanto, esse problema pode ser contornado por meio de métodos numéricos.

Garcia (1997) apresentou uma visão geral de como confeccionar modelos matemáticos dinâmicos a partir de conhecimentos teóricos a respeito dos processos. Focando-se nos campos da mecânica e eletromecânica, de sistemas fluídicos, térmicos, termo hidráulicos e químicos, também definiu modelos e apresentou diversos estudos com base na literatura pertinente explicitando o que é um modelo matemático. Além disso, classificou o que é simulação e investigou a simulação dinâmica apontando onde começa e até onde se estende a sua área de atuação. Posteriormente, o autor classificou os modelos e os problemas matemáticos deixando explicito o perfil de cada modelo e problema referido, depois apontou ainda os três estágios da análise dinâmica os quais permitem que os erros no modelo original sejam percebidos e corrigidos. Exemplos da multiplicidade de modelos para representar um sistema logo são trazidos a tona no intuito de demonstrar a existência de uma infinidade de modelos, cada um apropriado a um dado objetivo.

Quanto a solução numérica usando sistemas avançados de processamento, visualização e simulação, Neves (1997) considera que o software MATLAB (Matrix LaBoratory) surgiu com o intuito de auxiliar os alunos dos cursos de teoria matricial, álgebra linear e análise numérica. Como o próprio nome sugere, o MATLAB é bem adequado para aqueles que desejam implementar e testar soluções com uma certa facilidade, visto que ele dispensa as antigas linguagens de programação e ainda mantém uma elevada precisão nos cálculos. Atualmente, o MATLAB dispõe de uma biblioteca bastante abrangente de funções matemáticas e uma superior capacidade para geração e manipulação de gráficos, além disso, também a linguagem e o ambiente de programação MATLAB permitem ainda que o usuário possa escrever suas próprias bibliotecas, enriquecendo-o ainda mais. Como é do conhecimento convencional, a matemática é a linguagem comum de grande parte das ciências e da engenharia e é por isso, que o MATLAB é tão acessível e poderoso.

Referindo-se aos métodos numéricos, Mariano, Silva, Filho (2009) num esforço de ampliar horizontes na área dos métodos de integração direta, focaram seus esforços no sentido de avaliar os métodos da Diferença Central e Newmark no processo de identificação dos parâmetros modais de um sistema MDOF. Utilizando a integração numérica como ferramenta, deixaram claro que tendo em vista os resultados aferidos, os Métodos da Diferença Central e Newmark são viáveis para solucionar e analisar um sistema mecânico com dois graus de liberdade.

Em Mariano et al. (2006) e Mariano et al. (2003) foram desenvolvidos o modelamento, a simulação da dinâmica e a estimação dos parâmetros de uma mesa XY aplicada em máquinas-ferramenta convencionais para permitir o controle usando estratégias adaptativas. Para isto, o modelo dinâmico foi simulado através do método de Newmark e a estimação dos parâmetros, parâmetros modais e sinal de excitação foram executados por três métodos: mínimos quadrados clássico (LS), mínimos quadrados recursivo (RLS) e mínimos quadrados estendido (ELS), para efeito de análise e comparação da performance dos resultados de estimação.

Mariano (1998) versou sobre as vantagens de se usar os métodos numéricos Diferença Central, Houbolt, Newmark e Wilson θ nos processos de identificação de parâmetros e forças externas no domínio do tempo e da freqüência em sistemas mecânicos. Daí analisou todos os dados pertinentes que viabilizam ou não a escolha do método que tornarão consistentes as resoluções obtidas do sistema. Constatou também que estes métodos são de fácil implementação computacional, estão sendo usados com relevante freqüência na área de dinâmica estrutural e não requerem a redução da equação diferencial à forma de estado. Não obstante fez um levantamento de outros métodos de integração numérica apresentando suas formulações matemáticas. Observou também que embora suas amplas vantagens, esses métodos ainda são pouco aplicados em sistemas mecânicos.

