



MIGUEL ÁNGEL DÍAZ HERRERA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO
PARA O DESPRENDIMENTO SELETIVO DE FRUTOS DO
CAFEEIRO**

LAVRAS - MG

2021

MIGUEL ÁNGEL DÍAZ HERRERA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO PARA O
DESPRENDIMENTO SELETIVO DE FRUTOS DO CAFEIEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva
Orientador

LAVRAS-MG
2021

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Herrera, Miguel Ángel Díaz.

Desenvolvimento e avaliação de um mecanismo para o
desprendimento seletivo de frutos do cafeeiro / Miguel Ángel Díaz
Herrera. - 2020.

79 p. : il.

Orientador(a): Fábio Moreira da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2020.
Bibliografia.

1. Colheita seletiva. 2. Semimecanização. 3. Cafeicultura. I. da
Silva, Fábio Moreira. II. Título.

MIGUEL ÁNGEL DÍAZ HERRERA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM MECANISMO PARA O
DESPRENDIMENTO SELETIVO DE FRUTOS DO CAFEIEIRO**

**DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A MECHANISM FOR THE SELECTIVE
DETACHMENT OF COFFEE FRUITS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Máquinas e Mecanização Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Aprovada em 25 de Novembro de 2020.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato	UFLA
Prof. Dr. Fábio Lucio Santos	UFLA
Prof. Dr. Henrique Leandro Silveira	UFLA
Prof. Dr. Daniel Marçal de Queiroz	UFV

Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva

Orientador

LAVRAS-MG

2021

Ao bom Deus, quem nos dá força para fazer o nosso “melhor possível”.

À minha mãe Gloria Amparo (*in memoriam*) pelo colo que me concedeu uma feliz infância.

A meu pai Luis Ángel pelo exemplo de vida honesta.

À minha esposa Milena pelo amor e apoio constante.

Aos meus filhos Sarita e Luis pela alegria no lar.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras por oportunizar minha formação doutoral.

À *Universidad Surcolombiana* pela concessão aos Estudos de Doutorado.

Ao meu colega e amigo, Nelson Gutiérrez Guzmán, pela amizade e apoio para iniciar o meu doutorado.

Ao professor Fábio Moreira da Silva pelos ensinamentos e amizade.

Ao professor Carlos Eduardo Silva Volpato pelo acolhimento e apoio nos trabalhos acadêmicos.

Ao professor Fábio Lúcio Santos pela amizade e ajuda com a Estatística Experimental.

Aos colegas discentes da linha de pesquisa em Maquinaria e Mecanização Agrícola: Rafael Oliveira Faria, Marco Antônio Zanella, Diogo Tubertini Maciel e Nicolás Pereira de Souza, pela oportunidade de acompanhar parte dos seus experimentos e pela ajuda no meu próprio experimento.

Aos cafeicultores: Cleuton Adenir Correia e José Ranulfo (sítio São Sebastião, Carvalhópolis, MG); Juan Cubillos (*finca La Florida, Gigante, Huila*); Luis Eduardo Ramírez (*finca Buenos Aires, Salento, Quindio*); Flávio Carvalho e Thiago Carvalho (Fazenda Cafua, Ijaci, MG); Dr. Josué Figueiredo e Lucas Figueiredo (Fazenda Bom Jardim, Bom Sucesso, MG); Fabiano Vilela (Fazenda Colina, Luminárias, MG), por terem disponibilizado as suas lavouras para os experimentos de meu doutorado.

Aos técnicos administrativos do Departamento de Engenharia Agrícola: Helem Cristina do Carmo, pela oportuna ajuda nos procedimentos administrativos; Éder Furtado Costa, Pedro Severo da Silva e Silas Sebastião Domingues, sempre prontos para me ajudar na montagem dos meus projetos.

Aos meus irmãos de lenço do 22º Grupo Escoteiro Acauã, pela amizade e carinho dispensados.

Ao povo brasileiro, belamente representado pelos habitantes de Lavras, pela acolhida em seus corações e pela ajuda aos estrangeiros, como eu e minha família e nos permitir morar gostosamente entre vocês e aproveitar um sistema educativo exemplo para o mundo.

Muito obrigado!

RESUMO

A colheita seletiva de frutos maduros de café se justifica na produção de cafés finos, considerando ainda que os frutos imaturos que ficam nas plantas, após cada colheita seletiva, conseguem chegar ao estágio ótimo de maturação, para colheita posterior. Focando a colheita seletiva em pequenas glebas e ou lavouras de declividades mais elevadas, os sistemas de colheita disponíveis são o manual e o semimecanizado (máquinas portáteis). O sistema manual seletivo, no entanto consegue uma seletividade próxima de 100%, porém apresenta limitações pelo alto custo e baixa oferta de mão de obra. Para o sistema semimecanizado, a tecnologia oferecida comercialmente foi desenvolvida para a colheita plena e não seletiva. A procura de uma alternativa semimecanizada, para a colheita seletiva de frutos de café, levou aos objetivos deste trabalho, com desenvolvimento de soluções de um mecanismo portátil, mediante metodologia de projeto conceitual de engenharia e avaliação científica dessas soluções, com experimentos de campo de lavouras localizadas no Brasil e na Colômbia. Foram desenvolvidas quatro soluções conceituais que foram avaliadas mediante delineamento experimental inteiramente casualizado, determinando as variáveis resposta: eficácia de seletividade, eficácia de desprendimento, capacidade de produção efetiva, volume total desprendido e danos causados às plantas. A metodologia de projeto conceitual mostrou-se útil ao desenvolvimento objetivo e estruturado das soluções propostas. A melhor das soluções desenvolvidas no projeto conceitual, apresentou eficácia de seletividade de 92% para a frequência de 40Hz. A eficácia de desprendimento média foi de 33%, chegando a 52% do volume total de frutos maduros nas plantas, na frequência de 42Hz. A capacidade produtiva foi de 28,4 Litros por hora, também para a frequência de 42Hz e os danos causados às plantas foi de 91 a 125 gramas de folhas e ramos destacados, para as frequências de 40 a 42Hz. A simplicidade do mecanismo desenvolvido permitiu a fácil e rápida alteração das frequências e amplitudes nos ensaios de campo.

Palavras-chave: Cafeicultura. Semimecanização. Colheita Seletiva.

RESUMEN

La cosecha selectiva de frutos de café maduros, se justifica en la producción de cafés finos, considerando que los frutos inmaduros que quedan en las plantas, luego de cada cosecha selectiva, logran alcanzar la etapa óptima de maduración para posterior cosecha. Centrándose en la recolección selectiva en pequeñas parcelas o en cultivos en alta pendiente, los sistemas de recolección disponibles son: manuales y asistidos (máquinas portátiles). El sistema manual selectivo, logra una selectividad cercana al 100%, pero sin embargo, tiene limitaciones debido a su alto costo y baja oferta de mano de obra. Para el sistema asistido, la tecnología ofrecida comercialmente fue desarrollada para una cosecha completa y no selectiva. La búsqueda de una alternativa asistida para la cosecha selectiva de frutos de café, llevó a los objetivos de este trabajo, con el desarrollo de soluciones para un mecanismo portátil, a través de una metodología de diseño de ingeniería conceptual y evaluación científica de las soluciones obtenidas, con experimentos de campo sobre cultivos ubicados en Brasil y Colombia. Se desarrollaron y evaluaron cuatro soluciones conceptuales, a través de un diseño experimental completamente aleatorizado, determinando las variables respuesta: eficacia de selección, eficacia de desprendimiento, capacidad de producción efectiva, volumen total desprendido y daño causado a las plantas. La metodología de diseño conceptual resultó útil para el desarrollo objetivo y estructurado de las soluciones propuestas. La mejor solución desarrollada en el diseño conceptual, presentó una eficacia de selectividad del 92% para una frecuencia de 40Hz. La eficacia de desprendimiento promedio fue del 33%, alcanzando el 52% del volumen total de frutos maduros en las plantas, a una frecuencia de 42Hz. La capacidad productiva fue de 28,4 litros por hora, también a una frecuencia de 42Hz y el daño causado a las plantas fue de 91 a 125 gramos de hojas y ramas desprendidas, para frecuencias de 40 a 42Hz. La simplicidad del mecanismo desarrollado permitió un cambio fácil y rápido de frecuencias y amplitudes en las pruebas de campo.

Palabras clave: Caficultura. Cosecha Asistida. Cosecha selectiva.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Derrivadora portátil de café utilizada no Brasil.....	16
Figura 2 - Etapas realizadas na elaboração da lista de requisitos.....	25
Figura 3 - Etapas para o desenvolvimento de projeto conceitual.	30
Figura 4 - Função global (a) e subfunções (b) do mecanismo para desprendimento seletivo de café; E= energia, M = massa e S = sinal.....	40
Figura 5 - Representação esquemática das combinações de princípios de solução para atender a solução global “desprendimento seletivo de café”	50
Figura 6 - Protótipos desenvolvidos para as soluções: 1 e 2, (a) e 3 e 4, (b).....	51
Figura 7 - Mecanismo adaptado para as soluções 1 e 2.....	52
Figura 8 - Ferramentas de desprendimento das soluções 1 e 2: montagem na máquina (a); posicionamento quanto aos frutos do cafeeiro (b); solução 1 (c) e solução 2 (d)....	54
Figura 9 - Configuração do protótipo para as soluções 3 e 4 (a) e ferramenta de desprendimento montada no suporte (b).....	55
Figura 10 - Ponta flexível e suporte das massas desbalanceadas para as soluções 3 e 4.....	56
Figura 11 - Hastes de desprendimento para as soluções 3 (a) e 4 (b).....	56
Figura 12 - Transmissão de vibração para o ramo do cafeeiro das soluções 3 e 4.....	57
Figura 13 - Comportamento observado e estimado de eficácia de desprendimento, para a solução 4 (SISVAR v. 5.6).....	71
Figura 14 - Comportamento observado e estimado da capacidade de produção efetiva, para a solução 4 (SISVAR v. 5.6).....	73
Figura 15 - Comportamento observado e estimado da variável resposta danos, para a solução 4 (SISVAR v. 5.6).....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados de algumas pesquisas orientadas ao desprendimento seletivo de frutos de café.....	19
Quadro 2 - Linha-mestra com listas de características principais.....	23
Quadro 3 - Passos para a obtenção do geral e o principal de uma tarefa.....	26
Quadro 4 - Definição dos critérios para a avaliação de princípios de funcionamento.....	27
Quadro 5 - Parâmetros medidos e avaliados nos ensaios de campo	31
Quadro 6 - Primeira lista de requisitos para mecanismo de desprendimento seletivo de café..	35
Quadro 7 - Lista de requisitos para o mecanismo de desprendimento seletivo de café, elaborado segundo a técnica da linha mestra.....	36
Quadro 8 - Lista de requisitos para o mecanismo de desprendimento seletivo de café.	37
Quadro 9 - Procedimento de abstração para a lista de requisitos do mecanismo de desprendimento seletivo de café.....	39
Quadro 10 - Classificação das alternativas de solução de subfunções do mecanismo para desprendimento seletivo de café.	42
Quadro 11 -Resultados da avaliação dos princípios de funcionamento propostos.	46
Quadro 12 - Alternativas de solução para subfunções codificadas em “matriz morfológica”.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores das cotas e dos deslocamentos associados às soluções 1 e 2.....	53
Tabela 2 - Valores das dimensões internas para as soluções 1 e 2.....	54
Tabela 3 - Eficácia de seletividade para a solução 1, com amplitude de 13,2° e frequências de 27; 30; 35 e 40 Hz (SISVAR v. 5.6).	59
Tabela 4 - Volume total desprendidos para a solução 1, com amplitude de 13,2° e frequências de 27; 30; 35 e 40 Hz (SISVAR v. 5.6)	59
Tabela 5 - Eficácia de seletividade para a solução 2, com amplitude de 6,6° e frequências de 40; 42 e 45 Hz (SISVAR v. 5.6.....	60
Tabela 6 - Volume total desprendido para a solução 1, com amplitude de 6,6° e frequências de 40; 42 e 45 Hz (SISVAR v. 5.6).....	60
Tabela 7 - Eficácia de seletividade para a solução 1, com amplitudes de 6,6° e 13,2° e frequência de 40 Hz e (SISVAR v. 5.6).....	61
Tabela 8 - Volume total desprendido para a solução 1, com amplitudes de 6,6° e 13,2° e frequência de 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	61
Tabela 9 - Eficácia de seletividade para a solução 4, com massas desbalanceadas 4, 5 e 6 e frequência de 40Hz. (SISVAR v. 5.6).....	63
Tabela 10 - Volume total desprendido para a solução 4, com massas desbalanceadas 4, 5 e 6 e frequência de 40 Hz. (SISVAR v. 5.6.....	63
Tabela 11 - Eficácia de seletividade para as soluções 1 e 2, com frequências de 27 e 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	65
Tabela 12 - Volume total de frutos desprendidos para as soluções 1 e 2, com frequências de 27 e 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	65
Tabela 13 - Eficácia de seletividade das soluções 3 e 4, com frequências de 30; 40 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	67
Tabela 14 - Eficácia de desprendimento das soluções 3 e 4, com frequências de 30; 40 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	67
Tabela 15 - Eficácia de seletividade das soluções 1 e 4, com frequências de 30; 35 e 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	68
Tabela 16 - Eficácia de desprendimento das soluções 1 e 4, com frequências de 30; 35 e 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	69
Tabela 17 - Eficácia de seletividade da solução 4, com frequências de 27; 30; 35; 40; 42 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	70
Tabela 18 - Eficácia de desprendimento da solução 4, com frequências de 27; 30; 35; 40; 42 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	71
Tabela 19 - Capacidade de produção efetiva da solução 4, com frequências de 27; 30; 35; 40; 42 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).....	72
Tabela 20 - Danos causados pela solução 4, com frequências de 27; 30; 35; 40; 42 e 45 Hz (SISVAR v. 5.6).....	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Generalidades	15
2.2	Colheita seletiva de café	18
2.3	Projeto conceitual	21
2.3.1	Esclarecimento do problema e elaboração da lista de requisitos	22
2.3.2	Identificação dos principais problemas e elaboração da estrutura de função	25
2.3.3	Proposição, seleção e combinação de princípios de funcionamento para a constituição de estruturas de funcionamento	27
2.3.4	Avaliação e seleção das soluções	28
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Projeto conceitual	29
3.2	Delineamento estatístico	30
3.2.1	Calibração das máquinas	32
3.2.2	Seleção da melhor solução	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	Projeto conceitual	34
4.1.1	Esclarecimento do problema e elaboração da lista de requisitos	34
4.1.2	Identificação dos principais problemas e elaboração da estrutura de função	39
4.1.3	Proposição, seleção e combinação de princípios de funcionamento, para a constituição de estruturas de funcionamento	41
4.1.4	Avaliação e seleção das soluções para materialização	50
4.1.5	Materialização das soluções	50
4.2	Calibração das máquinas	58
4.3	Análise das soluções “1 - 2” e “3 - 4”	63
4.4	Otimização da melhor solução	70
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, assim como em outros países, o café é a base da economia para muitas famílias que vivem em áreas de encostas, onde uma boa parte das culturas estão localizadas em pendentes do 30% ou mais, as quais são dificilmente acessíveis, para serem trabalhadas com colhedoras mecânicas, tanto pelo próprio fato da sua declividade quanto pelo seu tamanho reduzido. Importante destacar que a maior parte dos cafés de qualidade diferenciada provém de regiões de montanha cuja altitude e o sombreamento parcial, pela própria declividade da topografia, provêm condições ótimas para o seu desenvolvimento.

Tradicionalmente nos países produtores de café da América Latina, à exceção do Brasil, a colheita é feita seletivamente à mão. A alta eficácia do trabalho braçal, na seleção de frutos de café que devem ser colhidos (somente frutos maduros, passas e secos), permite, além de contribuir à preservação dos atributos de qualidade, deixar nas plantas as flores e os frutos, para continuar os seus processos fisiológicos até atingir a maturidade de colheita e evitar o desfolhamento excessivo dos cafeeiros, todo o anterior em benefício da produtividade.

