



DEISENARA DE SIQUEIRA MARQUES

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MODAIS DO
SISTEMA FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA POR MEIO DO
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS ESTOCÁSTICO**

LAVRAS-MG

2021

DEISENARA DE SIQUEIRA MARQUES

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MODAIS DO
SISTEMA FRUTO-RÁQUILA DA MACAÚBA POR MEIO DO
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS ESTOCÁSTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso em modalidade
Artigo apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do Curso de
Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Orientador

**LAVRAS-MG
2021**

DEISENARA DE SIQUEIRA MARQUES

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MODAIS DO SISTEMA FRUTO-RÁQUILA
DA MACAÚBA POR MEIO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS ESTOCÁSTICO**

**DETERMINATION OF MODAL PROPERTIES OF THE MACAÚBA
FRUIT-RACHILLA SYSTEM BY STOCHASTIC FINITE ELEMENT METHOD**

Trabalho de Conclusão de Curso em modalidade
Artigo apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do Curso de
Engenharia Mecânica, para a obtenção do título de
Bacharel.

APROVADA em 12 de Novembro de 2021

Dr.Francisco Scinocca

Dr.Dimas Jose Rua Orozco

Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos
Orientador

**LAVRAS-MG
2021**

Dedico este trabalho, primeiramente a Deus e a N.S.Aparecida, por estarem sempre presente, por tudo que têm me proporcionado e pela oportunidade de ter cursado o curso de Engenharia Mecânica. Aos meus pais, irmã e marido por terem me apoiado e dado forças para continuar durante todos esses anos. E à minha filha Zoe, que mesmo tão pequena, me faz querer ser cada dia melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por todas as realizações alcançadas até aqui.

Aos meus pais, por acreditarem que seria possível, mesmo diante de todas as dificuldades, por me incentivarem e apoiarem a todo momento , e por fazerem parte deste sonho e investirem nele, em troca apenas da minha felicidade.

À minha querida irmã Leid, que não mediu esforços para que eu pudesse desfrutar da melhor maneira possível os meus estudos.

Ao meu marido Bill, pelo incentivo e paciência durante todos esses anos. Por me mostrar todos os dias que eu seria capaz , e por não me deixar desistir.

Ao meu Professor e Orientador Fábio, pela oportunidade de fazer parte deste projeto, por acreditar que eu seria capaz de contribuir para o mesmo e por todos os ensinamentos passados com tanta qualidade, clareza e paciência, ao longos desses 5 anos.

A todos os meus amigos e colegas, pelo companheirismo e cumplicidade. Em especial à Dani, Ana Cláudia, Raiane, Fernanda, Thaynara e Milena por tornarem essa experiência mais doce e divertida.

A todos os professores e técnicos, que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a minha formação com seus ensinamentos e experiência de vida.

E por fim, à Universidade Federal de Lavras e a todos os seus colaboradores, por ofereceram um espaço tão agradável, lindo e acolhedor.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.” (Martin Luther King)

RESUMO

A macaúba apresenta propriedades como rusticidade, significativa adaptabilidade em diferentes regiões e elevada produtividade de óleo, o que faz com que ela se destaque como cultura promissora à extração de matéria prima para a produção de biodiesel. Entretanto, a colheita tem sido realizada de forma rudimentar em termos das ferramentas empregadas na sua colheita. Logo, com os resultados desse estudo pretende-se estabelecer um referencial teórico sobre o comportamento dinâmico dos frutos e cachos de macaúba durante o processo de colheita mecanizada por vibrações mecânicas. Para a realização das simulações foi desenvolvido um programa em linguagem Fortran 90. Para a discretização do sistema foram elaborados os modelos tridimensionais, a partir de um programa CAD 3D, e em seguida aplicado o método dos elementos finitos estocásticos. Para a formação dos campos estocásticos, foram gerados números aleatórios para as variáveis modo de elasticidade e massa específica adotando-se o método de Monte Carlo. Para a obtenção das propriedades modais do sistema, adotou-se a formulação e solução de problemas de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modo de vibração). No desenvolver deste trabalho foram analisados 4 acessos de diferentes regiões, considerando o estágio de maturação maduro e imaturo. Foram executadas 2500 simulações para cada acesso e para cada estágio de maturação, as quais resultaram em uma faixa de 2500 frequências cada, com seus respectivos desvios padrão. A partir desse processo, foram extraídas as 6 primeiras frequências naturais e seus respectivos modos de vibração. As frequências naturais associadas ao 5º modo de vibração (modo pendular), considerando os 4 acessos, se encontraram em um intervalo entre 10,67 Hz a 26,84 Hz considerando o estágio imaturo, e 8,58 Hz a 29,29 Hz para o estágio maduro.

Palavras-chave: Macaúba. Método dos Elementos Finitos. Vibrações mecânica

ABSTRACT

Macauba has properties such as rusticity, significant adaptability in different regions and high oil productivity, which makes it stand out as a promising crop for the extraction of raw materials for the production of biodiesel. However, the harvesting has been carried out in a rudimentary way in terms of the tools used in its harvest. Therefore, with the results of this study it is intended to establish a theoretical framework on the dynamic behavior of the fruits and clusters of macauba during the mechanized harvesting process by mechanical vibrations. To carry out the simulations, a Fortran 90 language program was developed. For the discretization of the system, three-dimensional models were created, using a 3D CAD program, and then the stochastic finite element method was applied. For the stochastic fields, random numbers were generated for the variables mode of elasticity and specific mass using the Monte Carlo method. To obtain the system's modal properties, the formulation and solution of eigenvalues (natural frequencies) and eigenvectors (vibration mode) was adopted. In the development of this work, 4 sites from different regions were analyzed, considering the stage of mature and immature maturation. For this work, 2500 simulations were performed for each access and for each maturation stage, which resulted in a range of 2500 frequencies each, with their respective standard deviations. From this process, the first 6 natural frequencies and their respective mode shapes were extracted. The natural frequencies associated with the 5th mode of vibration, considering the 4 accesses, were found in an interval between 10.67 Hz to 26.84 Hz considering the immature stage, and 8.58 Hz to 29.29 Hz for the mature stage.

Keywords: Macauba. Finite Element Method. Mechanical vibrations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Fluxograma do programa desenvolvido.....	19
Figura 2.a- Discretização do sistema fruto pedúnculo.	21
Figura 2.b- Sistema fruto pedúnculo real	21
Figura 3- Valores de frequência mínima, média e máxima para cada acesso estudado, considerando os diferentes estádios de maturação avaliados.	26
Figura 4- Comparação entre as frequências médias encontradas para cada acesso estudado, considerando os dois estádios de maturação.	27
Figura 5- Comparação entre as frequências médias encontradas para cada estágio de maturação estudado, considerando os quatro acessos.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades geométricas do fruto-ráquila da macaúba utilizadas como dados de entrada para a realização das simulações.....	19
Tabela 2- Propriedades mecânicas do fruto-ráquila da macaúba utilizadas como dados de entrada para a realização das simulações.	20
Tabela 3- Resultados das simulações para o estágio imaturo considerando a 5a frequência natural para os virentes acessos avaliados.	25
Tabela 4- Resultados das simulações para o estágio Maduro considerando a 5a frequência natural para os virentes acessos avaliados.	26

LISTA DE SIGLAS

ANP Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis é o órgão regulador das atividades que integram a indústria do petróleo, de gás natural e dos biocombustíveis no Brasil.