Coelho (1997) somando aos estudos que versam sobre o comportamento das estruturas tridimensionais sujeitas a ações sísmicas, acrescentou uma relevante parcela de contribuição ao direcionar a sua pesquisa em busca de gerar novos subsídios aos projetistas quanto a exatidão dos seus dimensionamentos, na tentativa de amenizar as conseqüências catastróficas que um sismo pode provocar, sem, no entanto, elevar o custo da estrutura de uma forma exorbitante. Como ferramenta para resolução das equações diferenciais de equilíbrio no domínio do tempo recorreu ao uso de métodos numéricos, em especifico ao de Newmark tendo em vista: a precisão, garantia de estabilidade no processo de integração e a facilidade de implementação computacional.

3. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA

Pretende-se nesta pesquisa estudar, descrever a importância e aplicar os integradores Diferença Central e Houbolt no processo de resolução numérica do modelo matemático que descreve o comportamento dinâmico de um eixo posicionador de uma máquina-ferramenta, para fins de avaliação da eficiência de seus resultados comparando-os com os resultados dos demais integradores Wilson θ e Newmark, para, desse modo, validar a aplicabilidade destes métodos no problema de dinâmica estrutural destes sistemas mecânicos.

4. METODOLOGIA

Para a execução desta pesquisa alguns temas considerados fundamentais foram abordados em consonância com os objetivos apresentados. Portanto, para se introduzir o modelo matemático representativo da dinâmica de um posicionador de máquina-ferramenta e obter a solução para este sistema a partir de um determinado sinal de entrada, foi preciso investigar conteúdos referentes às equações diferenciais ordinárias (Anton;

Bivens; Davis, 2007), modelagem e simulação de sistemas dinâmicos (Garcia, 1997), software MATLAB (Gilat, 2006) e Métodos de Integração Direta (Bathe e Wilson, 1976).

4.1 Solução das Equações de Equilíbrio em Análise Dinâmica

A equação diferencial genérica representativa da resposta dinâmica de um sistema mecânico pode ser dada por,

$$[M]\{\ddot{U}\}+[C]\{\dot{U}\}+[K]\{U\}=\{R\} \qquad \text{[Eq.1]}$$

onde $[M]$, $[C]$ e $[K]$ representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez respectivamente, $\{R_T\}$ é o vetor força de excitação; $\{\ddot{U}_T\}$, $\{\dot{U}_T\}$ e $\{U_T\}$ são os vetores aceleração, velocidade e deslocamento do sistema, respectivamente. Matematicamente, a Eq.[1] representa um sistema de equações diferenciais lineares de segunda ordem, com coeficientes constantes, que pode ser solucionado numericamente através da utilização de algoritmos de integração. As equações do movimento de sistemas mecânicos com *n* graus de liberdade podem ser resolvidas no domínio do tempo por métodos de integração numérica.

Nos algoritmos de integração direta, a Eq.[1] é solucionada usando um procedimento numérico passo-a-passo; o termo direto significa que, para se efetuar a integração numérica, nenhuma transformação das equações em uma outra forma é necessária. Em essência, a integração numérica direta está baseada em duas idéias. Primeira, em vez de resolver a Eq.[1] a qualquer tempo T, procura-se solucioná-la somente a intervalos de tempo ΔT discretos, separadamente. Isto significa que, basicamente, o equilíbrio dinâmico que inclui o efeito das forças de inércia e de amortecimento é tomado a pontos discretos dentro do intervalo de solução. A segunda idéia na qual o método de integração direta é baseado, é a variação de deslocamentos, velocidades, e acelerações em cada intervalo de tempo ΔT. Como se depreende, é a forma como os deslocamentos, velocidades e acelerações variam em cada intervalo de tempo de discretização, que determina a precisão, estabilidade, e custo do procedimento de solução.