Contudo a colheita manual seletiva de café apresenta algumas desvantagens operacionais, econômicas e sociais, as quais se têm convertido em gargalos operacionais para muitos produtores, destacando-se:

- Baixa capacidade de produção efetiva, o que torna a colheita o maior fator dos custos do processo produtivo do café. Essa baixa capacidade também significa grande esforço de logística por parte do produtor, pelo elevado número de trabalhadores necessário nas épocas de colheita;
- O fenômeno da migração rural, para os centros urbanos nos últimos anos, reduziu a disponibilidade de mão de obra, especialmente, para operações como a colheita do café, que exigem um grande número de trabalhadores concentrados num curto período (aproximadamente, oito semanas por região, no Brasil), com o agravante da simultaneidade nas diferentes regiões produtoras e ainda com a demanda de outras culturas como a cana de açúcar.

Pelo anterior, torna-se necessária a realização de trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, com o intuito de conseguir oferecer aos cafeicultores tecnologias semimecanizadas para a colheita seletiva de frutos de café, que permitam aumentar o rendimento da mão de obra disponível.

Atualmente, no Brasil, na produção de cafés de qualidade diferenciada, sejam eles Superior, Gourmet ou Especiais, muitos dos quais provêm de culturas de montanha, está sendo utilizada a colheita manual seletiva, a qual se justifica economicamente no preço de venda diferenciado para esse tipo de cafés, o que também acontece nos demais países produtores de café arábica, como Colômbia, Costa Rica e Honduras, entre outros.

Entretanto o acesso de grande número dos produtores aos mercados de cafés especiais ainda tem muitas restrições, tanto pela qualidade exigida, a qual somente pode ser reconhecida na bebida, quanto pelo volume do mercado, sendo assim, a grande maioria de produtores do café colhido, seletivamente à mão, têm que vender para o mercado dos cafés commodities, no qual nem sempre conseguem obter um lucro à altura do seu esforço.

Os sistemas, para colheita de café, mecanizado e semimecanizado, disponíveis comercialmente só no Brasil, têm sido desenvolvidos, de início, para a derriça plena dos frutos, por meio do princípio de vibrações mecânicas. Porém, para o sistema mecanizado, as pesquisas têm permitido desenvolver técnicas, para atingir a seletividade, pelo ajuste apropriado dos parâmetros vibracionais das máquinas, especialmente quanto ao tempo, amplitude e frequência da vibração. No caso das derriçadoras portáteis, é possível a seletividade por causa da habilidade do operador. A seletividade desse tipo de máquinas é bastante reduzida e é evidenciada pela variedade dos estádios de maturação (verde, verde cana, maduro, passa e secos) presente na massa de frutos derriçados.

O emprego do princípio das vibrações mecânicas, para projetos de máquinas e mecanismos sob sistema semimecanizado e seletivo, justifica-se pelo fato de já ser uma realidade no sistema de colheita mecanizada, que, por meio da regulagem da vibração das colhedoras, no que diz respeito à frequência, amplitude e tempo de vibração das plantas, conseguem-se atingir ótimos níveis de seletividade, com redução sensível do tempo operacional.

Com base no princípio das vibrações mecânicas, utilizado largamente para colheita de café e outros frutos, em estudos de modos de vibração apropriados para o desprendimento seletivo de frutos de café e, na configuração mecânica de máquinas portáteis, para a derriça de frutos de café e de protótipos para a derriça de outros frutos, objetivou-se com este trabalho desenvolver um projeto conceitual de mecanismo de colheita para o desprendimento de frutos de café, o qual será empregado em máquinas portáteis, visando à colheita seletiva.

Os objetivos específicos desta tese foram:

- Desenvolvimento de projeto conceitual de um mecanismo de colheita, para máquinas portáteis, que permite o desprendimento seletivo de frutos maduros de café;
- Construção, teste e avaliação dos mecanismos para desprendimento seletivo, determinados a partir do projeto conceitual, em cultivares típicos de café, localizados no Brasil e na Colômbia.

Como hipótese desta tese, planteou-se que é possível desenvolver um mecanismo sob sistema de colheita semimecanizada por vibrações mecânicas, visando à colheita seletiva de frutos maduros de café, com princípio mecânico mais simples que os mecanismos comerciais convencionais e com facilidade para variação em campo, da frequência e amplitude de vibração.

O desenvolvimento do projeto conceitual foi baseado, na metodologia proposta por Pahl et al. (2007), da qual resultaram duas máquinas, cada uma com duas ferramentas de desprendimento, sendo que cada ferramenta corresponde a uma solução, o que resultou num total de quatro soluções.

A avaliação das soluções foi dividida em três etapas, as quais foram realizadas por análises de variância. Na primeira etapa, foram realizadas as calibrações das máquinas encarregadas de movimentar as soluções projetadas, para determinar, mediante comparação de médias por testes de Tukey, as frequência e a amplitude a serem utilizados nas etapas subsequentes. Na segunda etapa, por comparações de médias pelo teste de Tukey, foram comparadas, em duplas e gradativamente, as soluções, descartando, em cada comparação, a solução com desempenho mais baixo até chegar à última comparação em 1(uma) solução, considerada como a melhor das soluções. Na terceira etapa, a melhor solução foi otimizada pelos testes de regressão, em termos da frequência como fator de variação, avaliando as variáveis resposta: eficácia de seletividade, eficácia de desprendimento, capacidade de produção efetiva e danos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Generalidades

Em razão das boas condições de mercado para os cafés de qualidade diferenciada, muitos agricultores e pesquisadores estão constantemente procurando melhorar a seletividade de sistemas de colheita mecanizada e semimecanizada (ARIZTIZÁBAL, TASCÓN e ÁLVAREZ, 2003; CÁRDENAS, TASCÓN e MEJÍA, 2015; CARVALHO et al, 2000; CIRO et al, 2001; COELHO et al, 2015; COELHO et al, 2017; ESPINOSA, RODRIGUEZ E GUERRA, 2007; GUEDES, 2011; JUNIOR et al, 2015; MEJÍA, TASCÓN E URIBE; 2013; SANTOS et al, 2010a; SANTOS et al, 2010b; SANTOS et al, 2015; SILVA et al, 2010; SILVA et al, 2013a; SILVA et al, 2013b; TINOCO et al, 2014; VILLIBOR et al, 2016) e, inclusive, olhando para a colheita seletiva a dedo, a exemplo o trabalho de Rocha et al. (2005), que, em estudo, durante três safras consecutivas, obtiveram maior receita líquida média dos três anos do estudo de 7,8%, pela maior produtividade e qualidade dos frutos colhidos, apesar da derriça manual ter apresentado menor custo operacional.

A pressão pela redução do alto custo associado à colheita seletiva manual fez com que, no ano 2017, a *FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA -FNC-* lançasse o edital chamado de *Reto Coffee PickInn* (- FNC, 2017), à procura de propostas para a colheita semimecanizada e seletiva, em que foram definidos os requisitos mínimos, para o aumento da eficácia do processo de colheita seletiva de café, na Colômbia, sujeitos aos padrões de qualidade do grão comercializado (café especial e commodity), as condições gerais das lavouras e a produtividade mínima requerida.

Minas Gerais é principal estado brasileiro produtor de café, em que uma boa porcentagem dos cultivos fica em locais não aptos para a colheita mecanizada, por ter declividades acima de 20%, valor limite das máquinas colhedoras disponibilizadas no comércio. Para o parque cafeeiro do estado de Minas Gerais, Rezende (2008) reporta 79.710 ha e Bernardes et al (2012) reportam aproximadamente 230.600 ha, equivalentes a 18,32% e ao 25%, respetivamente, plantadas em declividades acima de 20%, o que dá uma ideia da expansão do plantio de café, para essas áreas de encosta.

Dada a altitude e o sombreamento parcial próprios de grande parte da topografia da região Sul de Minas, a região tem-se caracterizado por prover boas condições para a produção

de cafés de qualidade diferenciada (BARBOSA et al. 2010). Desta forma, somente podem-se contar com alternativas de colheita manual e semimecanizada para o trabalho nesses locais.

A alternativa semimecanizada disponível, comercialmente no Brasil (FIGURA 1), vem sendo utilizada, em especial, para a colheita plena dos frutos de café, em pequenas propriedades e em cafezais de montanha, onde a declividade não permite a utilização de máquinas colhedoras tracionadas ou automotrizes. Existem vários modelos de diferentes fabricantes dessas máquinas portáteis, que permitem a instalação de mecanismos de derriça, em roçadoras convencionais, os quais baseiam-se no movimento alternativo rotacional de hastes derriçadoras. A diferença entre os diversos mecanismos de derriça disponíveis no mercado encontra-se na geometria das hastes e na configuração mecânica do sistema de transmissão do movimento.

Figura 1 - Derriçadora portátil de café utilizada no Brasil.



Fonte: <http://www.stihl.com.br/stihl-apresenta-novo-derriador-de-caf-na-16-edio-da-femagri.aspx>

Em máquinas portáteis, para a derriça de café, a frequência de vibração não pode ser controlada pelo operador, sendo que a variação da frequência ocorre proporcionalmente com a aceleração do motor de combustão interna, que é a fonte de potência do mecanismo de derriça. Além disso, são poucos os fabricantes que oferecem no máximo duas posições para a variação da amplitude, do movimento rotacional e alternativo das hastes. Barbosa, Salvador e Silva (2005) encontraram melhor desempenho operacional, em derriçadoras portáteis, operando em frequências entre 50,05 e 63,90 Hz e amplitudes entre 12 e 15 mm, quando comparado com outra máquina operando na frequência de 18,33 Hz e amplitude de 180 mm.

No período 2010 – 2018, a participação da agropecuária no PIB do Brasil se manteve numa média aproximada de 5,1% (IBGE, 2019). O café é um produto importante na economia brasileira, segundo a CONAB (2016), listado na Receita Bruta dos Produtores Brasileiros, 2014; ocupa o quarto lugar com R\$16.099 milhões, antecedido pelo milho com R\$28.197 milhões. A ABIC (Associação Brasileira dos Industrializadores do Café), citada por AGROSERVICES (2015), reporta que o café do Brasil tem tido um aumento no consumo de 36,2%, nos últimos 10 anos, o que é, especialmente, influenciado pelos cafés especiais, cuja demanda, segundo a BSCA, citada pelo mesmo autor, tem crescido 15%, no mesmo ano, em relação ao crescimento do 3% dos cafés convencionais. O valor dos cafés especiais é de 30% a 40% maior que os cafés convencionais e, em alguns casos (café de concurso), o valor pode atingir o 100% a mais (AGROSERVICES, 2015). O anterior permite uma possibilidade rentável do negócio, para os produtores que trabalham na seleção das cerejas coletadas, além de conseguir a anelada qualidade de café especial.

Segundo estimativas feitas, para o ano 2020, no mês de setembro de 2020 (CONAB, 2020):

- Produção estimada, para o Brasil, de 47,4 milhões de sacas de café arábica, com 38,1 de crescimento. MG 33,5 milhões de sacas, sendo 99,1% arábica e 0,9% conilon;
- Sul de Minas (Sul e Centro-Oeste) ganhou 8,4% na área e 20,2% na produtividade = 30,3% a mais de produção, a respeito da safra anterior;
- Área total plantada no Brasil, de aprox. 2'162.000 ha, com incremento de 1,4% no ano de 2019;
- Área total arábica no Brasil 1'760.000 ha, correspondente a 80% do total plantado de café;
- Minas Gerais possui aproximadamente 1'031.000 ha de café arábica, correspondente a 68% do total de arábica no Brasil;
- Pelo fato de ser um ano de bienalidade positiva, a produtividade do arábica seria de 31,27 sc/ha, o que representaria um aumento de 32,2%, no ano de 2019;
- A produção total de café seria de 61'628.400 sc, que representariam um aumento de 25,0% em 2019;
- Até o mês de setembro, a produção de café arábica foi de 47'375.700 sc, que representam aumento de 38,1% em comparação com 2019;

- Para o Sul de Minas, a produção total seria de 18'216.300 sc, apresentando um incremento de 30,3% em comparação com 2019.

2.2 Colheita seletiva de café

Segundo Silva et al (2013b), comercialmente, conta-se com os seguintes sistemas disponíveis, para a colheita do café: manual, semimecanizado, mecanizado e supermecanizado.

No sistema manual, há os subsistemas: colheita manual seletiva, pela qual somente frutos cereja, passa e secos são coletados, sendo catados, no momento mesmo da colheita, e colheita manual por derriça, em que todos os frutos, desde chumbinhos até secos, flores e muitas folhas, são tirados da planta (CHALFOUN, 2008).

De acordo com Silva et al (2013b), o sistema semimecanizado é ideal para áreas onde a topografia impede o acesso das máquinas para a colheita mecanizada. Empiricamente, os operadores de máquinas portáteis têm aprendido que, com a variação dos parâmetros de vibração: tempo de interação máquina-planta e frequência de vibração, pode-se obter alguma melhora na seletividade. Quer dizer que, se desprender maior quantidade dos frutos maduros pelo efeito da vibração ficam os frutos verdes para o seu amadurecimento na planta (SILVA et al, 2013a).

A colheita com o sistema semimecanizado é feita por duplas de trabalhadores, em que um trabalhador é responsável pela operação da máquina portátil e o outro é encarregado de recolher os frutos do solo ou do pano e pegar aqueles que ficarem para trás nas plantas, após a passagem da máquina.

O sistema de colheita semimecanizado é aproximadamente 41% mais eficaz que o sistema de colheita manual por derriça plena (SILVA et al, 2013b). No sistema semimecanizado, não tem como atingir a seletividade e, normalmente, são desprendidos todos os frutos em única passada. No sistema semimecanizado e em decorrência do amadurecimento desequilibrado dos frutos, os agricultores optam por fazer uma única colheita, quando estimarem a maior porcentagem de frutos de cereja na planta (entre 60% e 70%) (SILVA et al, 2013b).

A colheita mecânica é 20 vezes mais eficiente que a colheita seletiva manual e quatro vezes mais eficiente que a derriça manual. O trabalho de colheita do café, no Brasil, é feito

assim: 1% colheita seletiva manual, 15% colheita mecânica, 61% derrixa manual e 23% colheita mecanizada (INACIO, 2010). Na Colômbia, 100% do café é colhido seletivo e manualmente.

Nos sistemas mecanizado e supermecanizado, alguns cafeicultores optam pela seletividade, fazendo entre dois e três passadas da colhedora e ajustando apropriadamente: frequência de vibração, freio ou rotações (segundo o modelo da máquina) dos cilindros de varetas e velocidade da máquina. Junior et al (2015) recomendam, para o desprendimento seletivo, regulagem do freio entre 53,61 a 64,33 N-m e frequência de vibração entre 12,5 a 14,2 Hz.

Um parâmetro importante a ser levado em consideração, para se conseguir seletividade na colheita mecanizada, tem a ver com a diferença na força de desprendimento entre os frutos maduros e verdes (SILVA et al, 2010; SILVA et al, 2013a).

As pesquisas, em colheita seletiva de frutos de café, vêm sendo desenvolvidas principalmente no Brasil e na Colômbia. No Quadro 1, são mostrados os principais resultados de alguns dos trabalhos relacionados com desprendimento seletivo de café.

Quadro 1 - Resultados de algumas pesquisas orientadas ao desprendimento seletivo de frutos de café (continua)

Cita	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Descrição	Resultados
Ariztizábal, Tascón e Álvarez (2003)	11,67 a 13,42	55	Vibrações laterais (tipo máquina uva)	327 kg cereja/h, 57% de verde.
Cárdenas, Tascón e Mejía (2015)			Impactador de 3 paletas + sistema para receber frutos	Produtividade entre 25% a 70% a mais que o sistema a dedo; 3 a 4,5% de verde; entre 1 a 19 frutos caídos por planta.
Carvalho et al. (2000)	20	62	150, 200 e 250 mm de varetas	Eficácia de desprendimento de 95,8% com 3,16% de verdes colhidos, em 20 Hz e 250 mm, em lavoura com 7% de verdes.