BD27 Palmeira provinda da região de Abaeté/ MG.

BD40 Palmeira provinda da região de Pitangui–Martinho Campos/ MG.

BGP29 Palmeira provinda da região de Prudente de Moraes – Matozinhos/ MG.

BGP35 Palmeira provinda da região de Mirandópolis/ SP.

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética, presidido pelo Ministro de Estado de Minas e Energia, é órgão de assessoramento do Presidente da República para formulação de políticas e diretrizes de energia

MME Ministério de Minas e Energia do Brasil

PNPB Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

LISTA DE SÍMBOLOS

E Variável Modo de Elasticidade

ρ Variável Massa Específica

V_i i-ésimo valor aleatório

V_o valor médio do parâmetro

s desvio padrão do parâmetro

N_i i-ésimo número aleatório, com valores entre 0 e 1.

$[M]$ matriz massa, Kg

$\{a\}$ vetor aceleração, m/s^2

$[K]$ matriz rigidez, N/m

$\{v\}$ vetor deslocamento, m

$\{\varphi_j\}$ autovetor associado a i-ésima frequência natural do sistema

ω_i i-ésima frequência natural, $rad. s^{-1}$

t tempo, s .

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 MATERIAL E MÉTODOS	18
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4 CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

No contexto associado à redução gradual das reservas mundiais de combustíveis derivados do petróleo e o impacto da poluição ambiental gerada pela emissão de gases, a produção e a utilização de biocombustíveis assume um papel de destaque no cenário global. Desta forma, os biocombustíveis, ao longo dos anos, vêm se inserindo neste quadro, com a responsabilidade de ajudar a reduzir a emissão dos gases de efeito estufa e substituir parcialmente o petróleo, aumentando assim sua vida útil (LEITE e LEAL, 2007). Logo, o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para a produção sustentável de matérias-primas visando à produção de biocombustíveis, torna-se a cada dia um dos principais desafios do setor agroenergético do Brasil.

Entre os biocombustíveis, o biodiesel se consolida como uma forte alternativa, tanto pelo lado econômico quanto pelo lado ambiental, apresentando grande potencial de crescimento para substituir o diesel do petróleo (GIRARDI, 2015). O Brasil é o segundo maior produtor e consumidor de biodiesel do mundo (MME, 2017) e, ao longo dos anos, construiu uma rede de 35 plantas de produção de biodiesel, concentradas na região centro-sul do Brasil, com capacidade para produzir 7,30 bilhões de litros por ano. Em 2018, as usinas brasileiras produziram cerca de 5,4 bilhões de litros de biodiesel após a autorização da comercialização do combustível B10 pelo CNPE. Neste mesmo ano, estimava-se que a capacidade nominal de produção de biodiesel B100 era de 8,5 milhões de litros (MME, 2019).

O biodiesel é sintetizado a partir de matérias graxas de fontes renováveis (que podem ser de origem animal, vegetal ou microbiana), composta por ésteres alquílicos de ácidos graxos (EAAG) de cadeia longa (ANP, 2016). Com o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) houve um aumento significativo da demanda de óleo vegetal para a produção de biodiesel. Várias culturas emergiram como potenciais soluções para a produção em grande escala de óleo vegetal, dentre as quais se destacam o babaçu, o pinhão manso, o dendê, a canola e a macaúba.

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) tem se destacado como uma cultura promissora à extração de matéria prima para a produção de biodiesel (CARVALHO et al., 2011). A macaúba tem uma grande probabilidade de se tornar a palmeira oleaginosa de maior comercialização no contexto brasileiro, não somente pelo seu potencial oleaginoso, mas também por ser uma espécie genuinamente brasileira, que ocorre em grandes maciços naturais em quase todo território nacional (NUNES, 2015).

A macaúba pode ser encontrada em toda a América do Sul e, no Brasil, em ecossistemas diferentes, incluindo os biomas Mata Atlântica e Cerrado (MONTROYA et al., 2016). É uma palmeira que pode atingir mais de 16 m, além de apresentar muitos espinhos ao longo do estipe (EVARISTO et al., 2016). A frutificação da *Acrocomia aculeata* ocorre praticamente o ano todo, apresenta alto rendimento, baixo custo de produção, facilidade de adaptação a diversos ecossistemas e com potencial imediato a ser utilizado na produção de biodiesel (AMARAL et al., 2011; SILVA, 2018). O teor de óleo derivado do fruto da macaúba é alto, sendo possível extrair o óleo derivado da polpa e o óleo derivado da amêndoa do fruto. Ela apresenta características como rusticidade, significativa adaptabilidade em diferentes regiões, possibilidade de cultivo em consórcio com outras espécies em sistemas agrossilvipastoris, elevada produtividade de óleo e geração de co-produtos sem toxinas e com diversas aplicações na agricultura e indústria (HENDERSON et al., 1995; PIMENTEL et al., 2011; FERRARI e AZEVEDO FILHO, 2012).

Entretanto, quando se avalia o ciclo produtivo da macaúba, observa-se uma premente demanda por tecnologias que consolidem a sua capacidade produtiva, dentre as quais se destacam o cultivo, a colheita e o processamento dos frutos. Considerando que o material base para a produção de óleo vegetal é o fruto da macaúba, a colheita se torna um componente fundamental para manutenção da cadeia produtiva da cultura.

A exploração da macaúba tem como base o extrativismo. Os frutos podem ser colhidos usando-se foices para o corte dos cachos ou podem ser coletados diretamente no chão após sua queda (CARVALHO et al., 2011). No entanto, esse tipo de colheita pode ser prejudicial aos produtores, devido ao risco que ela oferece, considerando que a palmeira apresenta espinhos ao longo dos troncos e nas folhas, e também pode prejudicar a qualidade do óleo extraído, levando

em consideração que serão coletados frutos com diferentes estádios de maturação, e alguns em estado já de decomposição.

Acredita-se que a colheita mecanizada dos frutos da macaúba possa ser realizada de forma eficiente a partir de vibrações mecânicas. Tal princípio poderia permitir que os frutos fossem colhidos em um ponto de maturação adequado, o que proporcionaria a extração de um óleo de melhor qualidade.

O princípio de vibrações mecânicas pode ser definido como movimentos periódicos, oscilações de uma partícula, um sistema de partículas ou um corpo rígido em torno de uma posição de equilíbrio. A partir de tal princípio, a energia mecânica é transmitida à planta ou a uma parte dela, promovendo o desprendimento dos frutos (ERDOGAN et al., 2003; SANDERS, 2005; SESSIZ e OZCAN, 2006; SOUZA et al., 2006; POLAT et al., 2007; PEZZI e CAPRAVA, 2009; SANTOS et al., 2010a).