4.2 Método da Diferença Central

Se a relação de equilíbrio da Eq.[1] é admitida como um sistema de equações diferenciais com coeficientes constantes, segundo o Método da Diferença Central (MDC) , convenientes expressões de diferenças finitas podem ser utilizadas para aproximar as acelerações e velocidades em termos de deslocamento. De acordo com esse método é conveniente adotar:

$$\{\ddot{U}_T\}=\frac{\{U_{T+\Delta T}\}-2\{U_T\}+\{U_{T-\Delta T}\}}{\Delta T^2} \qquad \text{[Eq.2]}$$

$$\{\dot{U}_T\}=\frac{\{U_{T+\Delta T}\}-\{U_{T-\Delta T}\}}{2\Delta T} \qquad \text{[Eq.3]}$$

A solução para o deslocamento no tempo (T + ΔT) é obtida considerando a Eq.[1] no tempo T, ou seja,

$$[M]\{\ddot{U}_T\}+[C]\{\dot{U}_T\}+[K]\{U_T\}=\{R_T\} \qquad \text{[Eq.4]}$$

Substituindo as relações de $\ddot{U}_T$ e $\dot{U}_T$ conforme as Equações [2] e [3], respectivamente, na Eq.[4], obtemos

$$\left(\frac{1}{\Delta T^2}[M]+\frac{1}{2\Delta T}[C]\right)\{U_{T+\Delta T}\}=\{R_T\}-\left([K]-\frac{2}{\Delta T^2}[M]\right)\{U^t\}-\left(\frac{1}{\Delta T^2}[M]-\frac{1}{2\Delta T}[C]\right)\{U^{t-\Delta t}\} \qquad \text{[Eq.5]}$$

a qual é solucionada em função de $U_{T+\Delta T}$.

4.3 Método de Houbolt

O esquema de integração de Houbolt é algo parecido com o Método da Diferença Central discutido anteriormente, no qual as expressões de diferenças finitas também são utilizadas para aproximar as componentes de aceleração e velocidade em termos de componentes de deslocamento. No esquema de Houbolt as seguintes expressões de diferenças finitas são empregadas:

$$\ddot{U}_{T+\Delta T} = \frac{1}{\Delta T^2}\left\{2U_{T+\Delta T} - 5U_T + 4U_{T-\Delta T} - U_{T-2\Delta T}\right\} \quad \text{[Eq.6]}$$

$$\dot{U}_{T+\Delta T} = \frac{1}{6\Delta T}\left\{11U_{T+\Delta T} - 18U_T + 9U_{T-\Delta T} - 2U_{T-2\Delta T}\right\} \quad \text{[Eq.7]}$$

A fim de obter a solução no tempo (T + ΔT), a Eq. [1] será considerada neste tempo, a qual torna-se,

$$\left[M\right]\left\{\ddot{U}_{T+\Delta T}\right\} + \left[C\right]\left\{\dot{U}_{T+\Delta T}\right\} + \left[K\right]\left\{U_{T+\Delta T}\right\} = \left\{R_{T+\Delta T}\right\} \quad \text{[Eq.8]}$$

Substituindo as Equações [6] e [7] na Eq. [8] e organizando os vetores conhecidos no lado direito, obtemos para a solução de $U_{T+\Delta T}$:

$$\left(\frac{2}{\Delta T^2}\left[M\right] + \frac{11}{6\Delta T}[C] + [K]\right)\left\{U_{T+\Delta T}\right\} = \left\{R_{T+\Delta T}\right\} + \left(\frac{5}{\Delta T^2}\left[M\right] + \frac{3}{\Delta T}[C]\right)\left\{U_T\right\} + \left(\frac{4}{\Delta T^2}\left[M\right] + \frac{3}{2\Delta T}[C]\right)\left\{U_{T-\Delta T}\right\}$$
$$+\left(\frac{1}{\Delta T^2}\left[M\right] + \frac{1}{3\Delta T}[C]\right)\left\{U_{T-2\Delta T}\right\} \quad \text{[Eq.9]}$$

Como mostrado na Eq. [9], a solução para $\left\{U_{T+\Delta T}\right\}$, requer o conhecimento de $\left\{U_T\right\}$, $\left\{U_{T-\Delta T}\right\}$ e $\left\{U_{T-2\Delta T}\right\}$. Embora o conhecimento de $\left\{U_0\right\}$, $\left\{\dot{U}_0\right\}$ e $\left\{\ddot{U}_0\right\}$ seja útil para iniciar o esquema de integração Houbolt se faz necessário calcular $\left\{U_{\Delta T}\right\}$ e $\left\{U_{2\Delta T}\right\}$ por outros meios, neste caso, usamos o Método da Diferença Central para determiná-los. O Método de Houbolt é um esquema de integração implícito, enquanto que o Método da Diferença Central é um procedimento explícito. No que diz respeito à seleção do intervalo de tempo de discretização ΔT, pelo fato de o Método de Houbolt ser um esquema incondicionalmente estável, não há restrição quanto ao seu valor.