Quadro 1 - Resultados de algumas pesquisas orientadas ao desprendimento seletivo de frutos de café (continua)

Ciro (2001)	25,10 e 26,97		Estudo analítico.	Primeira frequência natural para cereja e verde, respectivamente.
Coelho et al. (2015)	33	9,0	Vibração de ramos no sentido longitudinal.	A melhor eficácia de desprendimento foi 30% e o seu aumento com o aumento da frequência foi o de maior declividade.
Coelho, et al. (2017)	17,38 e 18,64		Experimentalmente	Primeira frequência natural, para maduro e verde, respectivamente.
Espinosa, Rodriguez e Guerra (2007)	a) Entre 145 a 180 (M) e entre 182 a 263 (V). b) Entre 141 a 207 (M) e entre 201 a 256 (V).		Simulação computacional por elementos finitos.	Modo de contra fase flexionam-se, como o melhor para o desprendimento seletivo. Para frutos maduros (M) e verdes (V), a) <i>V. Caturra Amarillo</i> e b) <i>V. Caturra Rojo</i> .
Guedes (2011)	35; 40; 45; 50 e 55	3,5; 5,0 e 6,5	Variedade Catuaí Vermelho	Nas faixas trabalhadas não são recomendáveis para a colheita plena.
Mejía, Tascón e Uribe (2013)	8,3 a 16,7	20 e 120		Frequências iguais em ferramenta e galhos.
Santos et al. (2010a) (eficácia desprendimento de: verde; verdoengo; cereja e passa)	13,33; 16,67; 20,00; 23,33 e 26,67	3,75; 5,00; 6,25 e 7,50	Shaker com vibrações longitudinais e transversais do ramo	Com 26,67 Hz e 7,50 mm, aprox. 50% de cereja e, com 20,00 Hz e 5,00 mm, aprox. 5% de verdes.
Santos et al. (2010b) (eficácia desprendimento de cereja)	23,33 e 26,67	6,25 e 7,50	Shaker com vibrações longitudinais e transversais do ramo	65,25% e 84,65%, para Catuaí V. e Mundo Novo, respectivamente.

Quadro 1 - Resultados de algumas pesquisas orientadas ao desprendimento seletivo de frutos de café (conclusão)

Santos et al. (2015)	Aprox. 20 Aprox. 50 Aprox. 256		1° a 4° modo de vibração para cereja, variedades Catuaí Vermelho e Mundo Novo	1ª e 2ª frequência natural (modo pendular). 3 Hz e 4,67 Mpa Von Misses de diferença com verde; 3ª frequência natural (modo torsional). 9 Hz e 5,88 Mpa Von Misses de diferença com verde; 4ª e 5ª frequência natural (modo em contraface). 43 Hz e 29,93 Mpa Von Misses de diferença com verde.
Tinoco et al. (2014)	Aprox. 17 Aprox. 39 Aprox. 192		1° a 4° modo de vibração para cereja, v. <i>Colombia</i>	1ª e 2ª frequência natural (modo axial). 2 Hz de diferença com verde; 3ª frequência natural (modo torsional). 10 Hz de diferença com verde; 4ª e 5ª frequência natural (modo em contraface). 50 Hz de diferença com verde.
Villibor et al. (2016)	11,62 e 13,29		Determinação de parâmetros modais em laboratório v. Catuaí Vermelho	Primeiras frequências naturais, sem amortecimento, para frutos maduros e verdes, respectivamente. Com sobreposição de faixas.

Fonte: Do autor (2021)

2.3 Projeto conceitual

Segundo Pahl et al (2007), as três atividades principais ao desenvolvimento de qualquer tecnologia inovadora são: concepção, anteprojeto e projeto. A utilização de um procedimento metódico, na busca de soluções efetivas para problemas ou subtarefas específicas de projeto, fornece uma estrutura clara para planejar; flexibilizar; otimizar e verificar, tudo que está sendo feito, sendo isso importante aos projetos da engenharia atuais, já que permite, entre outros, contar com informações documentais precisas, para o melhoramento, mesmo dos produtos do projeto, ou para se utilizar na solução de outros projetos (PAHL et al, 2007; GIRALDO et al., 2015). A metodologia de projeto não deixa de lado a intuição e, sim, consegue documentar apropriadamente as ideias surgidas dela (PAHL et al., 2007; GIRALDO et al., 2015).

2.3.1 Esclarecimento do problema e elaboração da lista de requisitos

As tarefas resultam, em primeiro lugar, do pedido direto dos clientes, por meio de orientações gerais e podem evoluir, para uma integração cliente-empresa, à procura do que, realmente, está precisando ser feito. Já, o aprofundamento na concretização das tarefas, surge no interior das empresas, pela interação de diferentes departamentos (diretoria, projetos, marketing, entre outros) (PAHL et al., 2007).

Para ajudar no esclarecimento da tarefa, é recomendável responder às seguintes perguntas (PAHL et al., 2007):

- Qual a finalidade a satisfazer?
- Quais características a solução deve apresentar?
- Quais características a solução não pode ter?

A sequência seguida nesta etapa está composta por:

- 1°. Definição de requisitos básicos, relevantes para o mercado e documentação dos requisitos técnicos (peso, potência, frequências, etc.), divididos em necessidades (exigido) e em vontades (desejável), as últimas classificadas em alta, média e baixa relevância.
- 2°. Para a complementação da lista de requisitos, são utilizadas as metodologias, lista de verificação principal, chamada de linha mestra e técnica do cenário. Formular, quantitativamente, as especificações do produto: geometria, cinemática, produtividade, seletividade, materiais, sinal, segurança, ergonomia, fabricação, operação, manutenção, custos, prazo (PAHL et al., 2007).

Para complementar/ampliar os requisitos, são utilizados dois métodos; o primeiro acompanhando uma lista das características principais, chamada de linha-mestra e o segundo mediante a utilização da chamada de técnica do cenário.

Na técnica da linha-mestra, faz-se um checklist, verificando um por um os itens, conteúdos, em quadros documentais, como a apresentado no Quadro 2, utilizado para projetos de engenharia mecânica (PAHL et al., 2007).

Quadro 2 - Linha-mestra com listas de características principais.

Característica	Exemplo
Geometria	Tamanho, altura, largura, comprimento, diâmetro, demanda de espaço, quantidade, disposição, conexão, supressão e ampliação.
Cinemática	Tipo de movimento, direção do movimento, velocidade, aceleração.
Forças	Magnitude da força, direção da força, frequência da força, peso, carregamento, deformação, rigidez, propriedades elásticas, estabilidade, ressonância.
Energia	Potência, eficácia, perdas por atrito, ventilação, variáveis de estado, compressão, temperatura, humidade, aquecimento, resfriamento, energia de abastecimento, armazenamento, capacidade, conversão de energia.
Matéria	Propriedades físicas e químicas do produto de entrada e saída, material auxiliar, substâncias prescritas (lei de alimentos e semelhantes), fluxo de material e transporte.
Sinal	Sinais de entrada e saída, tipo de mostrador, aparelhos para produção e monitoramento, forma do sinal.
Segurança	Princípios de segurança diretos, sistemas protetores, segurança industrial, segurança no trabalho, segurança ambiental.
Ergonomia	Relação homem-máquina: operação, tipos de operação, disposição clara, iluminação, desenho.
Produção	Limitações do local da produção, máxima medida fabricável, processo produtivo preferido, meios de produção, qualidade possível e tolerâncias.
Controle de Qualidade	Possibilidades de teste e medição, prescrições especiais (TUV, ASME, DIN, ISO, especificações AD).
Montagem	Prescrições especiais de montagem, montagem, embutimento, montagem do canteiro de obras, bases de equipamentos.
Transporte	Limitações por meio de guinchos, bitola ferroviária, vias de transporte por tamanho e peso, tipo e restrições do transporte.
Operação	Baixo ruído, taxa de desgaste, aplicação e domínio de utilização, condições de uso (atmosfera sulfurosa, trópicos).
Manutenção	Livre de revisão ou número e intervalo de tempo entre revisões, inspeção, troca, conserto, pintura, lavagem.
Reciclagem	Reaproveitamento, reprocessamento, disposição final, armazenamento
Custos	Máximos custos de fabricação, custo de ferramentas, investimento, amortização.
Prazo	Fim do desenvolvimento, plano em rede para etapas intermediárias, prazo de entrega.

Fonte: Pahl et al. (2007).

Na técnica do cenário, são levantadas todas as fases do ciclo de vida do produto, desde a sua produção até o seu sucateamento, sendo que, em cada uma dessas fases, são realizados os seguintes questionamentos:

- Que poderá acontecer com o produto (em que estado pode ele incorrer, como pode ser utilizado, por quem pode ser utilizado, onde pode ser empregado)?
- Como o produto deverá reagir (robustez desejada à falha, eliminação de risco prováveis)?

Os requisitos obtidos, por meio do checklist da linha-mestra e da técnica do cenário, ainda podem ser muito gerais, podendo-se, então, aplicar o método de três etapas, proposto por Kramer (citado por PAHL et al., 2007), o que é detalhado a continuação:

1° Fase (Declaração): vontade do cliente. Exemplo: manutenção simples.

2° Fase (Aprofundamento): conteúdos possíveis das vontades do cliente.

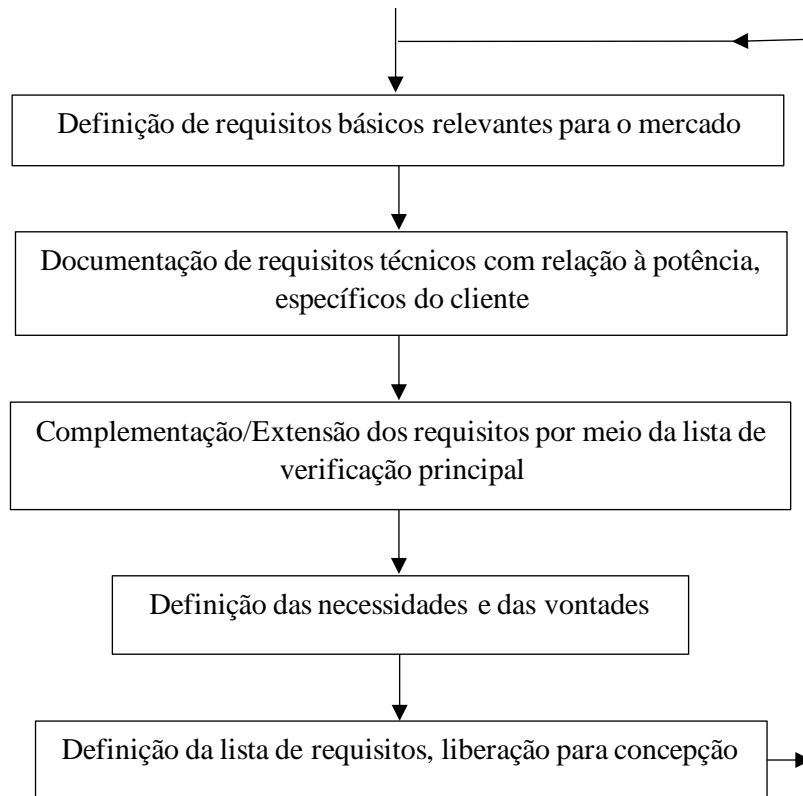
Exemplo: longos intervalos entre manutenções; manutenção simples; fácil aprendizado dos procedimentos operacionais.

3° Fase (Detalhamento): itens precisos e no possível quantificáveis, documentados na lista de requisitos. Final do exemplo:

- Longos intervalos entre manutenções: manutenção a cada 5.000 horas de operação e engraxe da alavanca do excêntrico a cada 10.000 horas.
- Manutenção simples: fechos manuais nas tampas de manutenção; graxeira padrão para alavanca do excêntrico; manter um espaço livre para a bandeja de coleta de óleo; apoio auxiliar para a remontagem das tampas de manutenção.
- Fácil aprendizado dos procedimentos operacionais: descrição separada dos procedimentos, no manual de manutenção; placas sinalizadoras dos fechos a serem removidos para a manutenção; setas estampadas para indicar o sentido de abertura das tampas de manutenção.

O roteiro geral, para o esclarecimento do problema e a elaboração da lista de requisitos, é mostrado na Figura 2. O ciclo fechado entre a definição de requisitos básicos e a definição da lista de requisitos (FIGURA 2) deve ser realizado quantas vezes seja considerado pela equipe ao cargo do projeto, aliás, que o projeto já esteja nas etapas da concepção, quando fosse importante a adição de requisitos que pudessem haver sido esquecidos ou desconsiderados nessa primeira parte (PAHL et al., 2007).

Figura 2 - Etapas realizadas na elaboração da lista de requisitos.



Fonte: Pahl et al. (2007).

2.3.2 Identificação dos principais problemas e elaboração da estrutura de função

Consiste em identificar qual é o núcleo da tarefa, por meio da generalização gradativa da formulação do problema, o que permite conhecer o geral e o principal, prescindindo-se do individual e do fortuito. Nessa parte, pode-se perguntar se o núcleo da tarefa consiste em:

- Melhorar as funções técnicas;
- Reduzir as características técnicas (dimensões, peso, volume, entre outros);
- Reduzir os custos;
- Minorar o tempo de entrega do produto para o mercado;
- Melhorar o processo de produção do produto.

A partir dos itens resultantes da generalização gradativa do problema, podem surgir novas alternativas de solução, cabendo, finalmente, à equipe de desenvolvimento, decidir qual ou quais dessas possibilidades são melhores para a solução efetiva do problema, viabilizando-as para entrar no abanico de soluções a serem avaliadas.

A obtenção do geral e o principal de uma tarefa inicia-se com cada um dos requisitos da lista já elaborada, analisando-os com respeito às relações funcionais e principais condicionantes específicas à tarefa e à abstração simultânea, passo a passo. Pahl et al., 2007 recomenda seguir os passos para a abstração, como descrito no Quadro 3.

Quadro 3 - Passos para a obtenção do geral e o principal de uma tarefa.

Descrição
1° Suprimir vontades mentalmente;
2° Somente considerar requisitos que afetem diretamente as funções e as principais condicionantes;
3° Converter dados quantitativos em qualitativos, reduzindo-os a asserções essenciais;
4° Ampliar de forma adequada o que foi percebido;
5° Formular o problema de forma neutra quanto à solução.

Fonte: PAHL et al. (2007).

A função global será desdobrada em subfunções de menor complexidade, sendo que todas elas representam a inter-relação geral entre a entrada e a saída do sistema, em relação à conversão de energia, material e/ou sinal. Os objetivos desta etapa são a simplificação para a busca de soluções, pelo desdobramento da função global em subfunções e a obtenção de uma estrutura de função simples e não ambígua, composta pelas diferentes subfunções que estão interligadas (PAHL et al., 2007).

No caso de projetos adaptativos, as primeiras aproximações à estrutura de função decorrem da análise de funções, para um ou vários sistemas conhecidos, passando depois para as possíveis variações dessa primeira estrutura de função, surgidas de considerações mais gerais e em um processo iterativo, que poderão dar base a diferentes soluções. A estrutura de função não é o fim, mas, sim, uma ferramenta objetivada, para facilitar a solução ao problema de desenvolvimento do produto, sendo assim, ela terá que ser desenvolvida até o ponto de ser útil na busca de solução ao problema, o qual depende muito da esperteza do desenvolvedor (PAHL et al., 2007).

2.3.3 Proposição, seleção e combinação de princípios de funcionamento para a constituição de estruturas de funcionamento

A partir das subfunções definidas na estrutura de funções, é realizado um esquema classificador, no qual são definidos, de forma gráfica ou escrita, diferentes princípios de funcionamento, para cada uma dessas subfunções, que permitam atingir o seu objetivo.

Posteriormente, essas alternativas serão combinadas na estrutura de funcionamento, para identificar diversas possibilidades da solução (campo de soluções) que atendem de melhor maneira à função global. Cada princípio de funcionamento inclui o seu efeito físico, características geométricas e materiais. Na maioria das vezes, o efeito físico é escolhido da ampla gama disponível na atualidade, restando somente definir a geometria e os materiais para definir o princípio de funcionamento (PAHL et al., 2007).

Mediante um processo de seleção sistemático e verificável, as alternativas expostas no esquema classificador são avaliadas, em primeira instância, pela eliminação de aquelas que sejam totalmente inadequadas e, em segundo lugar, mediante a elaboração de uma lista em forma tabular, para selecionar as estruturas de funcionamento mais apropriadas, de acordo com os critérios de seleção definidos no Quadro 4 (PAHL et al., 2007).

Quadro 4 - Definição dos critérios para a avaliação de princípios de funcionamento.

Item	Critério	Descrição
A	Compatibilidade com a tarefa global e/ou entre elas.	Tipo de resposta Sim ou Não (S ou N), sendo obrigatório seu cumprimento (resposta Sim), para que o princípio de funcionamento avaliado continue com possibilidade de ser escolhido.
B	Satisfação da lista de requisitos	
C	Facilidade na realização da tarefa (tamanho, nível de trabalho, arranjo necessário, entre outros).	São necessários recursos mais quantitativos. Servem tanto para a eliminação de soluções (por exemplo, um nível de trabalho inadequado ou um custo inaceitável), como para hierarquização das soluções pelas melhores características.
D	Custo aceitável.	
E	Segurança e ergonomia.	São utilizados para dar preferência às soluções que estiverem em igualdade de condição quanto aos critérios A. B. C. e D.
F	Facilidade de realização, tendo em consideração o Know-how da equipe de desenvolvimento, materiais disponíveis e procedimentos conhecidos	

Fonte: PAHL et al. (2007).