A colheita mecanizada por vibrações mecânicas exige uma combinação adequada dos parâmetros de frequência, amplitude e tempo de vibração, que permitam melhor desprendimento dos frutos, além de promover menor desfolha e quebra de ramos. A determinação destes parâmetros pode ser realizada pelo estudo do comportamento dinâmico da planta a ser colhida (CIRO, 2001; SANTOS et al., 2010a). Contudo, não existem informações sobre comportamento dinâmico dos sistemas fruto-ráquila-ráquis e, principalmente, dos cachos quando submetidos à vibrações mecânicas.

O comportamento dinâmico de um sistema diz respeito às suas propriedades dinâmicas que incluem as frequências naturais e os modos de vibração, que por sua vez dependem da massa, da rigidez e do tipo de amortecimento do sistema, e determinam o comportamento de vibração estrutural (VELLOSO, 2016).

Para estudar as propriedades dinâmicas de sistemas mecânicos que estão submetidos a um tipo de excitação por vibrações, utiliza-se a análise modal. Esta análise pode ser realizada a partir de modelos matemáticos com o auxílio de programas computacionais, que se baseiam na resolução de problemas de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração).

A modelagem matemática tem a finalidade de representar os aspectos importantes de um sistema físico real de forma a obter as equações que regem esse sistema sem, no entanto, torná-lo

muito complexo, possibilitando compreender as variações no comportamento de determinados problemas físicos. A partir de um modelo, derivam-se as equações que descrevem a vibração do sistema. As soluções dessas equações resultarão nas respostas do sistema vibratório fornecendo os deslocamentos, velocidades e acelerações das várias partes do sistema (VELLOSO, 2016).

Essa modelagem pode ser feita a partir do Método dos Elementos Finitos, que é comumente usado para análise de problemas multifísicos e viabiliza sua aplicação à solução de modelos matemáticos de sistemas físicos por meio de simulações com grande grau de confiabilidade (SANTOS et al., 2015). Esse método consiste na geração e solução de um sistema de equações diferenciais que governam o comportamento físico em questão (ALBURQUEQUE, 2005; TAPLAK e PARLAK, 2012).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados. O MEF resulta na determinação aproximada dos valores dos parâmetros desejados em pontos específicos como força, velocidade, deslocamento e tensão, chamados nós, da equação linear ou não linear sistemas. Uma função de abordagem contínua é assumida para representar a solução em cada nó. A solução completa aproximada do problema é definida por interpolações locais em cada elemento (conjunto de nós), que tem continuidade garantida por estabelecer previamente uma conectividade entre os nós (VELLOSO et al., 2017).

O sistema fruto-ráquila da macaúba, certamente, apresentará uma grande variabilidade em suas propriedades geométricas, físicas e mecânicas. Acredita-se que o efeito dessa variabilidade possa alterar a resposta dinâmica do sistema, quando este é submetido a vibrações mecânicas. Dessa forma, a utilização de ferramentas estocásticas para o estudo das propriedades modais do sistema será fundamental para o projeto de máquinas adequadas para a colheita de frutos da macaúba. No método de elementos finitos estocástico, os parâmetros de entrada são definidos como um conjunto de valores aleatórios, obtendo, assim, um conjunto de resultados para um dado parâmetro (REH et al., 2009; BERTHAUME et al., 2012). A aleatorização dos valores é, normalmente, executada a partir de modelos que descrevem a distribuição de probabilidade dos parâmetros em questão (STEFANO, 2009). Portanto, com os resultados

desse estudo pretende-se estabelecer um referencial teórico sobre o comportamento dinâmico dos frutos da macaúba, a partir da aplicação do Método de elementos Finitos Estocástico, o qual poderá ser usado para uma melhor compreensão do processo de colheita mecanizada por vibrações mecânicas, considerando dois estádios de maturação (maduro e imaturo) e frutos oriundos de diferentes localidades (acessos).