4.4 Protótipo e Modelagem da Mesa X

De acordo com Mariano (2005) posicionadores integram diversos sistemas mecânicos tais como tornos, fresadoras, centros de usinagem, máquinas de medição por coordenadas (MMC), entre outros. A mesa posicionadora em estudo apresenta dois eixos e foi parte integrante de uma máquina de eletroerosão convencional. Sua estrutura é composta de guias de escorregamento, bases móveis, fusos de deslizamento, porcas e mancais. Os principais componentes de um eixo da mesa XY em estudo podem ser vistos na Figura (1), incluindo o motor DC e o acoplamento que fazem parte do sistema de acionamento. Cada um dos eixos que formam a mesa contém vários elementos, os quais possuem características mecânicas como elasticidade axial e torcional, inércia, folgas, além de estarem sujeitos a não-linearidades como deformação térmica, stick-slip e backlash.

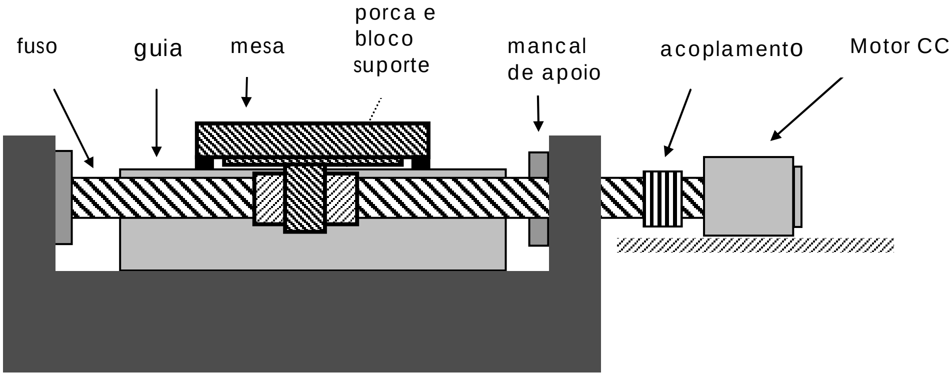

Figura 1 - Representação dos componentes do eixo X da mesa de coordenadas (Mariano,2005)

Para análise dinâmica do eixo da Figura (1), propõe-se um modelo massa-mola-amortecedor do tipo mostrado na Figura (2) com parâmetros descritos na Tabela (1) e sinal de excitação conforme a Figura (3).

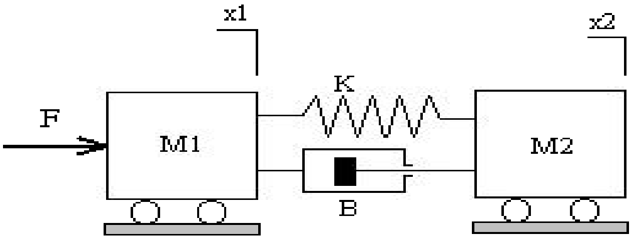

Figura 2 – Modelo massa-mola-amortecedor do eixo da mesa X

Tabela 1 – Descrição dos parâmetros

Parâmetros	Descrição
B	Amortecimento presente no conjunto
K	Coeficiente de rigidez equivalente do sistema
M1	Equivale à soma da massa do motor e do fuso
M2	Representa a massa equivalente da mesa
F	Equivale à diferença entre o torque do motor T*m* e o torque de carga T*c*
x_1, x_2	Representam os deslocamentos angulares do motor e do fuso respectivamente