2.3.4 Avaliação e seleção das soluções

A metodologia de avaliação do projeto conceitual aprofunda ainda mais os critérios de seleção definidos no subtítulo anterior. Em razão do que, demanda maior trabalho, sendo recomendável, a sua aplicação no final da etapa conceitual, quando há um número reduzido de alternativas (PAHL et al., 2007).

A avaliação calcula o “valor benefício” ou “potencial” de uma alternativa de solução, em relação aos objetivos, que geralmente são definidos, a partir das necessidades da lista de requisitos e das condições gerais. Além dos aspectos técnicos, na avaliação são incluídos aspectos como custos, segurança, ergonomia e meio ambiente, sendo todos eles considerados numa justa proporção (PAHL et al., 2007).

A avaliação e seleção é especialmente aconselhada, quando surgem muitas soluções do produto da combinação sistemática das alternativas, com resultados onerosas para o projeto. Dois métodos são, frequentemente, utilizados nesta fase: a análise dos valores da engenharia de sistemas (ZANGEMEISTER, Ch. 1970, citado por PAHL et al., 2007) e a diretriz VDI 2225 (VDI-Richtlinie, 1977, citado por PAHL et al., 2007), sendo que a aplicação de qualquer um destes métodos permitem uma avaliação geral, com consideração de características qualitativas e quantitativas e resultados confiáveis.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em duas fases: Na primeira, desenvolveu-se o projeto conceitual de um mecanismo de desprendimento seletivo de frutos de café sob sistema semimecanizado, obtendo-se quatro soluções. Na segunda fase, foram avaliadas as quatro soluções resultantes do projeto conceitual. As avaliações constaram da variação de frequências e amplitudes selecionadas a partir de referências encontradas em outros trabalhos de pesquisas, com objetivos similares.

A fabricação dos protótipos e das ferramentas de desprendimento de frutos foi realizada no Laboratório de Protótipos, do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Lavras.

Os testes das soluções foram realizados nas fazendas: São Sebastião, Carvalhópolis, MG, Brasil; Colina, Luminárias, MG, Brasil e *La Florida, Gigante, Huila*, Colômbia.

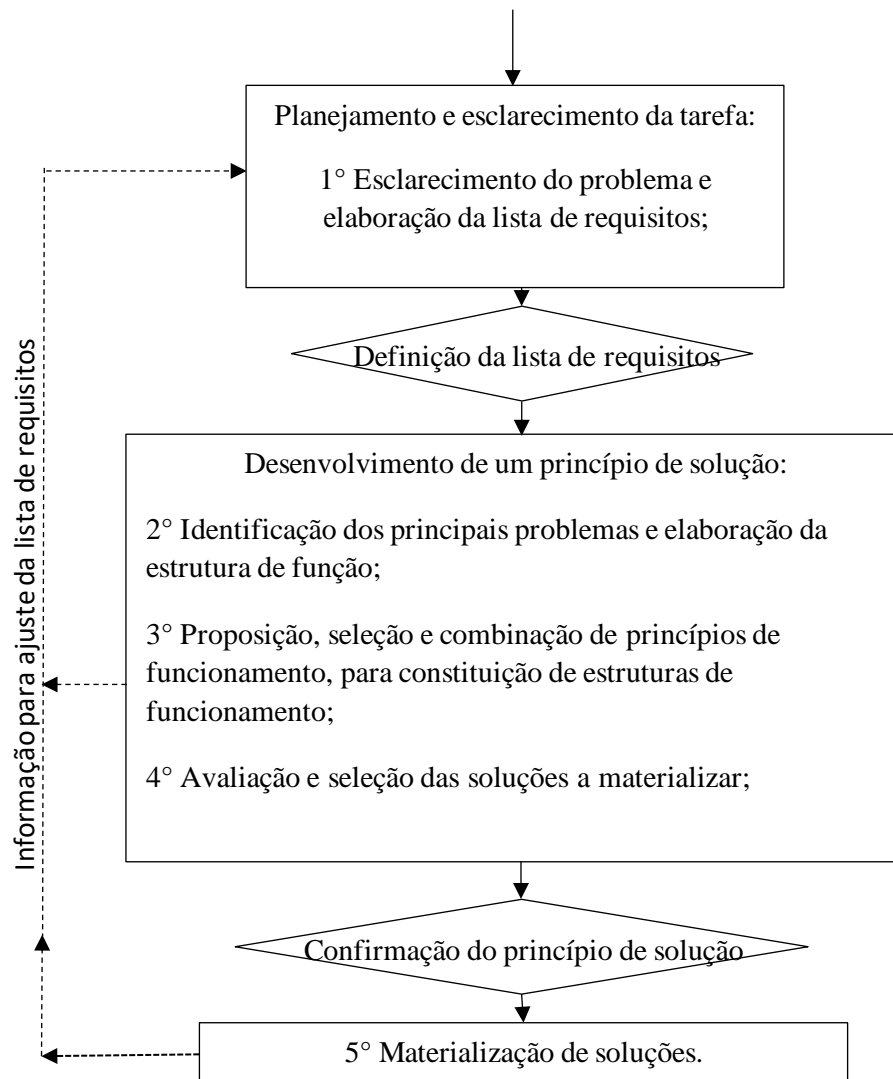
3.1 Projeto conceitual

O projeto conceitual foi realizado, a partir do princípio para derriça de frutos de café por vibrações mecânicas, seguindo referências e diretrizes de outros trabalhos com objetivo similar, tanto no sistema de colheita mecanizada, quanto no sistema semimecanizado. A sistemática descritiva segue a proposta de Palh et al. (2007), adaptada às particularidades deste trabalho. Na Figura 3, é apresentada a sequência geral das etapas descritivas para a concepção dos protótipos das soluções de proposto.

A avaliação e seleção das soluções referida no item 4° (FIGURA 3) trata de procedimentos a serem feitos sobre pré-suposições teóricas, que não correspondem exatamente às avaliações de campo proposta, as quais foram realizadas, após a materialização dos protótipos.

No caso deste projeto, o objetivo da tarefa foi conseguir soluções capazes de interagirem com as plantas, com elevados valores de eficácia de seletividade (porcentagem de frutos maduro no volume total desprendido), com elevada eficácia de desprendimento (porcentagem de frutos maduro desprendido em relação a carga pendente), com boa capacidade de produção efetiva (volume de frutos colhido por unidade de tempo) e com baixos valores de danos às plantas (massa de folhas e galhos, flores e frutos chumbinhos, fisiologicamente ativos).

Figura 3 - Etapas para o desenvolvimento de projeto conceitual.



Fonte: Adaptado de Pahl et al. (2007).

3.2 Delineamento estatístico

Em busca da maior expressão dos resultados perante os sistemas produtivos de café, todos os experimentos foram realizados, em lavouras comerciais, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 3 repetições para cada tratamento, sendo cada unidade experimental composta por uma planta. Nos ensaios de campo foram determinados os parâmetros definidos no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros medidos e avaliados nos ensaios de campo.

Símbolo	Descrição
VMD	Volume de frutos maduros desprendidos.
VID	Volume de frutos imaturos desprendidos.
VMN	Volume de frutos maduros não desprendidos.
VIN	Volume de frutos imaturos não desprendidos.
MGD	Massa de galhos e folhas fisiologicamente ativos, desprendida.
MFD	Massa de flores e frutos fisiologicamente imaturos, desprendida.
TOM	Tempo operacional por unidade experimental (planta).

Fonte: Do autor (2021).

Estes parâmetros foram utilizados para calcular as variáveis “resposta” descritas como segue:

$$\xi_S = (VMD)(VMD+VID)^{-1}(100\%) \quad (\text{adaptada de CÁRDENAS et al. 2013}) \quad (1)$$

Em que:

ξ_S = eficácia de seletividade %;

VMD = volume de frutos maduros desprendidos L;

VID = volume de frutos imaturos desprendidos L.

$$\xi_D = (VMD)(VMD+VMN)^{-1}(100\%) \quad (\text{adaptada de COELHO et al., 2015}) \quad (2)$$

Em que:

ξ_D = eficácia de desprendimento %;

VMD = volume de frutos maduros desprendidos L;

VMN = volume de frutos maduros não desprendidos L.

$$VD = VMD+VID \quad (3)$$

Em que:

VD = volume total desprendidos;

VMD = volume de frutos maduros desprendidos L;

VID = volume de frutos imaturos desprendidos L.

$$C_{pE} = (VMD)(TOM^{-1})(60) \quad (\text{adaptada de CÁRDENAS et al., 2013}) \quad (4)$$

Onde:

C_{pE} = capacidade de produção efetiva Lh^{-1} ;

VMD = volume de frutos maduros desprendidos L;

TOM= tempo de operação da máquina por planta (minutos decimais);

60=fator de ajuste de unidades.

$$D = MGD + MFD \quad (5)$$

Em que:

D = danos, g;

MGD = massa de galhos e folhas fisiologicamente ativos, desprendida, g;

MFD = massa de flores e frutos fisiologicamente imaturos, desprendida, g.

Os experimentos de campo foram divididos em três etapas:

A primeira, para calibrar os protótipos das soluções, em termos de faixa de frequências e de amplitudes;

A segunda, para selecionar os melhores resultados dos protótipos das soluções do projeto conceitual;

A terceira, para otimizar a melhor solução, em termos da frequência, como fator de variação.

3.2.1 Calibração das máquinas

Inicialmente as quatro soluções desenvolvidas no projeto conceitual foram agrupadas em duplas, pelo fato de que foi utilizada a mesma “máquina” como fonte de potência de cada uma das duplas, sendo que a diferença das soluções em cada grupo se verifica pela variação das ferramentas de desprendimento. Uma dupla foram caracterizadas pelas Soluções “1 e 2” e a outra pelas Soluções “3 e 4”.

➤ **Determinação da faixa de frequências e amplitude das Soluções 1 e 2**

Os experimentos foram realizados na fazenda São Sebastião, Carvalhópolis, MG, Brasil, em lavoura cafeeira com 15 anos de idade, da variedade Catuaí Vermelho, com espaçamento de 3,0m entre linhas e 1,0m entre plantas (3.333 planta ha⁻¹), com altura média das plantas de 3,0m e que tinha sido esqueletada dois anos antes dos ensaios. Destaca-se que o esqueletamento trata-se de uma prática de renovação das plantas, através de poda parcial dos ramos ortotrópicos. Prática comum de manejo que elimina a produção de frutos na safra seguinte, com recuperação vegetativa e posterior produção mais vigorosa na segunda safra subsequente.

Foram realizadas as análises estatísticas, com testes de Tukey a 5% de probabilidade, para as variáveis-resposta, “Eficácia de seletividade” e “Volume total desprendidos”, para as

duas versões de ferramenta de desprendimento das soluções “1 e 2”, para as seguintes condições pré-estabelecidas:

- Ferramenta vibrando com amplitude de $13,2^\circ$ e variações de frequências de 27; 30; 35 e 40 Hz, denominada “faixa de frequência menor”;
- Ferramenta vibrando com amplitude de $6,6^\circ$ e variações de frequências de 40; 42 e 45 Hz, denominada “faixa de frequência maior”;
- Ferramenta vibrando com a frequência comum às duas faixas descritas (40 Hz), nas amplitudes consideradas ($13,2^\circ$ e $6,6^\circ$).

➤ **Determinação da faixa de frequências e amplitude das soluções 3 e 4**

Os experimentos foram realizados na fazenda *La Florida, Gigante, Huila*, Colômbia, em lavoura de café arábica de três anos, variedade *Supremo*, com espaçamentos de 1,4 m entre linhas e 1,0 m entre plantas ($7.143 \text{ planta ha}^{-1}$) e altura média das plantas de 2,0 m.

Para determinar a melhor amplitude de trabalho das soluções 3 e 4 foram realizados testes com as ferramentas correspondentes vibrando a 40 Hz e com variação do número de massas desbalanceadas (4, 5 e 6).

Os dados foram analisados estatisticamente, com testes de Tukey a 5% de probabilidade, para as variáveis resposta, “Eficácia de seletividade” e “Volume total desprendidos”.

3.2.2 Seleção da melhor solução

Inicialmente, avaliações foram realizadas para definir a melhor das quatro soluções, comparando as duplas conformadas pelas soluções (1 e 2) e (3 e 4). Posteriormente foram comparadas as duas soluções de ferramentas dentro das dupla, para determinar entre elas, qual com o maior potencial de otimização.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Projeto conceitual

Os resultados do trabalho são apresentados em duas partes, seguindo a sequência da metodologia proposta anteriormente. Na primeira parte, apresenta-se os resultados de desenvolvimento do projeto conceitual do mecanismo de desprendimento seletivo de frutos de café, com quatro soluções segundo a metodologia de projeto conceitual, proposta por Palh et al. (2007). Na segunda parte são apresentados os resultados de avaliações destas soluções, quanto a calibração, seleção e otimização dos mecanismos e ferramentas que suportam as ditas soluções.

4.1.1 Esclarecimento do problema e elaboração da lista de requisitos

O esclarecimento do problema para a elaboração da lista de requisitos foi fundamentado do atual estágio da arte do desenvolvimento tecnológico de colheita por vibração, conforme resultados de pesquisas e experiências de campo, para a cultura do café e de outros produtos.

Foi considerado ainda a disponibilidade dos recursos físicos e financeiros e o prazo para a conclusão do plano de trabalho referente à tese de doutoramento vinculada a este projeto.

Desta forma foram concretizadas as seguintes tarefas:

- Custos: investimento para a fabricação e montagem das soluções, condicionadas à utilização de elementos e materiais (ferramentas e máquinas de usinagem; fontes de potência; peças e máquinas), disponíveis no Departamento de Engenharia Agrícola da UFLA e de oficinas de usinagem disponíveis na cidade de Lavras, além da oferta comercial de materiais e peças;
- Prazos: para o projeto conceitual e avaliação das soluções selecionadas, realizados em dois (2) anos, entre 2018 e 2019;
- Ergonomia: facilidade para trabalhar em cafezais adensados e em declividade;
- Características técnicas: elevado porcentual de frutos maduros desprendidos em relação ao total de maduros nas plantas; desempenho operacional de campo maior que o sistema de colheita seletiva manual; danos das plantas que não comprometam as produtividades posteriores; manutenção do protótipo simples e facilidade de

limpeza; utilização do princípio de vibrações mecânicas, com possibilidade de variação em campo da frequência e amplitude.

Com base nestas informações de esclarecimento da tarefa, revisão de literatura pertinente ao desprendimento seletivo de frutos de café por vibração e considerando, ainda, a experiência da equipe de pesquisa em colheita mecanizada e semimecanizada do café, vinculada ao projeto, foi definida a primeira lista de requisitos, apresentada no Quadro 6.

Quadro 6 - Primeira lista de requisitos para mecanismo de desprendimento seletivo de café.

Requisitos	
Exigido	Alta eficácia de desprendimento dos frutos maduros nas plantas;
	Alta eficácia de seletividade dos frutos maduros na massa desprendida;
	Eficiência operacional maior que a colheita manual seletiva;
	Poucos danos na estrutura das plantas;
	Operação simples;
	Possibilidade de variação da frequência e da amplitude;
	Geometria e peso que permitam operar em cafezais adensados e em declividade;
	Manutenção com ferramentas manuais;
	Usinagem com as ferramentas e máquinas disponibilizadas no Lab. de Protótipos UFLA e nas oficinas da empresa Grupo Maciel (Lavras, MG);
	Materiais, peças e elementos de máquinas disponíveis em oficinas do Departamento de Engenharia Agrícola - UFLA;
	Materiais e peças disponíveis em lojas da região de Lavras.
Desejável	Requerimento de baixa potência (A*);
	Custo baixo (A);
	Resistente à corrosão pela água e o mel do café (M**);
	Fonte de potência com motorização elétrica (B***);
	Baixo requerimento de manutenção (M);

Legenda: *A= alta relevância. **M=média relevância. ***B=baixa relevância).

Fonte: Adaptado de Pahl et al. (2007).