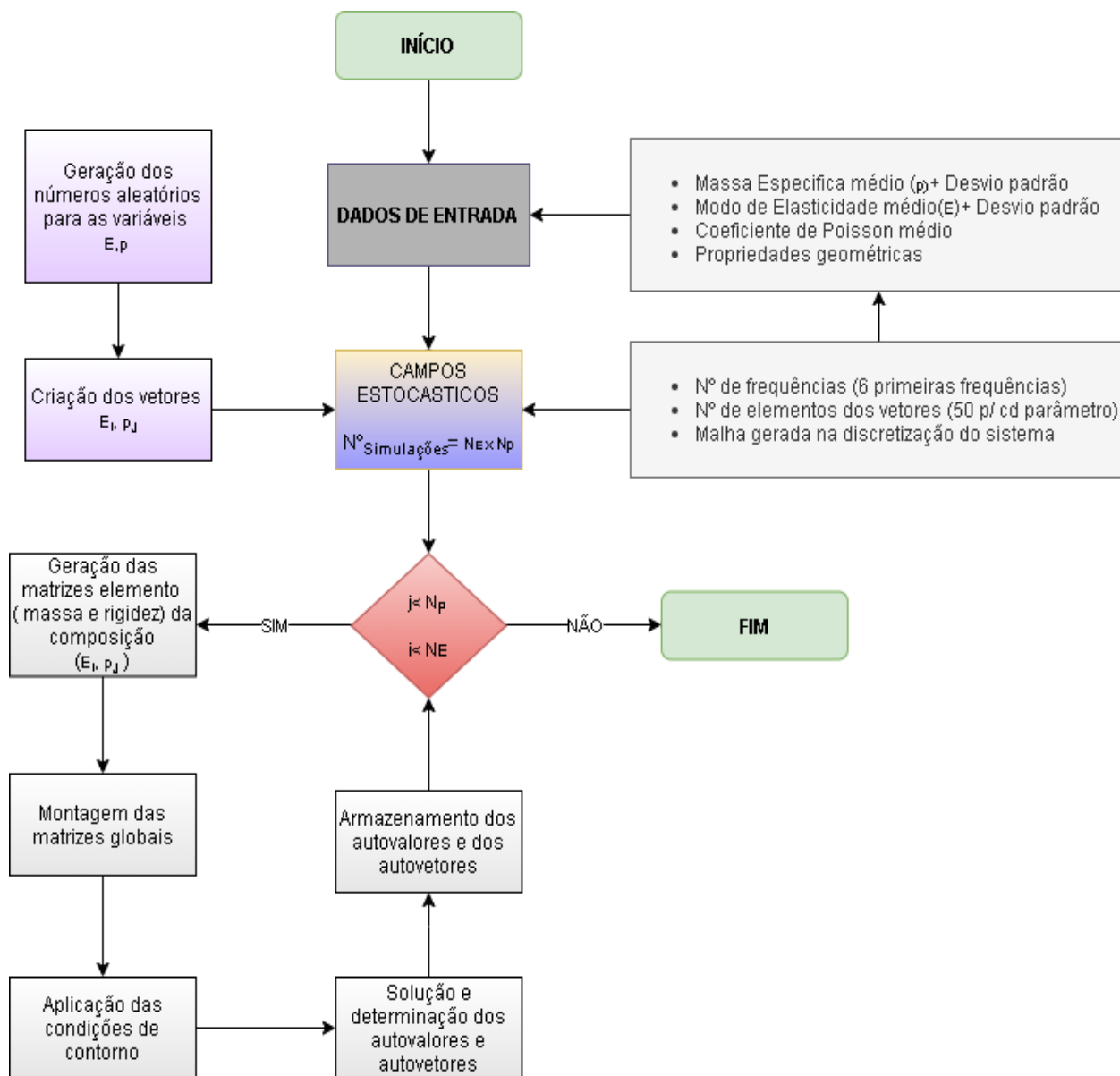
2 MATERIAL E MÉTODOS

Considerando a grande variabilidade que o sistema fruto-ráquila da macaúba pode apresentar, foram utilizados quatro acessos distintos, os quais foram identificados por **BD27** (palmeira provinda da região de Abaeté/ MG), **BD40** (palmeira provinda da região de Pitangui–Martinho Campos/ MG), **BGP29** (palmeira provinda da região de Prudente de Moraes – Matozinhos/ MG) e **BGP35** (palmeira provinda da região de Mirandópolis/ SP). Para cada acesso, foram considerados dois estádios de maturação (imaturo e maduro). Estes mesmos acessos foram estudados experimentalmente por VELLOSO (2016), em que as principais propriedades físicas e mecânicas foram extraídas e empregadas como dados de entrada durante a aplicação do Método de Elementos Finitos Estocásticos.

Para a realização das simulações, considerando-se o Método de Elementos Finitos Estocásticos, foi desenvolvido um programa em linguagem Fortran 90. A estrutura do programa pode ser observada na Figura 1.

Como parâmetros iniciais de entrada para a realização das simulações, adotou-se os dados obtidos por VELLOSO (2021), sendo eles: a massa específica média de cada estrutura, o módulo de elasticidade médio, o coeficiente de Poisson da ráquila, as dimensões do sistema (diâmetro e comprimento), e os desvios padrões da massa específica e do módulo de elasticidade, conforme pode ser observado nas Tabelas 1 e 2.

Figura 1 - Fluxograma do programa desenvolvido.



Fonte: Autor (2019)

Tabela 1 : Propriedades geométricas do fruto-ráquila da macaúba utilizadas como dados de entrada para a realização das simulações.

Propriedades	Fruto	Ráquila
Comprimento (mm)	***	120,00
Diâmetro (mm)	41,00	3,75

Fonte: VELLOSO et.al(2021)

Tabela 2 : Propriedades mecânicas do fruto-ráquila da macaúba utilizadas como dados de entrada para a realização das simulações.

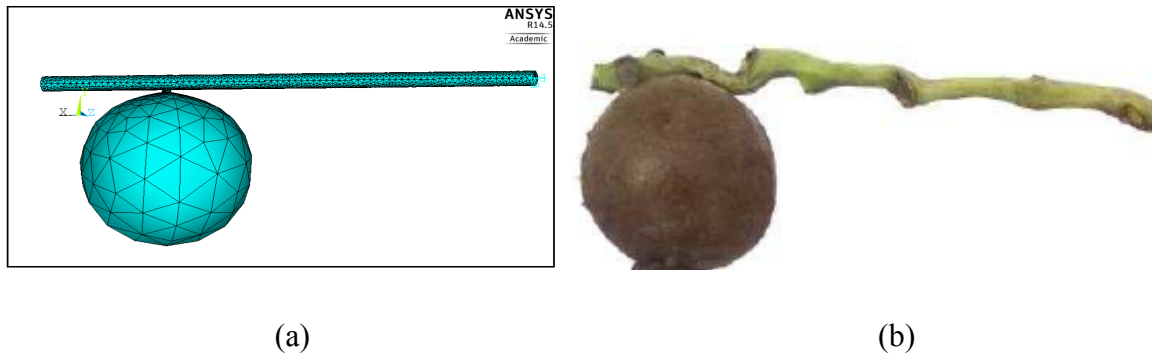
Acessos	Estádio de Maturação	Módulo de Elasticidad e (MPa)	Desvio- Módulo de Elasticidade	Massa específica (Kg/m³)	Desvio - Massa específica	Coefficiente de Poisson
BD40	Imaturo	292	99	417	97	0.36
	Maduro	306	146	454	118	0.34
BGP29	Imaturo	320	111	536	112	0.36
	Maduro	250	120	684	170	0.34
BD27	Imaturo	303	103	534	112	0.36
	Maduro	184	88	524	136	0.34
BGP35	Imaturo	194	66	667	140	0.36
	Maduro	122	58	774	193	0.34

Fonte:VELLOSO et.al(2021)

Além dos dados referentes às propriedades físicas do sistemas, também foram utilizados como dados de entrada: o número de frequências a serem consideradas (neste trabalho optou-se por extrair as 6 primeiras frequências naturais), o número de elementos dos vetores que compuseram os campos estocásticos (50 para cada parâmetro) e a malha gerada na discretização do sistema (Figura 1).

Para a discretização do sistema foram elaborados os modelos tridimensionais, a partir de um programa CAD 3D, e em seguida aplicado o método dos elementos finitos. A discretização dos modelos tridimensionais (domínios geométricos) foi feita a partir da geração de malhas não estruturadas utilizando-se o software ANSYS, para tal empregou-se elementos tetraédricos de 4 nós, conforme pode ser observado na Figura 2(a). Foi empregada uma malha padrão para todos os cenários estudados, a qual é composta por 16612 elementos, 4027 nós e 6 pontos de integração. O tempo médio para cada simulação foi de 11s, totalizando 220000 segundos, aproximadamente.

Figura 2 : (a) Discretização do sistema fruto pedúnculo. (b) Sistema fruto pedúnculo real



Fonte: VELLOSO (2016)

Para a formação dos campos estocásticos, foram gerados números aleatórios para as variáveis módulo de elasticidade e massa específica, e em seguida criados vetores com combinações das duas variáveis (E_i , ρ_j). Esses números aleatórios foram obtidos por meio de um algoritmo gerador de números aleatórios, sendo os campos estocásticos obtidos a partir da equação (1).

$$V_i = V_o + s (2N_i - 1) \quad (1)$$

Sendo,

V_i = i-ésimo valor aleatório;

V_o = valor médio do parâmetro;

s = desvio padrão do parâmetro;

N_i = i-ésimo número aleatório, com valores entre 0 e 1, gerado a partir do algoritmo proposto PRESS et al. (1992).

Para as simulações, adotou-se o método de Monte Carlo, o qual é definido como uma técnica para representar a solução de um problema como um parâmetro de uma população hipotética e, que usa uma sequência aleatória de números para construir uma amostra da

população da quais estimativas estatísticas desse parâmetro possam ser obtidas (HALTON, 1970). O método é também referido como simulação estocástica e é um método relativamente simples e fácil de implementar (PAULA, 2014).