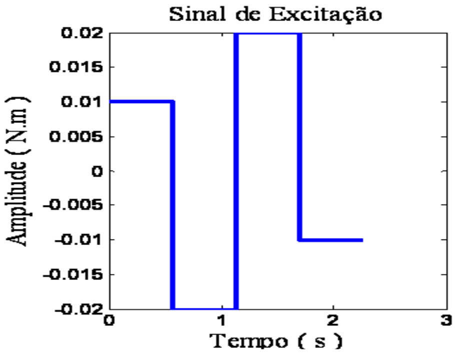

Figura (3) – Gráfico do sinal de excitação

De acordo com Mariano (2005) a aplicação das leis de equilíbrio no sistema da Figura (2) fornece o sistema de equações matriciais,

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B & -B \\ -B & B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad \text{[Eq.10]}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & I_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B & -B \\ -B & B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad \text{[Eq.11]}$$

4.5 Simulação do Sistema

Para a execução do processo de simulação a Tabela (2) apresenta dados da mesa X obtidos através de identificação experimental conforme Mariano (2005). Questões importantes devem ser ressaltadas no processo de simulação, pode-se citar, dentre eles, a escolha do tipo de sinal de excitação, bem como, a seleção do método numérico a ser empregado.

Tabela 2 - Valores dos parâmetros

Parâmetro	Valor	Unidade	Descrição
I_1	2,37e-04	kg.m^2	Soma da inércia do motor e do fuso
I_2	6,07e-06	kg.m^2	Inércia equivalente da mesa – eixo X
B	5,40e-04	N.m.s/rad	Amortecimento do sistema
K	1,76e-02	N.m/rad	Rigidez do sistema

5. RESULTADOS

Nos gráficos a seguir apresenta-se a resposta do sistema representado pela Equação (11) em termos de deslocamento angular em função do tempo e velocidade em função do tempo, obtidos pelos métodos de integração numérica: Diferença Central e Houbolt comparado-os com os resultados obtidos pelos métodos de Wilson θ e Newmark conforme Mariano et al. (2004) e Mariano et al. (2003), respectivamente.

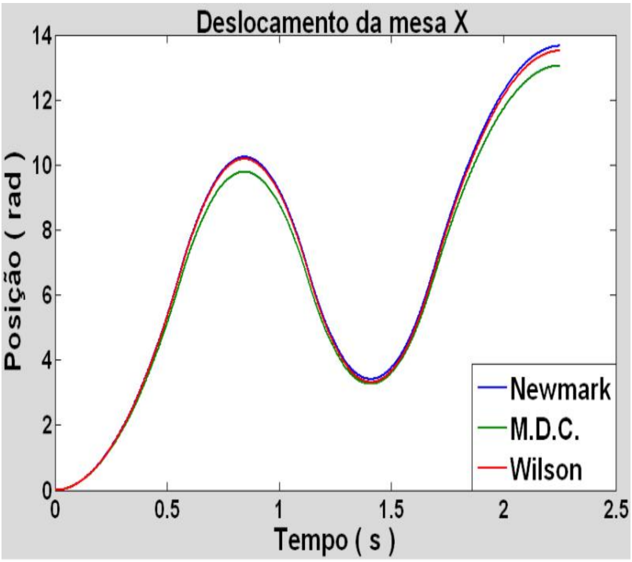

Figura 4 – Gráficos comparativos entre: o MDC, Wilson Θ e Newmark.

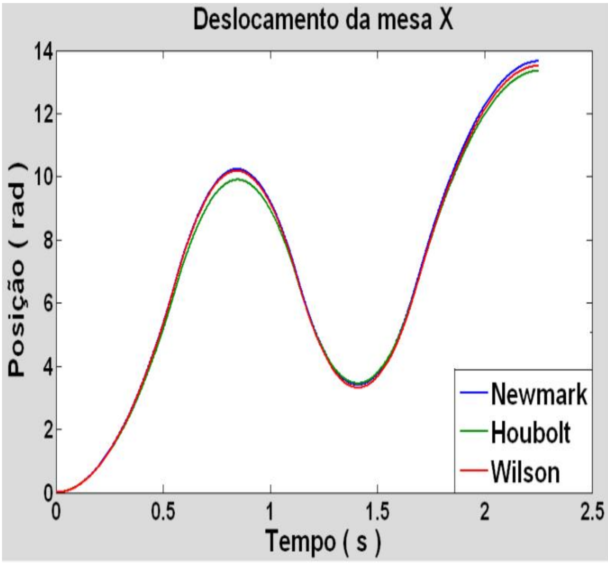

Figura 5 – Gráficos comparativos entre: Houbolt, e Wilson Θ e Newmark.