Acrescentando a esta lista de requisitos, segundo a técnica do checklist da linha mestra são especificadas mais características para o mecanismo de desprendimento seletivo pretendido, Quadro 7.

Quadro 7 - Lista de requisitos para o mecanismo de desprendimento seletivo de café, elaborado segundo a técnica da linha mestra.

Característica principal	Descrição
Geometria	Comprimento < 1,00 m; altura < 0,10 m; largura < 0,40 m; demanda de espaço > 1 m ² ; conexão: fonte de potência carregada pelo mesmo operador;
Cinemática	Tipo de movimento: vibracional alternativo ou circular; direção do movimento: em uma, duas ou três dimensões; frequência: variável entre 26 e 45 Hz; amplitude: variável entre 16 e 35 mm;
Forças	Peso do mecanismo de desprendimento ≤ 60,00 N; força na interação da ferramenta de desprendimento com o ramo/frutos ≤ 20 N, em qualquer direção; limite da transmissão de vibração para o operador; quando separadas a fonte de potência e a ferramenta de desprendimento por elemento deformável, dito elemento tem que ser de fácil manipulação por parte do operador;
Energia	Fonte de potência ≤ 1.000 W; fonte de potência elétrica; alimentado por baterias; alta eficácia mecânica; temperatura das partes expostas ≤ 40°C; resfriamento por convecção livre do ar ambiente;
Materiais	Materiais usináveis; elementos de fixação (porcas, parafusos, pinos, buchas, rolamentos) padronizados; materiais antiferrugem; materiais recicláveis;
Sinal	Entrada: acionamento manual tipo gatilho; saída: vibração variável de acordo ao grau de acionamento na entrada;
Segurança	EPI: óculos, luvas e protetores auditivos; fonte de potência isolada para a chuva;
Ergonomia	Fonte de potência costal; ferramenta de desprendimento para carregar numa mão só; facilidade para o operador se deslocar, carregando o mecanismo, pelos cafezais adensados (1 m x 1 m) e em declividades até o 100%; baixo nível de ruído; baixo nível de vibração nas mãos;
Fabricação	Maquinaria disponível: centro de usinagem, torno, furadeira de bancada, solda elétrica inversora, esmerilhadeira angular, ferramentas de bancada;
Controle de qualidade na montagem	Instrumentos de medição: paquímetro analógico, trena, tacômetro ótico, dinamômetro digital de 200 N; Montagem manual utilizando parafusos, porcas, anéis, pinos de pressão, buchas e rolamentos, entre outros.
Operação	Baixo ruído; baixa taxa de desgaste; operação por parte de pessoal de baixa qualificação; uso na roça, em condições variáveis do ambiente (chuva, orvalho ou poeira); 10°C < temperatura ambiente < 40°C;
Manutenção	Limpeza diária do equipamento; ferramenta de desprendimento lavável; possibilidade de conserto em oficina de mecânica geral; frequência de lubrificação > 40 horas; frequência de revisão > 6 meses; sem peças pintadas;
Desempenho operacional	Alta eficácia de desprendimento dos frutos maduros nas plantas; alta eficácia de seletividade de frutos maduro no volume desprendido; alta capacidade de produção efetiva e baixos danos nas plantas;
Reciclagem	Utilização de materiais recicláveis: alumino, bronze, aço, inox;
Custos	Custo ≤ US\$350,00 (janeiro 2018);
Prazo	Dois anos consecutivos, contados a partir do ano 2018.

Fonte: Do autor (2021).

No Quadro 8, são apresentados os requisitos consolidados, após a aplicação da técnica do cenário (PAHL et al. 2007).

Quadro 8 - Lista de requisitos para o mecanismo de desprendimento seletivo de café
(continua).

E/D*	A/M/B**	Requisitos
E		Comprimento < 1,00 m;
E		Altura < 0,10 m;
E		Largura < 0,40 m;
D	A	Demanda de espaço > 1 m ² ;
E		Fonte de potência carregada pelo mesmo operador;
E		Movimento vibracional da ferramenta de desprendimento;
E		Direção do movimento da ferramenta de desprendimento, em uma, duas ou três dimensões;
E		Frequência da ferramenta de desprendimento variável entre 26 e 45 Hz;
E		Amplitude variável do movimento da ferramenta de desprendimento entre 10 e 30 mm;
D	B	Peso do mecanismo de desprendimento ≤ 60,00 N;
D	M	Força na interação da ferramenta de desprendimento com o ramo/frutos ≤ 20 N, em qualquer direção;
D	A	Limite da transmissão de vibração para o operador;
D	A	Quando separadas, a fonte de potência e a ferramenta de desprendimento, por elemento deformável, dito elemento tem que ser de fácil manipulação por parte do operador;
D	A	Fonte de potência < 500 W;
D	A	Fonte de potência elétrica;
D	B	Fonte de potência por baterias;
D	M	Alta eficácia mecânica;
E		Temperatura das partes expostas < 40°C; resfriamento por convecção livre do ar ambiente;
E		Materiais usináveis com ferramentas de aço HSS;
E		Elementos de fixação (parafusos, porcas, pinos, buchas, rolamentos) padronizados e comercializados no mercado local;
D	B	Materiais antiferrugem;
D	B	Materiais recicláveis;
D	A	Sinal de entrada por acionamento manual tipo gatilho;
E		Sinal de saída: vibração variável de acordo ao grau de acionamento na entrada;
E		EPI: óculos;
D	A	EPI: luvas e protetores auditivos;
E		Fonte de potência isolada para a chuva;
D	B	Fonte de potência costal;
D	A	Dispositivo de desprendimento sustentável com uma só mão;

Quadro 8 - Lista de requisitos para o mecanismo de desprendimento seletivo de café (conclusão).

E		Facilidade para o operador se deslocar, carregando o mecanismo, pelos cafezais adensados (1 m x 1 m) e em declividades até o 100%;
D	B	Baixo nível de ruído;
D	B	Baixo nível de vibração nas mãos.
E		Fabricação com maquinaria de usinagem disponível: torno, furadeira de bancada, solda elétrica inversora, esmerilhadeira angular e ferramentas de bancada;
E		Requerimento de instrumentos de medição para o controle de qualidade do mecanismo: paquímetro analógico, trena, tacômetro ótico, dinamômetro digital de 200 N;
E		Montagem manual utilizando parafusos, porcas, anéis, pinos de pressão, buchas e rolamentos, entre outros;
D	A	Baixa taxa de desgaste;
E		Operação simples, a ser realizada por pessoal com baixa qualificação;
E		Permitir o uso na lavoura, em condições variáveis do ambiente (chuva, orvalho ou poeira);
E		10°C < temperatura ambiente < 40°C;
D	A	Limpeza diária, para ser dada ao final da jornada de trabalho;
D	A	Ferramenta de desprendimento lavável;
E		Possibilidade de conserto em oficina de mecânica geral;
D	A	Frequência de lubrificação > 40 horas;
D	A	Frequência de revisão > 6 meses;
D	B	Sem peças pintadas;
D	A	Eficácia de desprendimento $\geq 99\%$ dos frutos maduros no pé;
D	A	Seletividade $\geq 95\%$ de frutos maduro na massa desprendida;
D	A	Capacidade de produção efetiva $\geq 30 \text{ Lh}^{-1}$;
D	A	Danos \leq que na colheita seletiva manual;
D	A	Utilização de materiais recicláveis: alumínio, bronze, aço, inox;
D	A	Custo \leq US\$350,00 (janeiro de 2018);
D	A	Duração do estudo: safras 2018 e 2019, tanto no Brasil quanto na Colômbia.

Legenda: *E/D=Exigido/Desejável. **Se Desejável, A/M/B=Alta/Média/Baixa relevância.

Fonte: Adaptado de Pahl et al. (2007).

4.1.2 Identificação dos principais problemas e elaboração da estrutura de função

No Quadro 9, são apresentados os resultados da aplicação da sequência dos passos recomendados por Pahl et al., 2007, como descritos no Quadro 3, para a identificação dos principais problemas por meio da abstração.

Quadro 9 - Procedimento de abstração para a lista de requisitos do mecanismo de desprendimento seletivo de café (continua).

Resultado itens 1° e 2°
Altura < 0,10 m;
Largura < 0,40 m;
Fonte de potência carregada pelo mesmo operador;
Movimento vibracional da ferramenta de desprendimento, alternativo ou circular;
Direção do movimento da ferramenta de desprendimento, em uma, duas ou três dimensões;
Frequência da ferramenta de desprendimento variável entre 26 e 45 Hz;
Amplitude do movimento da ferramenta de desprendimento variável entre 10 e 30 mm;
Materiais usináveis com ferramentas de acero HSS;
Elementos de fixação (parafusos, porcas, pinos, buchas, rolamentos) padronizados e comercializados no mercado local;
Sinal de saída: vibração variável de acordo ao grau de acionamento na entrada;
Fabricação com maquinaria de usinagem disponível: Centro de usinagem Romi modelo D600, torno mecânico, furadeira de bancada, solda elétrica inversora, esmerilhadeira angular e ferramentas de bancada;
Montagem manual, utilizando parafusos, porcas, anéis, pinos de pressão, buchas e rolamentos, entre outros;
Alta eficácia de seletividade de frutos maduro na massa desprendida;
Alta eficácia de desprendimento dos frutos maduros na planta;
Capacidade de produção efetiva superior que na colheita seletiva manual;
Danos que não comprometam a produtividade da safra seguinte;
Duração do estudo: safras 2018 e 2019, tanto no Brasil quanto na Colômbia.
Resultado item 3°
Geometria apropriada para se utilizar em cafezais adensados;
Facilidade de operar com o mecanismo, em encostas e cafezais adensados, por um só operador;
Movimento vibracional de frequência e amplitude variável;
Materiais usináveis com ferramentas de acero HSS;
Elementos de fixação (parafusos, porcas, pinos, buchas, rolamentos) padronizados e comercializados no mercado local;
Sinal de saída: vibração variável de acordo ao grau de acionamento na entrada;
Fabricação com maquinaria de usinagem disponível: torno, furadeira de bancada, solda elétrica inversora, esmerilhadeira angular e ferramentas de bancada;
Montagem manual utilizando parafusos, porcas, anéis, pinos de pressão, buchas e rolamentos, entre outros;

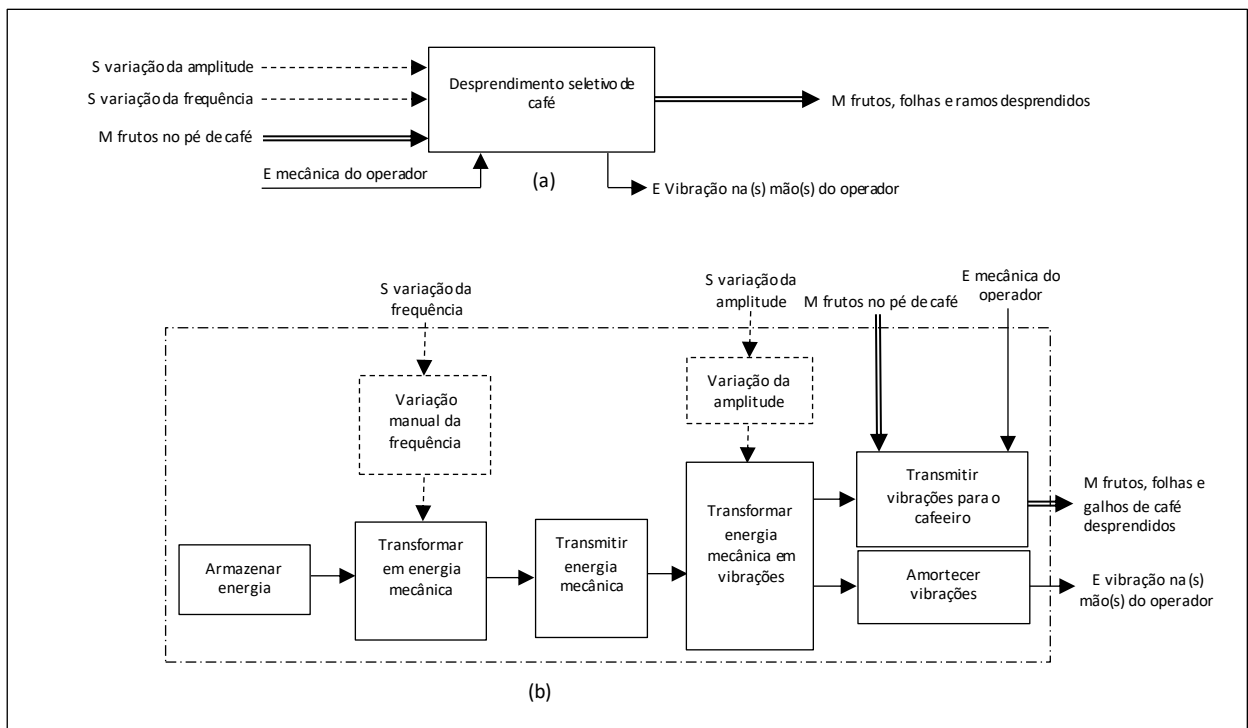
Quadro 9 - Procedimento de abstração para a lista de requisitos do mecanismo de desprendimento seletivo de café (conclusão).

Alta eficácia, seletividade e produtividade;
Resultado item 4°
Mecanismo manual, para operação por um só operador;
Vibrações variáveis à vontade do operador;
Materiais e procedimentos de oficina de fácil consecução em cidades do interior;
Alta eficácia, seletividade e capacidade de produção efetiva. Baixa danificação;
Resultado item 5°
Desprendimento seletivo café, mediante mecanismo portátil de vibrações mecânicas.

Fonte: Do autor (2021).

Na Figura 4, são mostradas a estrutura da função global e a de subfunções ao mecanismo de desprendimento seletivo de café, elaboradas.

Figura 4 - Função global (a) e subfunções (b) do mecanismo para desprendimento seletivo de café; E= energia, M = massa e S = sinal.



Fonte: Do autor (2021).

4.1.3 Proposição, seleção e combinação de princípios de funcionamento, para a constituição de estruturas de funcionamento

No Quadro 10, é apresentado o esquema classificador proposto, para as alternativas de solução das diferentes subfunções do mecanismo para desprendimento seletivo de café.

Quadro 10 - Classificação das alternativas de solução de subfunções do mecanismo para desprendimento seletivo de café (continua).

SF \ S	1	2	3	4	5	6	7
S1 Armazenar energia	Combustível 2T	Combustível 4T	Bateria chumbo-ácido	Bateria lítio-íon			
S2 Variação da frequência	Conversor DC-AC, com dimmer de acionamento manual	Conversor DC-AC, com inversor de frequência AC monofásico	Inversor DC de acionamento manual	ESC (Electronic Speed Control) com Arduino e variação com potenciômetro	Acelerador mecânico para motor de combustão		
S3 Transformar em energia mecânica	Motor de combustão de dois tempos	Motor de combustão de quatro tempos	Motor elétrico monofásico, com escovas	Motor elétrico de corrente contínua, brushless	Eletroímã com núcleo de movimento linear e retorno por mola		
S4 Transmitir energia mecânica	Eixo rígido com quadrante nos extremos	Cabo de aço flexível com quadrante nos extremos	Encaixe direto do motor para o mecanismo vibrador	Núcleo de eletroímã			

Quadro 10 - Classificação das alternativas de solução de subfunções do mecanismo para desprendimento seletivo de café (continua).

S5 Variação da amplitude	Coroas com diferentes excentricidades	Variação das rotações e da massa excêntrica.	Variação de frequência elétrica (para eletroímã)	Distância na(s) ferramenta(s) de desprendimento, entre o ponto de contato com o ramo e o engaste na máquina	Variação do tamanho de perfis came	Variação do comprimento de elo	
S6 Transformar energia mecânica em vibrações	Mecanismo de biela manivela excêntrica, para conversão das rotações uniformes em movimento alternativo linear vibracional	Mecanismo de massa desbalanceada com possibilidade de variação da massa	Núcleo de eletroímã em movimento linear alternativo	Perfis geométricos de 2, 3 e 4 cames (cada perfil é a ferramenta de desprendimento)			

Quadro 10 - Classificação das alternativas de solução de subfunções do mecanismo desprendimento seletivo de café (conclusão).