No total, foram gerados 2500 valores para cada variável aleatória, para cada estágio de maturação e para cada acesso, totalizando 20000 simulações. O resultado dessas simulações foram armazenados nos vetores , os quais compuseram os campos estocásticos.

Em seguida, foram geradas as matrizes elementos para cada composição de módulo de elasticidade e massa específica. Posteriormente, foi realizada a montagem das matrizes globais e aplicaram-se as condições de contorno. Nas simulações realizadas, os deslocamentos nos eixos XYZ entre a ráquila e o cacho foram restritos. Desta forma, o fruto permaneceu na extremidade livre, representando o que normalmente é observado. Os parâmetros geométricos, a massa, bem como a razão de Poisson, foram tratados como valores constantes, em todos os cenários. Os modelos foram considerados lineares, elásticos e isotrópicos nas simulações. Esta simplificação torna-se aceitável considerando que o objetivo principal deste trabalho é uma análise da influência dos parâmetros incertos.

A modelagem foi feita considerando o sistema com múltiplos graus de liberdade e sujeitos a vibração livre não amortecida, cuja equação na forma matricial é dada pela Equação (2) (RAO, 1995).

$$[M]\{a\} + [K]\{v\} = \{0\} \quad (2)$$

Sendo,

$[M]$ = matriz massa, Kg ;

$\{a\}$ =vetor aceleração, m/s^2 ;

$[K]$ = matriz rigidez, N/m

$\{v\}$ =vetor deslocamento, m

Para a obtenção das propriedades modais do sistema, adotou-se a formulação e solução de problemas de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modo de vibração). Para a determinação dos autovalores assumiu-se que as vibrações livres fossem harmônicas. Logo,

derivando-se a Equação (3), que representa o deslocamento do sistema em relação ao tempo e substituindo na Equação (2), obtém-se a Equação (4).

$$\{v\} = (\cos \omega_i t + \text{sen } \omega_i t)\{\varphi_j\} \quad (3)$$

Sendo,

$\{\varphi_j\}$ = autovetor associado a i -ésima frequência natural do sistema;

ω_i = i -ésima frequência natural, $rad. s^{-1}$;

t = tempo, s .

$$(\omega^2[M] + [K])\{\varphi_j\} = \{0\} \quad (4)$$

Para a cálculo dos autovalores e autovetores foi utilizado o método numérico do Subespaço (*Subspace Method*), o qual é aplicável a diversos problemas de engenharia, quando se tem a combinação de elementos sólidos, permitindo a extração de um número elevado de modos de vibração, com uma taxa de convergência rápida e relativa necessidade de memória. Este método emprega uma estratégia automatizada de troca combinada com a checagem de sequência de Sturm, para extrair o número de autovalores requisitados (ANSYS Inc., 1996).

Considerando que o sistema fruto ráquila da macaúba apresenta uma grande variabilidade em suas propriedades físicas, geométricas e mecânicas e que o efeito dessa variabilidade pode alterar a resposta dinâmica do sistema quando submetido a vibrações mecânicas, faz-se necessário o uso de ferramentas estocásticas para o estudo das propriedades modais do sistema.

Para o estudo da influência da variação das propriedades físicas e mecânicas na resposta dinâmica da macaúba foi empregado o método de Monte Carlo. Tal método consiste na modelagem do problema por meio de funções de densidade de probabilidades, a partir de números aleatórios distribuídos. Para analisar o efeito das variações nos parâmetros modais do sistema fruto-ráquila, o módulo de elasticidade e a massa específica da ráquila foram variados em 5, 10 e 15% a partir de um valor médio da propriedade. Assumindo-se que as propriedades selecionadas foram descritas por uma distribuição de probabilidade normal, as propriedades modais do sistema foram obtidas a partir de valores aleatórios do módulo de elasticidade e massa

específica usando o Método de Monte Carlo com o auxílio de um programa computacional para o Método de Elementos Finitos.

Foram extraídas as 6 primeiras frequências naturais e seus respectivos modos de vibração, sendo avaliada a 5ª frequência natural (modo pendular) e seus respectivos desvios padrões.

Para a análise dos dados, em termos dos acessos e estádios de maturação, foi aplicada uma análise estatística descritiva considerando frequências mínimas, médias e máximas de todos os acessos estudados para os dois estádios de maturação.

Posteriormente, representações gráficas foram realizadas objetivando-se a sistematização dos resultados obtidos, o que permitiu a comparação entre os acessos estudados, bem como, os estádios de maturação avaliados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram executadas 2500 simulações para cada acesso e para cada estágio de maturação, as quais resultaram em um conjunto com 2500 frequências em cada cenário estudado, com seus respectivos desvios padrão.

Para o estágio imaturo e diferentes acessos foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3, referente ao 5º modo de vibração (modo pendular).

Tabela 3: Resultados das simulações para o estágio imaturo considerando a 5a frequência natural para os virentes acessos avaliados.

Acessos/Frequências	Frequência mínima (Hz)	Frequência média (Hz)	Frequência máxima (Hz)	Desvios padrão (Hz)
BD40	19.62	23.15	26.84	1.61
BGP29	17.88	21.73	26.00	1.86
BD27	17.50	20.80	24.24	1.49
BGP5	10.67	14.75	18.75	2.16

Fonte : Autor 2021

A partir da Tabela 3, observa-se que as frequências naturais para o estágio imaturo, associadas ao 5º modo de vibração, considerando os 4 acessos, encontram-se em um intervalo entre 10.67 Hz a 26.84 Hz.

Para o estágio maduro e os diferentes acessos foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4, referente ao 5º modo de vibração (modo pendular)

Tabela 4: Resultados das simulações para o estádio Maduro considerando a 5a frequência natural para os virentes acessos avaliados.

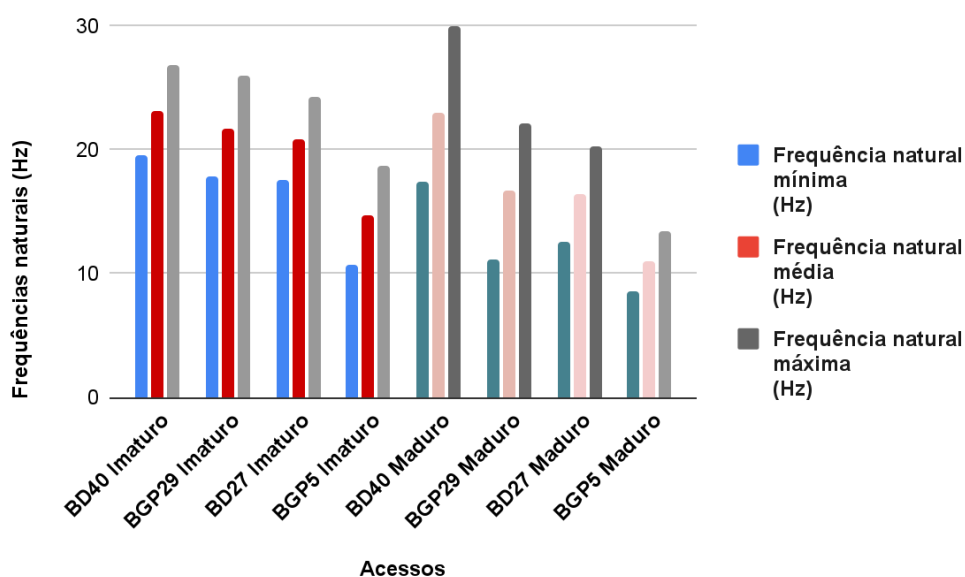
Acessos/Frequências	Frequência mínima (Hz)	Frequência média (Hz)	Frequência máxima (Hz)	Desvios padrão (Hz)
BD40	17.48	23.04	29.29	2.64
BGP29	11.18	16.65	22.19	2.84
BD27	12.58	16.40	20.33	1.92
BGP5	8.58	10.99	13.44	1.20