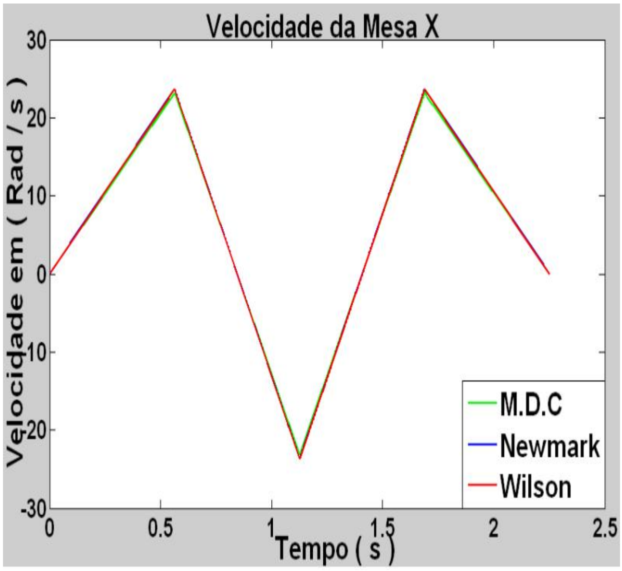

Figura 6 – Gráfico comparativo entre as velocidades: MDC, Wilson Θ e Newmark.

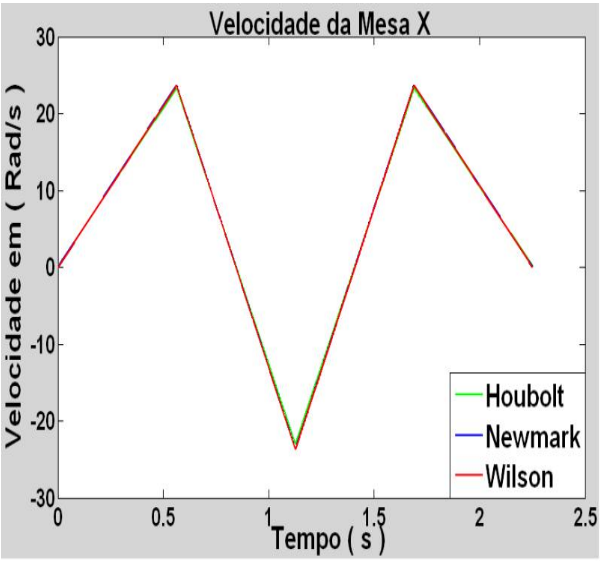

Figura 7 – Gráfico comparativo entre as velocidades: Houbolt, Wilson Θ e Newmark.

6. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em sistemas mecânicos de uma forma geral e, em particular, o posicionador de uma MF, como o analisado nesta pesquisa, geralmente, algumas características dinâmicas são desconhecidas. No entanto, podem ser identificadas facilmente através de técnicas apropriadas. Atualmente, a obtenção por simulação e por meios experimentais da resposta dinâmica de sistemas vem atraindo os olhares de engenheiros e pesquisadores de diversos campos por ser uma ferramenta cada vez mais viável para o monitoramento do comportamento estrutural através da observação das alterações nas propriedades físicas, o que é de grande relevância para as áreas de integridade estrutural e de manutenção preditiva. Por agregarem características de baixo custo computacional, boa precisão de resposta, estabilidade incondicional e fácil implementação, estes integradores numéricos são bastante consistentes quando o foco é: técnicas capazes de obter a resposta dinâmica no âmbito de estruturas com *n* graus de liberdade. Também se faz necessário informar que no processo de simulação foi utilizado $\Delta t = 0.0011$ s - o qual foi obtido de acordo com a dinâmica do sistema - visando o melhor aproveitamento dos métodos e as implementações foram realizadas para 2048 pontos de discretização conforme Mariano et al. (2004) e Mariano et al. (2003). Observou-se dos dados obtidos que os erros médios relativos percentuais para o deslocamento entre o MDC e os Métodos de Newmark e Wilson θ foram 4,33% e 3,27% respectivamente, enquanto que para a velocidade foram 2,23% e 1,15%. Por outro lado, os erros médios relativos percentuais para o deslocamento entre o Método de Houbolt e os Métodos de Newmark e Wilson θ foram 2,27 % e 1,19% respectivamente, enquanto que para a velocidade foram 0,055% e 1,16%. Com base nos resultados obtidos é visivelmente notável a aplicabilidade dos Métodos da Diferença Central e Houbolt para a obtenção da resposta dinâmica do sistema de posicionamento da MF, com destaque para o método de Houbolt pelos menores erros médios relativos apresentados. Salienta-se que a performance destes métodos pode ser avaliada a partir do emprego da resposta dinâmica em um modelo de identificação dos parâmetros do sistema posicionador ou mesmo do sinal de excitação atuante. Este modelo poderá ser desenvolvido no domínio do tempo ou no domínio da freqüência e tanto pode ser feito em uma única operação matemática de solução por mínimos quadrados da equação $AX = B$ ou através de técnicas recursivas que manipulam os dados em tempo real, o que é de grande utilidade para o desenvolvimento das estratégias de controle do tipo adaptativas auto-sintonizáveis, as quais executam a ação de controle em função do monitoramento contínuo do sistema.

7. AGRADECIMENTOS

O autor principal agradece a PROPESQ/IFPE pelo apoio e ao CNPq pela concessão da bolsa de I.C.

8. REFERÊNCIAS

ANTON, H.; BIVENS, I.; DAVIS, S. C. I. D. **Cálculo II.** 8.ed. Porto Alegre: Bookman,2007.

GARCIA, C.. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos**. *São Paulo: Usp,1997.*

GILAT, A. **Matlab com aplicações em engenharia**, Porto Alegre, Bookman Editora, 2006.

BATHE, K. J.; WILSON, E. L. **Numerical methods in finite element analysis**, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, 1976.

COELHO, C. D. B. **Análise sísmica de estruturas tridimensionais de edifícios de betão armado**, Tese de Mestrado, Universidade do Porto Faculdade de Engenharia, 1997.

MARIANO, V.; SILVA, J. C. B; FILHO, M. H. O. P. **Avaliação dos métodos Diferença Central e Newmark na identificação dos parâmetros modais de um sistema MDOF**, 9º Congresso Ibero-Americano de Ingeniería Mecánica, CIBIM9, Las Palmas de Gran Canaria, España, vol 1, p. 55-62, 2009.

MARIANO, V. **Controle adaptativo aplicado a um eixo posicionador de mesa de máquina-ferramenta.** Tese de Doutorado, UFPB, João Pessoa, Brasil, 161 p. 2005.

MARIANO, V.; SILVA, J. F. da; SILVA, J. B. de A., NASCIMENTO, J. F. de L., GARCIA, A. F. **Identificação recursiva do atrito em um posicionador de máquina-ferramenta**, XXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in engineering, XXV CILAMCE, Recife, Brasil, 2004.

MARIANO, V. **Avaliação de métodos numéricos aplicada a identificação de parâmetros e de perturbações externas em sistemas mecânicos**. Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, Brazil, 140 p. 1998.

MARIANO, V., SILVA, J. F. da, SILVA, J. B. de A., NASCIMENTO, J.F.L., BARBOSA DA SILVA, J.C., 2003, **“Performance de Sinais de Excitação na Estimação Recursiva de Parâmetros de uma Mesa XY de Máquina-Ferramenta”,** XXIV CILAMCE, Ouro Preto, Brazil, paper code: CIL640-16.