S7 Transmitir vibrações para a(s) ferramenta(s) de desprendimento	Mecanismo biela-elo com rotação alternada do elo	Vibração propriamente dita do suporte da(s) ferramenta(s) de desprendimento	Vibração alternativa do núcleo do eletroímã, que está solidário com a ferramenta de desprendimento				
S8 Transmitir vibrações para o cafeeiro	2 ferramentas em “U”, com geometria interna de trapézio isósceles, de bases 75 mm e 55 mm e altura 60 mm	2 ferramentas em “U”, com geometria interna de trapézio isósceles, de bases 55 mm e 40 mm e altura 50 mm	Uma haste reta de 150 mm em contato com o ramo	Uma haste reta de 200 mm em contato com o ramo	Ferramentas comerciais do tipo “mãozinha”	Contato de um batidor, tipo shaker, na parte lenhosa do ramo que contém os frutos	Contato de perfil tipo came, sobre locais sem grão, no ramo
S9 Amortecer vibrações	Espuma emborrachada	Tubo do varão de no mínimo 0,50 m de comprimento, para sujeição afastada da(s) ferramenta(s) de desprendimento	Elemento de união haste-ferramenta(s), em material flexível (tipo borracha)				

Fonte: Do autor (2021).

No Quadro 11, são apresentados os resultados para os princípios de funcionamento, propostos no Quadro 10, avaliados mediante aos critérios apresentados no Quadro 3, sendo que, para os critérios C; D; E e F, foram adotada uma escala de notas entre 1 e 5, com variações no campo dos números inteiros (adaptado de PAHL et al., 2007). Segundo esta metodologia foram eliminados aqueles princípios que não conseguiram ser avaliados com “Sim” (S) em qualquer um dos critérios A e B.

Quadro 11 - Resultados da avaliação dos princípios de funcionamento propostos (continua).

S	1	2	3	4	5	6	7
SF							
S1	Combustível 2T	Combustível 4T	Bateria chumbo-ácido 17*	Bateria lítio-íon 18			
	A B C D E F S N	A B C D E F S N	A B C D E F S S 4 5 4 4	A B C D E F S S 5 3 5 5	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F
S2	Conversor DC-AC, com dimmer de acionamento manual 18	Conversor DC-AC, com inversor de frequência AC monofásico 17	Inversor DC de acionamento manual 18	ESC (<i>Electronic Speed Control</i>) com Arduino e variação com potenciômetro 17	Acelerador mecânico para motor de combustão		
	A B C D E F S S 3 5 5 5	A B C D E F S S 5 2 5 5	A B C D E F S S 5 3 5 5	A B C D E F S S 5 2 5 5	A B C D E F S N	A B C D E F	A B C D E F
S3	Motor de combustão de dois tempos	Motor de combustão de quatro tempos	Motor elétrico monofásico, com escovas 18	Motor elétrico de corrente contínua, brushless 18	Eletroímã alternado, com movimento linear do núcleo e retorno por mola		
	A B C D E F S N	A B C D E F S N	A B C D E F S S 4 5 4 5	A B C D E F S S 5 4 4 5	A B C D E F S N	A B C D E F	A B C D E F
S4	Eixo rígido com quadrante nos extremos 16	Cabo de aço flexível com quadrante nos extremos 18	Encaixe direto do mecanismo vibrador no motor 18	Núcleo de eletroímã			
	A B C D E F S S 3 4 4 5	A B C D E F S S 4 4 5 5	A B C D E F S S 5 5 3 5	A B C D E F S N	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F
S5	Coroas com diferentes excentricidades 15	Variação das rotações e da massa excêntrica 20	Variação da constante da mola (para eletroímã)	Distância na(s) ferramenta(s) de desprendimento, entre o ponto de contato com o ramo e o engaste no porta-ferramenta 19	Variação do tamanho de perfis came	Variação de comprimento do elo 14	
	A B C D E F S S 3 3 4 5	A B C D E F S S 5 5 5 5	A B C D E F S N	A B C D E F S S 4 5 5 5	A B C D E F S N	A B C D E F S S 2 2 5 5	A B C D E F

Quadro 11 - Resultados da avaliação dos princípios de funcionamento propostos (conclusão).

S6	Mecanismo de biela manivela excêntrica, para conversão das rotações uniformes em movimento alternativo linear vibracional 19	Mecanismo de massa desbalanceada com possibilidade de variação da massa 20	Núcleo de eletroímã em movimento linear alternativo	Perfis geométricos de 2, 3 e 4 cames (cada perfil é a ferramenta de desprendimento) 19			
	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F
	S S 5 4 5 5	S S 5 5 5 5	S N	S N			
S7	Mecanismo biela-elo com rotação alternada do elo 19	Vibração propriamente dita do suporte da(s) ferramenta(s) de desprendimento 20	Vibração alternativa do núcleo do eletroímã, que está solidário com a ferramenta de desprendimento				
	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F
	S S 5 4 5 5	S S 5 5 5 5	S N				
S8	Dois ferramentas em “U” abraçando as rosetas de café, com geometria interna de trapézio isósceles, de bases 75 mm e 55 mm e altura 60 mm 19	Dois ferramentas em “U” abraçando as rosetas de café, com geometria interna de trapézio isósceles, de bases 55 mm e 40 mm e altura 50 mm 19	Uma haste reta de 160 mm em contato com o ramo 19	Uma haste reta de 190 mm em contato com o ramo 19	Ferramentas comerciais do tipo “mãozinha”, adaptadas. 18	Contato de um batidor, tipo shaker, na parte lenhosa do ramo que contém os frutos	Contato de perfil tipo came, sobre locais sem grão, no ramo 18
	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F
	S S 4 5 5 5	S S 4 5 5 5	S S 4 5 5 5	S S 4 5 5 5	S S 3 5 5 5	S N	S S 3 5 5 5
S9	Espuma emborrachada 20	Tubo do varão de no mínimo 0,50 m de comprimento, para sujeição afastada da(s) ferramenta(s) de desprendimento 19	Elemento de união haste-ferramenta(s), em material flexível (tipo borracha) 18				
	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F	A B C D E F
	S S 5 5 5 5	S S 5 4 5 5	S S 5 3 5 5				

Legenda: S=Solução e SF=Subfunção. Letras A, B, C, D, E e F correspondem aos critérios de avaliação (Quadro 3) e embaixo as notas correspondentes a cada uma. Quando ambos os critérios A e B são qualificados com S, continua-se a qualificação numérica dos critérios C, D, E e F. *somatória dos critérios de avaliação C, D, E e F.

Fonte: Do autor (2021).

Mais um critério de seleção dos princípios foi aplicado a todos aqueles que conseguiram obter nota numérica na avaliação anterior, levando em conta: as atualizações tecnológicas de outros projetos; os materiais e elementos disponíveis; a oferta comercial em Lavras e região e a disponibilidade de recursos financeiros do projeto. Os princípios de funcionamento que conseguiram avançar nesta seleção foram codificados para conformar a “matriz morfológica” (ZWICKY, 1.966 – 1.971, citado por PAHL et al. 2007), apresentada no Quadro 12, em que cada alternativa de solução é assinalada com identificação no formato A_{mn} , em que os subíndices “m” e “n” representam a fila (subfunção) e a coluna (solução), respectivamente.

Quadro 12 - Alternativas de solução para subfunções codificadas em “matriz morfológica”
(continua).

S SF	1	2	3	4
S1			Bateria chumbo-ácido A_{13}	
S2	Conversor DC-AC, com <i>dimmer</i> de acionamento manual A_{21}			ESC (<i>Electronic Speed Control</i>) com Arduino e variação com potenciômetro A_{24}
S3			Motor elétrico monofásico, com escovas A_{33}	Motor elétrico de corrente contínua, <i>brushless</i> A_{34}
S4		Cabo de aço flexível com quadrante nos extremos A_{42}	Encaixe direto do mecanismo vibrador no motor A_{43}	
S5	Coroas com diferentes excentricidades A_{51}	Variação das rotações e da massa excêntrica A_{52}		Distância, na(s) ferramenta(s) de desprendimento, entre o ponto de contato com o ramo e o engaste na máquina A_{54}

Quadro 12 - Alternativas de solução para subfunções codificadas em “matriz morfológica”
(conclusão).

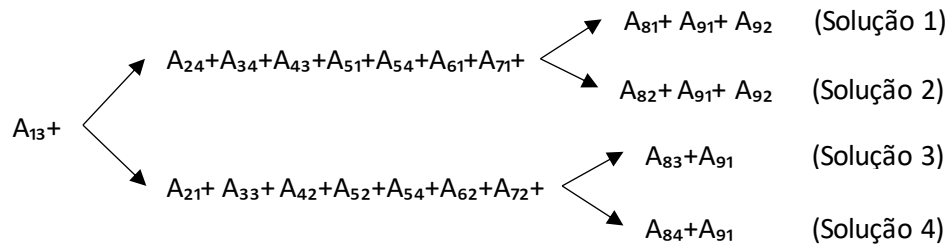
S6	Mecanismo de biela manivela excêntrica, para conversão das rotações uniformes em movimento alternativo linear vibracional A₆₁	Mecanismo de massa desbalanceada com possibilidade de variação da massa A₆₂		
S7	Mecanismo biela-elo com rotação alternada do elo A₇₁	Vibração propriamente dita do suporte da(s) ferramenta(s) de desprendimento A₇₂		
S8	Duas ferramentas em “U”, abraçando as rosetas de café, com geometria interna de trapézio isósceles, de bases 75 mm e 55 mm e altura 60 mm A₈₁	Duas ferramentas em “U”, abraçando as rosetas de café, com geometria interna de trapézio isósceles, de bases 55 mm e 40 mm e altura 50 mm A₈₂	Uma haste reta de 125 mm, em contato com o ramo A₈₃	Uma haste reta de 200 mm, em contato com o ramo A₈₄
S9	Espuma emborrachada A₉₁	Tubo do varão de no mínimo 0,50 m de comprimento, para sujeição afastada da(s) ferramenta(s) de desprendimento A₉₂		

Fonte: Adaptado de Pahl et al. (2007).

Para as combinações sistemáticas, foram realizadas todas as alternativas de solução, codificadas como constam no Quadro 12, que conseguem atender a função global e as quais também são possíveis de serem realizadas na prática, resultando nas quatro (4) soluções,

correspondentes às concatenações sinalizadas com os símbolos “+” e setas, apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Representação esquemática das combinações de princípios de solução para atender a solução global “desprendimento seletivo de café”.



Fonte: Do autor (2021).

É importante destacar, nesta parte, a facilidade para a implementação das soluções correspondentes às subfunções S8 e S9, com códigos A_{81} ; A_{82} ; A_{83} e A_{91} ; A_{92} , respectivamente, visto, de uma parte, que as soluções correspondentes com a subfunção S8 poderiam ser obtidas pela reutilização de sucata de ferramentas de derriça e materiais poliméricos de baixo custo e, da outra parte, que as soluções da subfunção S9 são parte integral das máquinas portáteis utilizadas como base para a fabricação das soluções.

4.1.4 Avaliação e seleção das soluções para materialização

Tendo em vista a disponibilidade de peças e elementos de baixo custo para a implementação de todas as soluções, sendo que elas são atendidas, em duplas, pela mesma fonte de potência e o mesmo esquema mecânico de geração das vibrações (soluções 1 e 2 de um lado e soluções 3 e 4 do outro), foi decidida a materialização de todas as quatro soluções, para serem submetidas à avaliação científica. As soluções de cada uma das duplas, “1 e 2” e “3 e 4”, somente diferem pelas ferramentas de desprendimento.

4.1.5 Materialização das soluções

As soluções 1 e 2 foram desenvolvidas, a partir de modificações sobre um protótipo de derriça por vibração no sistema biela manivela e, para as soluções 3 e 4, foi proposto um novo protótipo de mecanismo de desprendimento, também por vibração, baseado no princípio de

rotação contínua com massa desbalanceada, afixado em cabo flexível, ambos sistemas utilizando como fonte de potência motores elétricos.

Na Figura 6, são mostrados os protótipos desenvolvidos para as soluções materializadas. O protótipo da Figura 6 (a) foi utilizado, para as soluções “1 e 2”, enquanto o protótipo da Figura 6 (b) correspondem às soluções “3 e 4”.

Figura 6 - Protótipos desenvolvidos para as soluções: “1 e 2”, (a) e “3 e 4”, (b).

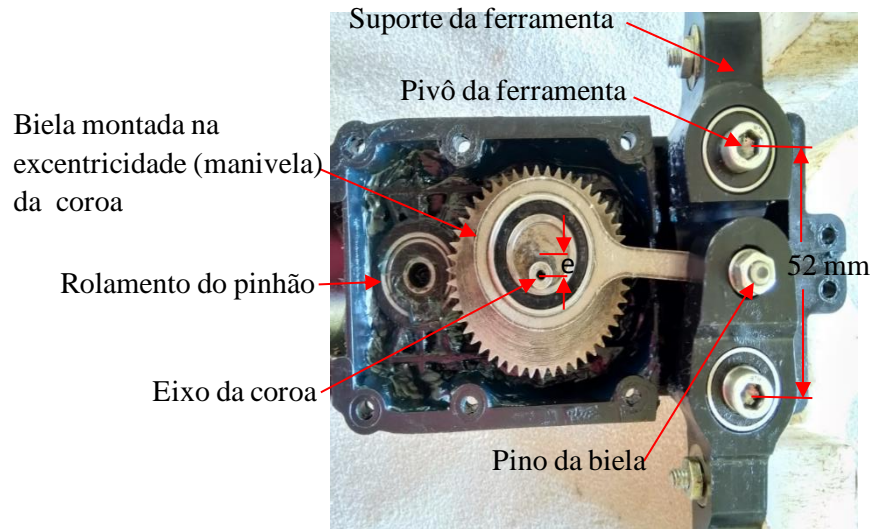


Fonte: Do autor (2021).

➤ Soluções 1 e 2

A construção das soluções 1 e 2 foi baseada no protótipo de derriçadora de olivas, com motor *brushless* a 24 VDC, limite de 12.000 rpm e variador de rotações contínuo, tipo *ESC* (*Electronic Speed Control*), cujo sistema de transmissão de potência, do motor para as ferramentas de desprendimento, é mostrado na Figura 7. A transmissão é composta por uma cadeia cinemática de conjunto pinhão-coroa; sistema biela-manivela e elo pivotante

Figura 7 - Mecanismo adaptado para as soluções 1 e 2.



Fonte: Do autor (2021).

O protótipo foi estudado em sua cinemática, necessitando projetar relação de transmissão específica, para atingir as frequências maiores a 30 Hz, definidas para os testes dessas soluções. A relação de transmissão passou a ser de 2,63:1,00 (50 dentes na coroa e 19 dentes no pinhão do motor).

O estudo cinemático, também demonstrou a necessidade de projetar duas novas excentricidades da coroa (cota “e” da Figura 7), para se obter as amplitudes angulares, nas ferramentas de desprendimento, também determinadas para os testes.

Na Tabela 1, são especificados os valores da excentricidade das coroas, indicada pela cota “e” na Figura 7 e, também, são especificados os ângulos e os arcos varridos por cada uma das ferramentas de desprendimento, correspondentes a meio ciclo do seu movimento alternativo, que é proporcional às excentricidades correspondentes. O centro de rotação, para o deslocamento angular de cada uma das ferramentas de desprendimento, está alocado em cada pivô da ferramenta (FIGURA 7), com o ângulo de rotação definido pela meia distância entre os dois pivôs (cota de 52 mm na Figura 7) e o comprimento total do deslocamento do pino da biela, que é igual ao dobro da excentricidade da coroa.

Tabela 1 - Valores das cotas e dos deslocamentos associados às soluções 1 e 2.