Fonte : Autor 2021

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, observa-se que no estádio maduro as frequências naturais se encontram entre 8.58 Hz a 29.29 Hz, considerando os 4 acessos.

Na Figura 3 é apresentada uma sistematização dos resultados em termos das frequências mínimas, médias e máximas determinadas durante as simulações. Adicionalmente, foram agrupados os valores de frequência mínima, média e máxima para cada acesso estudado, considerando os diferentes estádios de maturação avaliados.

Figura 3: Valores de frequência mínima, média e máxima para cada acesso estudado, considerando os diferentes estádios de maturação avaliados

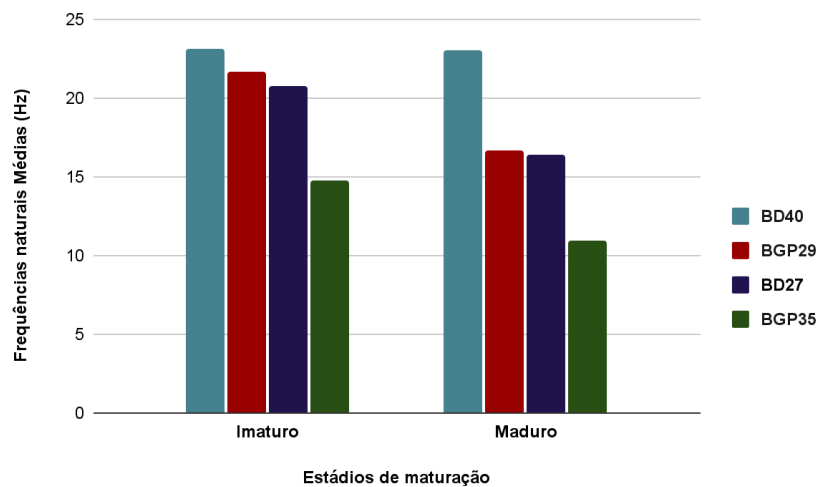


Fonte: Autor (2021)

Outros trabalhos envolvendo a colheita por vibrações mecânicas encontraram faixas de frequências naturais semelhantes, para outras culturas. COELHO et al. (2016) ao modelar o sistema fruto-pedúnculo e ramo do cafeeiro pela técnica de elementos finitos estocásticos encontrou os valores de frequências fundamentais em uma faixa entre 14.00 Hz a 21.30 Hz. SANTOS et al. (2015) para o sistema fruto-pedúnculo do ramo da planta de café encontrou valores de frequências naturais entre 19.90 Hz e 297.30 Hz para a variedade Catuaí Vermelho e 20.60 Hz e 302.20 Hz para a variedade Mundo Novo, ambos em diferentes estádios de maturação.

Na Figura 4 é apresentada uma comparação entre as frequências médias encontradas para cada acesso estudado, considerando os dois estádios de maturação.

Figura 4: Comparação entre as frequências médias encontradas para cada acesso estudado, considerando os dois estádios de maturação.



Fonte:Autor (2021)

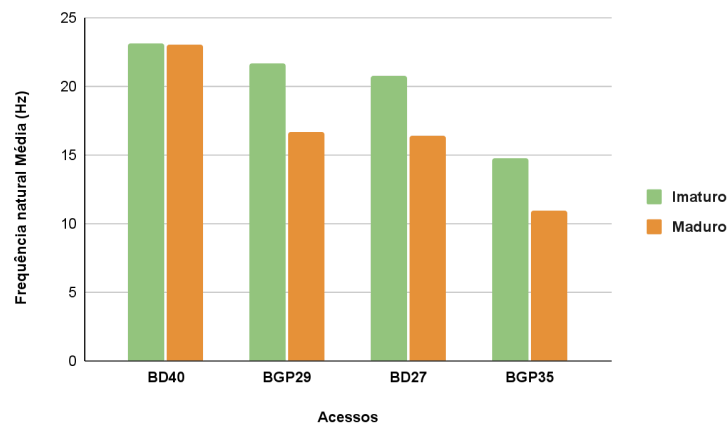
A partir dos resultados apresentados na Figura 4 é possível observar que as frequências médias tendem a diminuir à medida em que o estágio de maturação evolui, exceto para o acesso BD40. Comportamento similar tem sido observado em outros trabalhos como com materiais biológicos. COELHO et al. (2016) modelaram o sistema fruto-pedúnculo do café e observaram o mesmo comportamento. Segundo VELLOSO (2016), a variação no valor das frequências naturais para os diferentes estádios de maturação auxilia no desenvolvimento do processo de

colheita seletiva. Máquinas que usam o princípio de vibrações mecânicas podem ser ajustadas em diferentes vibrações a fim de derriçar apenas frutos na maturação desejada.

Observou-se também que os acessos BGP29 E BD27 apresentam frequências médias bem próximas considerando os dois estádios de maturação (Figura 4). No entanto, ao comparar os acessos BD40 E BGP35, nota-se um intervalo maior entre as frequências médias considerando os dois estádios de maturação. Essas diferenças de intervalos podem ser explicadas considerando a grande variabilidade que o sistema fruto ráquila pode apresentar de uma região para a outra.

Por meio dos resultados obtidos, os acessos considerados no estudo, foram comparados observando-se os dois estádios de maturação, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Comparação entre as frequências médias encontradas para cada estágio de maturação estudado, considerando os quatros acessos.



Fonte: Autor (2021)

Analisando o acesso BD40, observa-se que as frequências naturais médias se encontram em um intervalo de (21.54Hz -24.76 Hz) e (20.40 Hz-25.68Hz) considerando os desvios padrão para os estádios de maturação imaturo e maduro, respectivamente. Neste acesso, é possível observar que o resultado não é satisfatório para a colheita seletiva de frutos, visto que há uma sobreposição das frequências encontradas.

Já no acesso BGP29, as frequências naturais médias se encontram em um intervalo de (19.87 Hz-23.59Hz) e (13.81 Hz - 19.49 Hz) considerando os desvios padrão para os estádios de maturação imaturo e maduro, respectivamente. Neste acesso, é possível observar um resultado

mais satisfatório visto que as frequências médias não se sobrepõem, apresentando um intervalo entre as frequências de aproximadamente 0.38 Hz.

No acesso BD27 , as frequências naturais médias se encontram em um intervalo de (14.48 Hz - 18.32 Hz) e (19.31 Hz-22.29Hz) considerando os desvios padrão para os estádios de maturação maduro e imaturo, respectivamente. Similar ao acesso anterior, às frequências médias não se sobrepõem apresentando um intervalo maior entre as frequências de aproximadamente 0.99 Hz.

E por fim, no acesso BGP35, as frequências naturais médias se encontram em um intervalo de (9.79 Hz - 12.19 Hz) e (12.59 Hz-16.91Hz) considerando os desvios padrão para os estádios de maturação maduro e imaturo, respectivamente. O resultado para esse acesso também se mostrou satisfatório, visto que os intervalos de frequências não se sobrepuseram e apresentaram um intervalo entre as frequências de aproximadamente 0.40 Hz.

E no caso da avaliação dos acessos de forma individual, ainda que, em três acessos a sobreposição de frequências não ocorra, os intervalos apresentados entre os dois estádios de maturação são muito curtos, tornando-se também inviável a colheita seletiva. De acordo com Velloso (2021), os responsáveis pelo desprendimento dos frutos não são apenas as faixas de frequências, o qual também pode ser influenciado pelas amplitudes e níveis de energia. Desta forma, pode-se alcançar melhores resultados alterando-se outros parâmetros da máquina.

No caso de algumas culturas como a macaúba e o café , a colheita seletiva é desejável, visto que se faz necessário a colheita de frutos com maturação específica, para a fabricação de determinados produtos. A colheita seletiva dos frutos da macaúba apresenta grandes vantagens quando comparada à colheita que vem sendo executada atualmente. Por isso, a colheita mecanizada a partir de vibrações mecânicas surge como uma grande alternativa. Com isso , se torna extremamente importante o estudo das propriedades modais deste sistema, sendo necessário levar em consideração a grande variabilidade de suas propriedades geométricas, físicas e mecânicas.

A colheita do café tem sido realizada de forma eficiente por vibrações mecânicas (FERREIRA JUNIOR et al., 2016), este processo emprega máquinas que transmitem energia

vibracional às plantas promovendo o desprendimento dos frutos (SANTOS et al., 2010a, b; VILLIBOR et al., 2019).

No entanto, já existem outros estudos que também acreditam que a colheita de frutos da macaúba pode ser realizada por vibração mecânica. De acordo com Grupioni et al. (2020), o princípio da vibração mecânica é aplicável para colheita de frutos da macaúba, que pode ser comprovada pela eficiência operacional acima de 90 % no processo de colheita. Este cenário enfatiza a importância de estudar o comportamento dinâmico da ráquila de macaúba sistemas visando projetos de máquina otimizados (GRUPIONI et al., 2018)

4 CONCLUSÕES

A partir da realização de simulações executadas durante este trabalho, com o auxílio de ferramentas estocásticas para minimizar os efeitos da variabilidade do sistema, pode-se concluir que:

- As frequências naturais simuladas para o estágio de maturação imaturo se encontram em um intervalo entre 10.67 Hz a 26.84 Hz, considerando os acessos: BD40,BGP29,BD27,BGP35.
- As frequências naturais simuladas para o estágio de maturação maduro se encontram em um intervalo entre 8.58 Hz a 29.29 Hz, considerando os 4 acessos estudados.
- Houve uma sobreposição de frequências o que torna a colheita seletiva inviável.

As frequências naturais tendem a diminuir à medida em que o fruto amadurece, exceto no acesso BD40.

- Máquinas que usam o princípio de vibrações mecânicas podem ser ajustadas em diferentes vibrações a fim de derriçar apenas frutos na maturação desejada.

Outro fator interessante a ser observado é a diferença dos valores encontrados quando se compara os 4 acessos. Isso pode ser explicado devido a grande variabilidade que o sistema fruto-ráquila pode apresentar.

Novos estudos sobre o comportamento dinâmico do sistema fruto ráquila da macaúba, em busca de resultados mais satisfatórios, visando a colheita seletiva, podem ser realizados, considerando de uma maneira mais efetiva a variabilidade do mesmo, podendo alterar, por exemplo, as condições de contorno e até mesmo os métodos escolhidos para a determinação das variáveis. Em decorrência dessas possíveis alterações, a resolução do problema tende a ficar mais complexo, tornando-se necessário meios que diminuam o custo computacional.

O resultado deste trabalho serviu como base para o desenvolvimento de um novo estudo , o qual apresentou um conjunto de resultados mais aprofundados. O trabalho gerou um artigo, o qual foi publicado na revista científica Computers and Electronics in Agriculture (<https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106099>).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, E. L. **Investigação sobre a variabilidade da resposta dinâmica de painéis reforçados**. Campinas: UNICAMP, 2005. 72p. Dissertação Mestrado ANSYS Inc., **ANSYS Theory Reference**, Houston, PA, 1996.

ANP. (2016); **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. “Biodiesel”**. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em janeiro de 2021.

AMARAL, F. P.; et al. "**Extração e caracterização qualitativa do óleo da polpa e amêndoas de frutos de macaúba** [Acrocomia Aculeata (Jacq) Lodd. Ex Mart]- Coletada na região de Botucatu-SP". *Energia Na Agricultura*. Vol. 26, n. 1, p. 12 – 20, 2011. DOI: 10.17224/EnergAgric.2011v26n1p12-20.

CARVALHO, K.J.; et al. **Ecologia, manejo, silvicultura e tecnologia da macaúba**. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa, 2011.

CIRO, H. J. Coffee harvesting: I. **Determination of the natural frequencies of the fruit stem system in coffee trees**. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 475-479, 2001.

COELHO, Andre Luiz de Freitas, M. Sc. **Dynamic behavior of coffee fruit-stem-branch system subject to mechanical vibrations**. Viçosa, 2014.

COELHO, A. L. de F.; Santos, F. L.; Queiroz, D. M. de; Pinto, F. de A. de C. **Dynamic behavior of the coffee fruit-stem-branch system using stochastic finite element method**. *Coffee Science*, v. 11, n. 1, p. 1-10. 2016.

ERDOGAN, D. et al. **Mechanical harvesting of apricots**. *Biosystems Engineering*, Bedford, v. 85, n. 1, p. 19-28, 2003

EVARISTO, A. B.; MARTINO, D. C.; FERRAREZ, A. H.; DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; GROSSI, J. A. S. **Energy potential of the macaw palm fruit residues and their use in charcoal production**. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 571-577, 2016.

FERRARI, R. A.; AZEVEDO FILHO, J. A. **Macauba as promising substrate for crude oil and biodiesel production**. *Journal of Agricultural Science and Technology*, v. B, n. 2, p. 1119-1126, 2012.