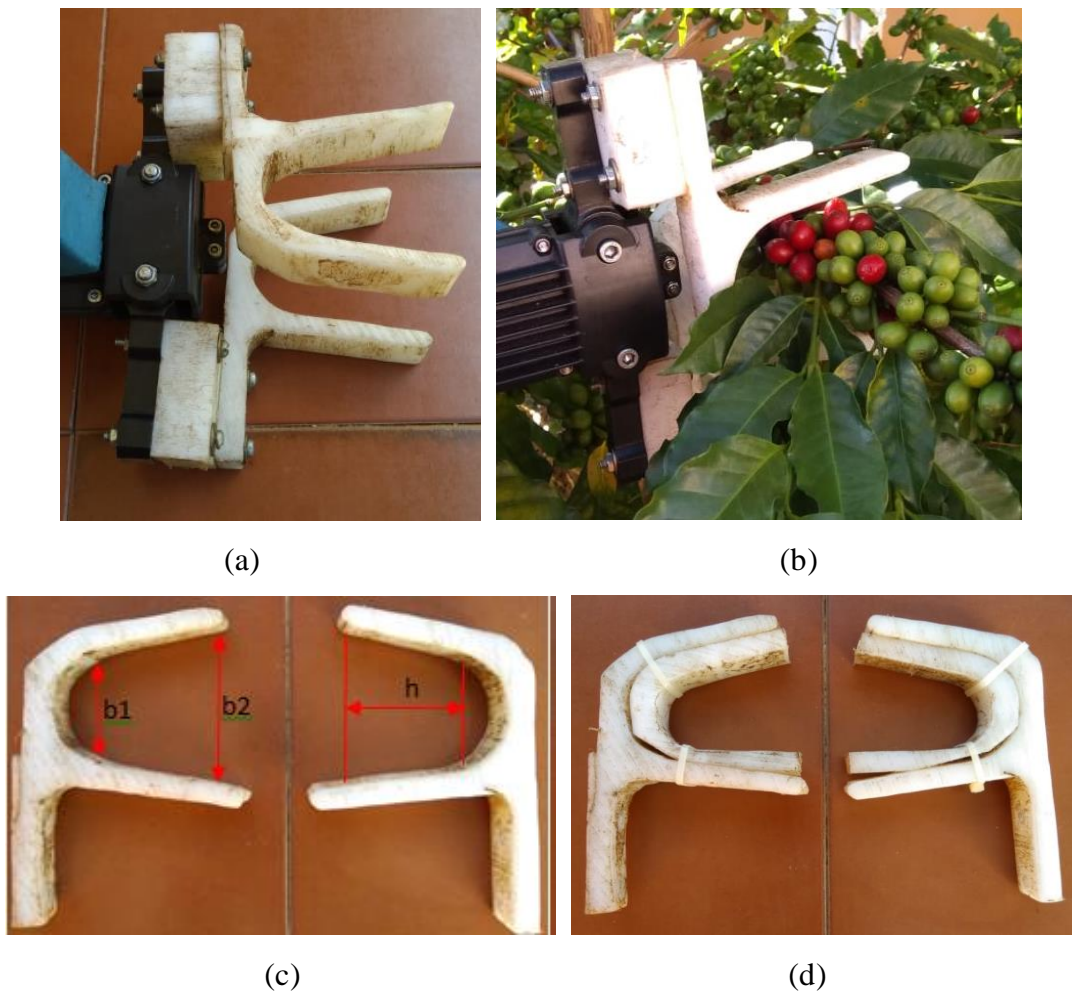
Deslocamento rotacional das ferramentas de desprendimento			
Cota e (mm)	Angular (°)	Arco solução 1* (mm)	Arco solução 2* (mm)
1,5	6,6	16	17
3,0	13,2	32	35
4,5**	19,6		

Legenda: *Varrido no ponto médio entre as suas pontas e arredondado aos inteiros; **Original da máquina, não utilizada nos experimentos.

Fonte: Do autor (2021).

Na Figura 8 (a), é apresentada a forma da montagem das soluções 1 e 2 e, na Figura 8 (b), é mostrada a forma em que as ferramentas de desprendimento dessas soluções entram em contato com os frutos do cafeeiro. Estas ferramentas somente diferem entre si pelo seu tamanho interno, como mostrado nas Figuras 8 (c) e 8 (d), respectivamente. Os valores, para cada uma dessas soluções, das cotas indicadas, na Figura 8 (c), são descritos na Tabela 2.

Figura 8 - Ferramentas de desprendimento das soluções 1 e 2: montagem na máquina (a); posicionamento quanto aos frutos do cafeeiro (b); solução 1 (c) e solução 2 (d).



Fonte: Do autor (2021).

Tabela 2 - Valores das dimensões internas para as soluções 1 e 2.

Dimensões das cotas (mm)		
Cota	Solução 1	Solução 2
b1	55	40
b2	75	55
h	60	50

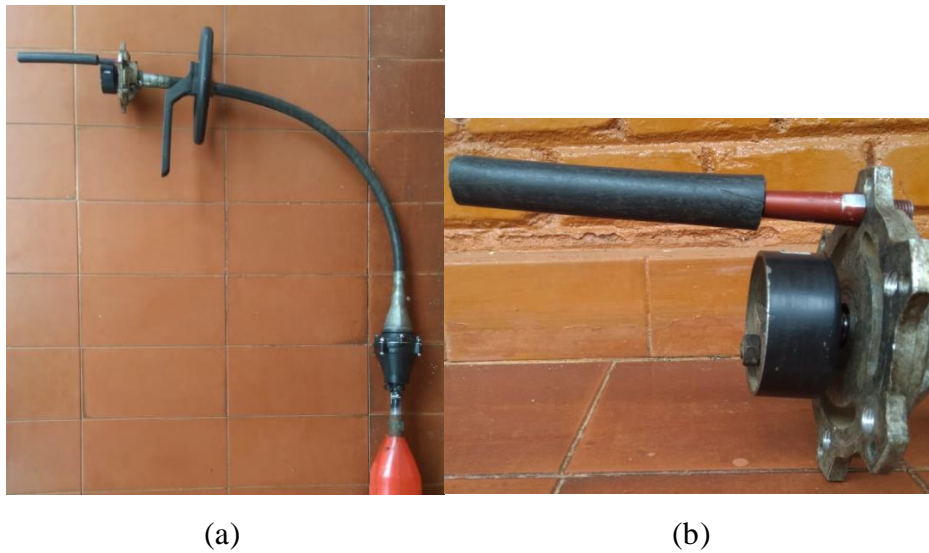
Fonte: Do autor (2021).

Tendo em vista que a altura das plantas de café da Colômbia não ultrapassa os 2,0m e para facilitar o deslocamento pelos cafezais adensados, sem comprometer do desempenho operacional, o comprimento da haste do protótipo foi definida em 1,0 m.

➤ Soluções 3 e 4

Para as soluções 3 e 4, foi utilizado, como fonte de potência, um motor de roçadeira elétrica de 127 V – 50/60 Hz, com 1 kW de potência a 9.000 rpm de rotação. A variação da rotação foi dada por variador eletrônico de frequência, externo ao motor. A Figura 9 (a) demonstra o protótipo no qual é montada a ferramenta de desprendimento (Figura 9 - b).

Figura 9 - Configuração do protótipo para as soluções 3 e 4 (a) e ferramenta de desprendimento montada no suporte (b).



Fonte: Do autor (2021).

Para gerar a vibração nas soluções 3 e 4, foram utilizadas massas desbalanceadas, (FIGURA 10 - a), posicionadas no suporte do cabo flexível, sendo que a variação da amplitude de vibração se dá pela quantidade de massa utilizadas (FIGURA 10 - b). As massas desbalanceada são de 1 a 6 chapas semicirculares instaladas no sino de proteção do suporte. A massa média das chapas semicirculares é de 45,8g, e a massa do conjunto parafuso-porca de 18,4g.

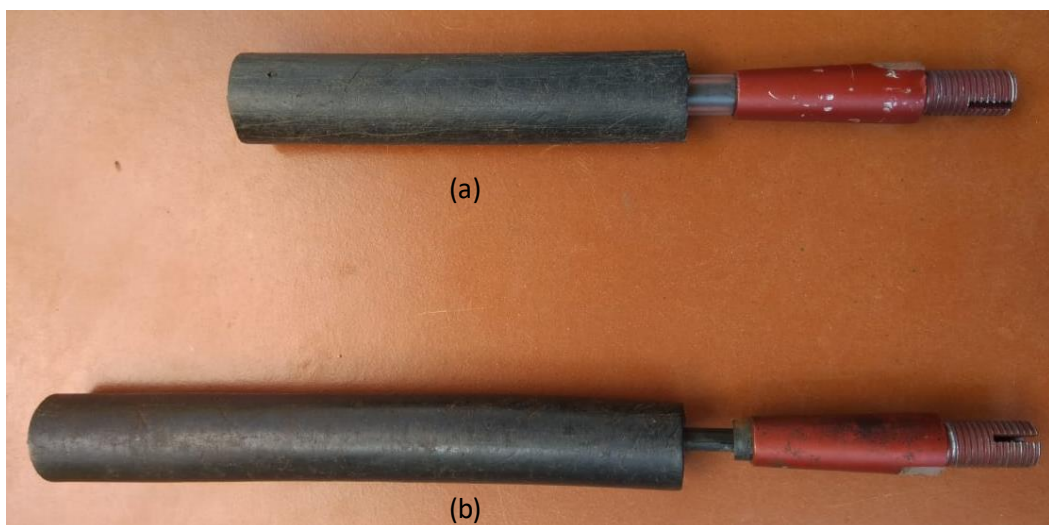
Figura 10 – Ponta flexível e suporte das massas desbalanceadas para as soluções 3 e 4.



Fonte: Do autor (2021).

A diferença da solução 3 e 4 ocorre pelo comprimento da haste de derriça, ancorada no suporte da ponta da ferramenta, com comprimento de 150 mm, para a solução 3 (FIGURA 11 - a) e de 200 mm, para a solução 4 (FIGURA 11 - b). Estas hastes são de fibra de carbono, emborrachadas, para evitar ferimentos dos ramos do cafeeiro.

Figura 11 – Hastes de desprendimento para as soluções 3 (a) e 4 (b).



Fonte: Do autor (2021).

Nas soluções 3 e 4, a transmissão de vibração para os ramos do cafeeiro ocorre pelo contato da haste vibratória próxima das rosetas dos frutos (FIGURA 12). O melhor resultado de desprendimento dos frutos, ocorreu segurando o ponteiro do ramo trabalhado, para obter um duplo engaste, que permitiu maior uniformidade da amplitude de vibração ao longo do ramo e, com isso, condições mais efetivas e homogêneas de vibração para todos os frutos do ramo, destacando preferencialmente os frutos maduros.

Figura 12 – Transmissão de vibração para o ramo do cafeeiro das soluções 3 e 4.



Fonte: Do autor (2021).

4.2 Calibração das máquinas

Em razão do agrupamento inicial em duplas, por fonte de potência das soluções “1 - 2” e “3 - 4”, os resultados são apresentados na ordem supracitada para a determinação da melhor faixa de frequências e amplitude, para a seleção da melhor solução e sua otimização.

Determinação da amplitude e frequências para as soluções 1 e 2

Os experimentos foram realizados na fazenda São Sebastião, Carvalhópolis, MG, Brasil, em gleba de café de 15 anos de idade, variedade Catuaí Vermelho, esqueletada dois anos antes dos ensaios, com espaçamento de 3,0 m entre linhas e 1,0 m entre plantas, totalizando 3.333 planta ha⁻¹ e altura média das plantas de 3 m.

Dado que as ferramentas da solução 2 quebraram na faixa de altas frequências, a calibração da máquina foi realizada com as ferramentas da solução 1. A determinação da amplitude e a faixa de frequências da máquina que movimenta as soluções 1 e 2, foi realizada mediante análise de variância fatorial, com teste de Tukey a 5% de probabilidade, para comparação de médias.

O primeiro ensaio foi realizado utilizando a maior amplitude de deslocamento angular (13,2°), com frequências de 27; 30; 35 e 40 Hz (menor faixa de frequências). Foi avaliado a Eficácia de seletividade e Volume total de frutos desprendidos, conforme resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Observa-se que a eficácia de seletividade não apresenta resultados significativos com a frequência de vibração, sendo a média geral de 77,2%, Com relação ao volume desprendido, também houve um discreto aumento com a maior frequência, porem, da mesma forma não significativo, com média de 0,96 litros/planta para o volume total desprendido.

Nos dois casos, os coeficientes de variação podem ser considerados médios, para experimentos em campo, segundo Pimentel-Gomes (2009). Mesmo não havendo diferenças significativas, a frequências de 40 Hz tende a apresentar maior volumes total desprendido, evidenciado por maior numero de frutos verdes desprendidos, indicando uma regulagem indesejável para os princípios estabelecidos do projeto.

Tabela 3 - Eficácia de seletividade para a solução 1, com amplitude de 13,2° e frequências de 27; 30; 35 e 40 Hz (SISVAR v. 5.6).

Fre (Hz)	Eficácia de seletividade (%)			
	27	30	35	40
Média	76ns	76ns	79ns	78ns
δ	9,01	12,90	3,61	2,89
Mín.	67	65	75	76
Máx.	85	90	82	81

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Fre	3	24,000000	8,000000	0,119	0,9465ns
erro	8	538,000000	67,250000		
Total corrigido	11	562,000000			

CV (%) 10,65; Média geral=77%;

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 4 - Volume total desprendidos para a solução 1, com amplitude de 13,2° e frequências de 27; 30; 35 e 40 Hz (SISVAR v. 5.6).

Fre (Hz)	Volume total de frutos desprendidos (L)			
	27	30	35	40
Média	0,97ns	0,83ns	1,00ns	1,03ns
Δ	0,08	0,15	0,16	0,14
Mín.	0,9	0,69	0,84	0,93
Máx.	1,06	0,98	1,15	1,19

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Fre	3	0,067625	0,022542	1,252	0,3538ns
erro	8	0,144067	0,018008		
Total corrigido	11	0,211692			

CV (%) 13,99; média geral=0,958 litros;

Fonte: Do autor (2021).

O segundo ensaio, foi realizado utilizando a menor amplitude de deslocamento angular(6,6°), com frequências de 40; 42 e 45 Hz (maior faixa de frequências), para as mesmas variáveis, Eficácia de seletividade e Volume total de frutos desprendidos. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Eficácia de seletividade para a solução 1, com amplitude de 6,6° e frequências de 40; 42 e 45 Hz (SISVAR v. 5.6).

Fre (Hz)	Eficácia de seletividade (%)		
	40	42	45
Média	76ns	75ns	76ns
Δ	6,43	15,13	7,00
Mín.	69	58	69
Máx.	81	87	83

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Fre	2	2,282222	1,141111	0,010	0,9898ns
erro	6	669,340000	111,556667		
Total corrigido	8	671,622222			

CV (%) 13,96 ; média geral = 75,7%. Fonte: Do autor (2021).

Tabela 6 - Volume total desprendido para a solução 1, com amplitude de 6,6° e frequências de 40; 42 e 45 Hz (SISVAR v. 5.6).

Fre (Hz)	Volume total de frutos desprendidos (L)		
	40	42	45
Média	0,92ns	1,13ns	1,05ns
Δ	0,15	0,06	0,19
Mín.	0,75	1,06	0,92
Máx.	1,02	1,18	1,27

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Fre	2	0,065156	0,032578	1,546	0,2875ns
erro	6	0,126467	0,021078		
Total corrigido	8	0,191622			

CV (%) 14,03; média geral = 1,03 litros. Fonte: Do autor (2021).

Neste segundo ensaio também não se observa diferenças significativas da eficácia de seletividade com a variação da frequência, com média geral de 75,7%, menor que para o primeiro ensaio, mesmo considerando vibrações maiores, o que pode estar relacionado com a menor amplitude, e assim, menor vigor de vibração. Quando ao volume desprendido os resultados também não são significativos, com médio de 1,03 litros/planta.

Neste ensaio foi observado um efeito de ordem operacional para as frequências maiores de 42 e 45 Hz, com vibrações que geraram desconforto na mão do operador.

No último ensaio da máquina das soluções 1 e 2, a eficácia de seletividade e o volume total desprendidos, foram testadas variando as amplitudes em 6,6° e 13,2°, em frequência de 40 Hz, que foi comum a ambos testes. Os resultados são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Eficácia de seletividade para a solução 1, com amplitudes de 6,6° e 13,2° e frequência de 40 Hz e (SISVAR v. 5.6).

Amplitude	Eficácia de seletividade (%)	
	6,6°	13,2°
Média	7ns	78ns
Δ	6,43	2,89
Mín.	69	76
Máx.	81	81

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Amp	1	2,666667	2,666667	0,107	0,7596ns
erro	4	99,333333	24,833333		
Total corrigido	5	102,000000			

CV = 6,47%; média geral = 77%.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 8 - Volume total desprendido para a solução 1, com amplitudes de 6,6° e 13,2° e frequência de 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).

Frequência (Hz)	Volume total de frutos desprendidos (L)	
	6,6°	13,2°
Média	0,92ns	1,03ns
Δ	0,15	0,14
Mín.	0,75	0,93
Máx.	1,02	1,19

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Amp	1	0,016017	0,016017	0,747	0,4361ns
erro	4	0,085733	0,021433		
Total corrigido	5	0,101750			

CV = 15,02%; média geral = 0,98 litros.