FERREIRA JUNIOR, L.G.; SILVA, F.M.; FERREIRA, D.D.; SALES, R.S. **Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras**. *Ciência Rural*, v.46, n.2, p.273-278, 2016.

GIRARDI, J.S. **Produção de Biodiesel por Processo não Catalítico com Etanol Supercrítico a partir do Óleo de Tungue (Vernicia fordii) Bruto e in situ**. 2015.197f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)- Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2015.

GRUPIONI, Christina Maria de Freitas; SANTOS, Fábio Lúcio; FERNANDES, Haroldo Carlos; VALENTE, Domingos Sarvio Magalhães; PINTO, Francisco de Assis de Carvalho **Development and evaluation of operational performance of macaw fruits semi-mechanized harvester by means mechanical vibrations principle** Semina: Ciências Agrárias, vol. 39, no. 2, 2018, March-April, pp. 497-510 Universidade Estadual de Londrina

GRUPIONI, Christina Maria de Freitas; SANTOS, Fábio Lúcio; FERNANDES, Haroldo Carlos; VALENTE, Domingos Sarvio Magalhães; PINTO, Francisco de Assis de Carvalho. **Macaw palm supply chain: Evaluation of a semi-mechanized fruit harvesting system**. Industrial Crops and Products, Volume 151, 2020.

HALTON, John H. “**A Retrospective and Prospective Survey of the Monte Carlo Method.**” *SIAM Review*, vol. 12, no. 1, Society for Industrial and Applied Mathematics, 1970, pp. 1–63, <http://www.jstor.org/stable/2029039>.

HENDERSON, A.; Galeano, G.; Bernal, R. **Field guide to the palms of the Americas**, Princeton University, p.166 – 167, 1995

LEITE, Rogério Cezar de Cerqueira; LEAL, Manoel Régis L. V. **O biocombustível no Brasil**. Scielo Brasil, <https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000200003>, p. 5, 22 out. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000200003>. Acesso em: 7 dez. 2020.

MME. (2017); **Ministério de Minas e Energia**. “**Anuário Estatístico Brasileiro**”. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em janeiro de 2020.

MME. (2019); **Ministério de Minas e Energia**. “**Anuário Estatístico Brasileiro**”. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em janeiro de 2020.

MONTOYA, Sebastián Giraldo. **Ecofisiologia e produtividade de Brachiaria decumbens em sistema silvipastoril com macaúba**. 2016. 93f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

NUNES, A. A.; FAVARO, S. P.; GALVANI, F.; MIRANDA, C. H. B. **Good practices of harvest and processing provide high quality Macauba pulp oil**. *European Journal of Lipid Science and Technology*, v. 117, n. 12, p. 2036-2043, 2015.

PAULA, Renato Ricardo. **Método de Monte Carlo e Aplicações**– Volta Redonda - RJ, 81 p, 2014.

PEZZI, F.; CAPRARA, C. **Mechanical grape harvesting: investigation of the transmission of vibrations**. Biosystems Engineering, Bedford, v. 103, n. 3, p. 281-286, 2009.

PIMENTEL, L. D.; DIAS, L. A. dos S.; PAES, J. M. V.; SATO, A. Y.; MOTOIKE, S. Y.. **Diversidade no gênero Acrocomia e proposta de subdivisão da espécie Acrocomia aculeata**. Informe Agropecuário, v. 32, n. 265, p. 81-87, 2011.

POLAT, R. et al. **Mechanical harvesting of pistachio nuts**. Journal of Food Engineering, Pullman, v. 79, n. 4, p. 1131-1135, 2007.

PRESS, WH, SA Teukolsky, WT Vetterling & BP Flannery: *Receitas numéricas em C: A arte da computação científica*. Segunda edição. Cambridge University Press.1992

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. Third edition. New York, EUA. Addison-Wesley Publishing Company, 1995. 912p.

SANDERS, K. F. **Orange harvesting systems review**. Biosystems Engineering, Bedford, v. 90, n. 2, p. 115-125, 2005.

SANTOS, F. L. et al. **Efeito da frequência e amplitude de vibração sobre a derriça de frutos de café**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 4, p. 425-431, 2010a

SANTOS, F. L.; QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M. ; Coelho, A. L. F. . **Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method**. Acta Scientiarum. v. 37, p. 11-17, 2015.

SESSIZ, A.; OZCAN, M. T. **Olive removal with pneumatic branch shaker and abscission chemical**. Journal of Food Engineering, Pullman, v. 76, n. 2, p. 148-153, 2006

SILVA, W. L.G., et al. **"Binary Blends of Biodiesel from Macauba"**. Journal of the Brazilian Chemical. Vol. 29, n 2, p. 240-247, 2018. DOI: 10.21577/0103- 5053.20170134.

SOUZA, C. M. A.; QUEIROZ, D. M.; RAFULL, L. Z. D. **Derriçadora portátil na colheita total e seletiva de frutos do cafeeiro**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 41, n. 11, p. 1637-1642, 2006.

STEFANOU, G. **The stochastic finite element method: Past, present and future**. *Computer Methods Applied Mechanics and Engineerings*, 198(9-12), 1031-1051. DOI: 10.1016/j.cma.2008.11.007, 2009.

TAPLAK, H.; PARLAK, M. **Evaluation of gas turbine rotor dynamic analysis using the finite element method.** *Measurement*, v.45, p.1089-1097, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.032>

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. Biblioteca Universitária. **Manual de normalização e estrutura de trabalhos acadêmicos: TCCs, monografias, dissertações e teses.** 3. ed. rev., atual. e ampl. Lavras, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/11017>. Acesso em: 29 set. 2021.

VELLOSO, Nara Silveira. **Propriedades físicas e comportamento dinâmico do sistema fruto-ráquila da macaúba (Acrocomia aculeata).** 2016. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

VELLOSO, N.; SANTOS, F.; PINTO, F.; VILLAR, F.; VALENTE, D. **Propriedades mecânicas do sistema fruto-ráquila de macaúba.** *Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)*, v. 47, n. 2, p. p. 218-225, 25 jul. 2017.

VELLOSO, Nara Silveira; SANTOS, Fabio Lúcio; MARQUES, Deisenara Siqueira; SCINOCCA, Francisco; VILLAR, Flora Maria de Melo. **Modal properties of macaw palm fruit-rachilla system: An approach by the stochastic finite element method (SFEM).** *Computers and Electronics in Agriculture*, [S. l.], p. 9, 27 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106099>. Acesso em: 20 jul. 2021.

VILLAR, F. M. de M. **Propriedades físicas, geométricas, mecânicas e modais do sistema fruto-ráquila da macaúba.** Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa. 2016. 87 p. Tese de doutorado.

VILLIBOR, G. P., Santos, F. L., Queiroz, D. M., Khoury Júnior, J. K., & Pinto, F. A. C. **Determination of modal properties of the coffee fruit-stem system using high speed digital video and digital image processing.** *Acta Scientiarum. Technology*, 38(1), 41-48. DOI: 10.4025/actascitechnol.v38i1.27344, 2016.