Fonte: Do autor (2021).

Para a frequência comum de 40Hz, a eficácia de seletividade não é significativa entre a menor e maior amplitude, contudo o volume desprendido pela solução 1, na maior amplitude, foi 1,03 litros contra 0,92 litros na menor amplitude. Mesmo com a diferença não significativa, este resultado demonstra a tendência de maior vigor de vibração com a maior amplitude.

Em todas as análises da máquina das soluções 1 e 2, não se observa efeito significativo dos fatores avaliados, sendo que a frequência de 40 Hz corresponde ao limite superior para a amplitude de 13,2° e limite inferior para a amplitude de 6,6°. Em geral pode-se notar nos ensaios, que independentemente da amplitude, para as frequências maiores os níveis de desconforto para o operador foram maiores.

➤ **Determinação da amplitude e frequências para as soluções 3 e 4**

Os experimentos foram realizados na fazenda *La Florida, Gigante, Huila*, Colômbia, em lavoura de café arábica de três anos, variedade *Supremo*, com espaçamentos de 1,4 m entre linhas e 1,0 m entre plantas, totalizando 7.143 planta ha⁻¹ e altura média das plantas de 2 m.

Ensaio foram realizados para definir a amplitude operacional em função do número de massas desbalanceadas, como demonstra a Figura 10, identificando o melhor número de massas (amplitude), e a melhor faixa de frequência na etapa de calibração.

Para determinar a melhor amplitude a ser utilizada nas soluções 3 e 4, foram realizados ensaios utilizando a haste de desprendimento de 20 mm, que caracteriza a solução 4, por ser a de maior massa com isto impor a maior amplitude. Os resultados foram avaliados estatisticamente para eficácia de seletividade, com vibração de 40 Hz e com a quantidade de massas desbalanceadas 4, 5 e 6, conforme Tabelas 9 e 10.

Para a eficiência de seletividade a média foi de 93,2%, não havendo diferenças significativas com a quantidade de massas desbalanceadas. Porém quanto ao volume total desprendido, observa-se resultados crescentes a medida que se aumenta o número de massas desbalanceadas, chegando a 4,70 L/planta, com 6 massas e registrando diferença significativa em relação a 4 massas.

Para 5 massas desbalanceadas, o volume desprendido foi de 3,88L/planta não diferindo estatisticamente de 6 massas, contudo observou-se menor exigência mecânica e maior conforto operacional. Desta forma optou-se por estabelecer 5 massas desbalanceadas, para a continuidade dos testes.

Tabela 9 - Eficácia de seletividade para a solução 4, com massas desbalanceadas 4, 5 e 6 e frequência de 40Hz. (SISVAR v. 5.6).

Massas	Eficácia de seletividade (%)		
	4,0	5,0	6,0
Média	94ns	91ns	94ns
Δ	1,53	3,00	2,08
Mín.	93	88	92
Máx.	96	94	96

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
Massas	2	22,222222	11,111111	2,128	0,2003ns
Erro	6	31,333333	5,222222		
Total	8	53,555556			

corrigido

CV = 2,45%; média geral = 93,2%.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 10 - Volume total desprendido para a solução 4, com massas desbalanceadas 4, 5 e 6 e frequência de 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).

Massas	Volume total de frutos desprendidos (L)		
	4,0	5,0	6,0
Média	2,48 b	3,88 a	4,70 a
Δ	0,77	0,12	0,43
Mín.	1,6	3,75	4,2
Máx.	3,05	4	5

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
NMASSAS	2	7,540556	3,770278	14,022	0,0055 **
erro	6	1,613333	0,268889		
Total corrigido	8	9,153889			

CV = 14,06%; media geral = 3,69 litros. Médias seguidas com as mesmas letras não diferem entre si
Fonte: Do autor (2021).

4.3 Análise das soluções “1 - 2” e “3 - 4”

Para a definição da melhor solução dentre as quatro, considerando as premissas do projeto conceitual e com os valores da faixa de frequências e amplitude identificadas na etapa de calibração, foram realizadas comparações das duplas “1 – 2” , “3 – 4” e, em último caso, da dupla “1 – 4”, composta pelas melhores soluções resultantes das duas primeiras comparações.

➤ **Comparação das soluções 1 e 2**

Os experimentos foram realizados na fazenda São Sebastião, Carvalhópolis, MG, Brasil, em gleba de café de 15 anos de idade, variedade Catuaí Vermelho, esqueletada dois anos antes dos ensaios, com espaçamento de 3,0 m entre linhas e 1,0 m entre plantas, totalizando 3.333 planta ha⁻¹ e altura média das plantas de 3 m.

Foi realizada a comparação das soluções 1 e 2, mediante análise de variância fatorial 2 x 2 (2 soluções x 2 frequências), com teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação de médias para os parâmetros eficácia de seletividade e volume total de frutos desprendidos. Os resultados são apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Para a frequência de 27 Hz a solução 1 apresentou a melhor eficácia de seletividade, com 88%, com diferença significativa, enquanto a solução 2 apresentou 76%, sendo a solução de menor amplitude. Para o desdobramento das soluções na frequência de 40 Hz, a solução 2 mostrou a melhor eficácia de seletividade, com 76%, contra 68% da solução 1, com diferença significativa, evidenciando o possível e maior vigor de vibração gerada pela maior amplitude, observando o aumento de frutos verdes desprendidos, o que prejudica a eficácia de seletividade, que representa o maior número de frutos maduros desprendidos. Para o volume total desprendido as diferenças não foram significativas, nem mesmo para os desdobramentos entre soluções e frequências.

Na comparação das soluções 1 e 2, em termos de eficácia de seletividade e volume total desprendidos, foi evidenciado o melhor desempenho da solução 1, pelo fato de ter apresentado a maior eficácia de seletividade 88%. Como o volume total desprendido não foi significativos, a solução 2 foi descartada, continuando com a solução 1, para a fase seguinte da avaliação.

Tabela 11 - Eficácia de seletividade para as soluções 1 e 2, com frequências de 27 e 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).

		Eficácia de seletividade (%)		
		Frequência (Hz)		
Solução		27	40	
1	Média	88 Aa	68 Bb	
	Δ	1,15	3,60	
	Mín.	87	65	
	Máx.	89	72	
2	Média	76 Ba	78 Aa	
	Δ	9,02	2,87	
	Mín.	67	76	
	Máx.	85	81	

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
SOLUÇÃO	1	4,083333	4,083333	0,157	0,7022 n.s.
FRE	1	234,083333	234,083333	9,003	0,0171*
SOL*FRE	1	352,083333	352,083333	13,542	0,0062**
erro	8	208,000000	26,000000		
Total corrigido	11	798,250000			

CV = 6,60%; média geral = 77%; Médias seguidas com as mesmas letras, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 12 - Volume total de frutos desprendidos para as soluções 1 e 2, com frequências de 27 e 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).

		Volume total de frutos desprendidos (L)		
		Frequência (Hz)		
Solução		27	40	
1	Média	0,93ns	0,85ns	
	Δ	0,15	0,27	
	Mín.	0,76	0,55	
	Máx.	1,03	1,06	
2	Média	0,97ns	1,03ns	
	Δ	0,08	0,14	
	Mín.	0,9	0,93	
	Máx.	1,06	1,19	

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
SOL	1	0,035208	0,035208	1,169	0,3112 n.s.
FRE	1	0,000675	0,000675	0,022	0,8847 n.s.
SOL*FRE	1	0,014008	0,014008	0,465	0,5145 n.s.
erro	8	0,241000	0,030125		
Total corrigido	11	0,290892			

CV = 18,35%; média geral = 0,95 litros.

Fonte: Do autor (2021).

➤ **Comparação das soluções 3 e 4**

Os experimentos foram realizados, na fazenda Colina, Luminárias, MG, Brasil, em lavoura de café arábica de 16 anos, variedade Catucaí Amarelo, esqueletada três anos antes do experimento, com espaçamentos de 2,8 m entre linhas e 0,8 m entre plantas ($4.464 \text{ planta ha}^{-1}$) e altura média das plantas de 2,5 m.

A comparação das soluções 3 e 4 foi realizada mediante análise de variância fatorial, 2×3 (2 soluções x 3 frequências), para as variáveis eficácia de seletividade e eficácia de desprendimento, com teste de Tukey a 5% de probabilidade, para comparação de médias. A variável “eficácia de desprendimento” substitui a variável “volume total de frutos desprendidos”, dada sua maior contribuição para a quantificação da seletividade. Os resultados são apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Para a eficácia de seletividade, observa-se efeitos altamente significativos entre as frequências e significativo entre suas interações. Os resultados para o desdobramento em cada uma das frequências, evidencia o melhor eficácia para a solução 4, na frequências de 45 Hz, chegando a 90%.

Para a eficácia de desprendimento, observa-se efeitos não significativos entre as frequências e as interações das soluções e as frequências. O efeito foi altamente significativo, evidenciando-se o melhor resultado para a solução 4, com média de 35% frente a 23% da solução 3.

Os resultados obtidos para as variáveis eficácia de seletividade e eficácia de desprendimento, na comparação das soluções 3 e 4, mostram o melhor desempenho da solução 4, considerada para a continuidade dos ensaios.

Tabela 13 - Eficácia de seletividade das soluções 3 e 4, com frequências de 30; 40 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).

Solução	Eficácia de seletividade (%)			
	Frequência (Hz)			
	30	40	45	
3	Média	53 Bb	70 Ba	82 Aa
	Δ	7,9	6,6	8,7
	Mínimo	47	64	76
	Máximo	62	77	92
4	Média	82 Aa	84 Aa	90 Aa
	Δ	1,0	2,5	3,1
	Mínimo	81	82	87
	Máximo	83	87	93

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
SOL	1	1334,722222	1334,722222	40,310	0,0000 **
FRE	2	1045,777778	522,888889	15,792	0,0004 **
SOL*FRE	2	339,111111	169,555556	5,121	0,0247 *
erro	12	397,333333	33,111111		
Total corrigido	17	3116,944444			

CV % = 7,48; média geral = 77%.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 14 - Eficácia de desprendimento das soluções 3 e 4, com frequências de 30; 40 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).

Solução	Eficácia de desprendimento (%)			
	Frequência (Hz)			
	30	40	45	
3	Média	23 Aa	24 Ba	23 Ba
	Δ	6,7	7,0	4,0
	Mínimo	15	17	19
	Máximo	27	31	27
4	Média	27 Aa	39 Aa	39 Aa
	Δ	4,5	3,6	15,6
	Mínimo	22	36	22
	Máximo	31	43	53

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
SOL	1	624,222222	624,222222	9,661	0,0091 **
FRE	2	161,777778	80,888889	1,252	0,3208 n.s.
SOL*FRE	2	136,444444	68,222222	1,056	0,3781 n.s.
erro	12	775,333333	64,611111		
Total corrigido	17	1697,777778			

CV = 27,82%; média geral = 29%.

Fonte: Do autor (2021).

➤ Comparação Final

A comparação das soluções 1 e 4, selecionadas como as melhores dentre as duplas “1 – 2” e “3 e 4”, foi realizada mediante análise de variância fatorial, 2 x 3 (2 soluções x 3 frequências), para as variáveis eficácia de seletividade e eficácia de desprendimento, com teste de Tukey a 5% de probabilidade, para comparação de médias. Os resultados são apresentados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Eficácia de seletividade das soluções 1 e 4, com frequências de 30; 35 e 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).

Solução		Eficácia de seletividade (%)			
		Frequência (Hz)			
		30	35	40	
1	Média	68Bb	85Aa	92Aa	
	Δ	17,00	4,72	1,15	
	Mínimo	49	81	91	
	Máximo	81	90	93	
4	Média	86Aa	89Aa	92Aa	
	Δ	1,15	1,00	1,15	
	Mínimo	85	88	91	
	Máximo	87	90	93	
FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
SOL	1	264,500000	264,500000	5,012	0,0449 *
FRE	2	664,111111	332,055556	6,292	0,0135 *
SOL*FRE	2	250,333333	125,166667	2,372	0,1355 n.s.
error	12	633,333333	52,777778		
Total corrigido	17	1812,277778			

CV = 8,51% ; media geral = 85%.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 16 - Eficácia de desprendimento das soluções 1 e 4, com frequências de 30; 35 e 40 Hz. (SISVAR v. 5.6).

Solução	Eficácia de desprendimento (%)			
		Frequência (Hz)		
		30	35	40
1	Média	43Aa	36Ba	42Aa
	δ	8,00	2,52	5,03
	Mínimo	35	34	37
	Máximo	51	39	47
4	Média	46Aa	51Aa	43Aa
	δ	7,00	7,02	4,04
	Mínimo	38	44	39
	Máximo	51	58	47

FV	GL	SQ	QM	Fc	p-valor
SOL	1	193,388889	193,388889	5,517	0,0368 *
FRE	2	12,444444	6,222222	0,177	0,8395 n.s.
SOL*FRE	2	161,777778	80,888889	2,307	0,1419 n.s.
error	12	420,666667	35,055556		
Total corrigido	17	788,277778			

CV=13,58%; média geral = 44%.

Fonte: Do autor (2021).

Para a eficácia de seletividade, observa-se efeitos não significativos entre as soluções e as frequências maiores 35 e 40 Hz, alcançando eficácias de 92%. Em média a eficácia da solução 4 foi de 89%, superior à média de 82% da solução 1.

Para eficácia de desprendimento, também não se observa diferenças significativas entre soluções e frequências. Em média a eficácia de desprendimento foi de 47% pra a solução 4, foi superior à média de 40% da solução 1.

Em razão da superioridade no desempenho da solução 4, tanto na eficácia de seletividade quanto na eficácia de desprendimento, foi escolhida como a melhor das soluções resultantes do projeto conceitual, a ser levada para a etapa de otimização.

4.4 Otimização da melhor solução

Os experimentos foram realizados, na fazenda Colina, Luminárias, MG, Brasil, em lavoura de café arábica de 17 anos, variedade Catucaí Amarelo, esqueletada quatro anos antes do experimento, com espaçamentos de 2,8 m entre linhas e 0,8 m entre plantas (4.464 planta ha⁻¹) e altura média das plantas de 2,5 m.

Para a otimização da solução 4, definida como a melhor das quatro soluções resultantes do projeto conceitual, foram realizadas análises de variância com testes de regressão a 5% de probabilidade, para as variáveis resposta: eficácia de seletividade, eficácia de desprendimento, capacidade de produção efetiva e danos, sendo utilizada toda a faixa de frequências da pesquisa (de 27 a 45 Hz) como fator de variação. Os resultados são apresentados nas Tabelas 17, 18, 19 e 20.

Tabela 17 - Eficácia de seletividade da solução 4, com frequências de 27; 30; 35; 40; 42 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).

	Eficácia de Seletividade (%)					
	Frequência (Hz)					
	27	30	35	40	42	45
Média	89	88	75	89	84	83
δ	1,98	13,09	1,8	9,17	4,54	6,08
Mínimo	87	74	73	80	80	79
Máximo	91	100	76	98	89	90

FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor
FRE	5	462,666667	92,533333	1,737	0,2008ns
error	12	639,333333	53,277778		
Total corregido	17	1102,000000			

CV=8,62%; média geral = 85%.

Fonte: Do autor (2021).

Para a eficácia de seletividade não se observa efeito significativo da frequência. A média geral de 85% para a seletividade é interessante, quando comparada com os resultados do trabalho Mejía, Tascón e Uribe (2013) na faixa das baixas frequências, com um protótipo a 20 Hz, alcançaram uma eficácia de seletividade de 78,5%. Alguns outros trabalhos sugerem frequências na faixa dos 140 Hz, para obter uma boa eficácia de seletividade (ESPINOSA; RODRÍGUEZ e WAR, 2007). Nesse patamar de frequência, tanto os requisitos de energia como os elevados requisitos mecânicos podem ser refletidos nos custos construtivos e operacionais do equipamento.

Tabela 18 - Eficácia de desprendimento da solução 4, com frequências de 27; 30; 35; 40; 42 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).

	Eficácia de Desprendimento (%)					
	Frequência (Hz)					
	27	30	35	40	42	45
Média	9	20	35	42	52	39
δ	1,89	8,11	6,23	9,57	5,84	4,95
Mínimo	7	15	31	33	47	33
Máximo	11	29	43	52	58	43

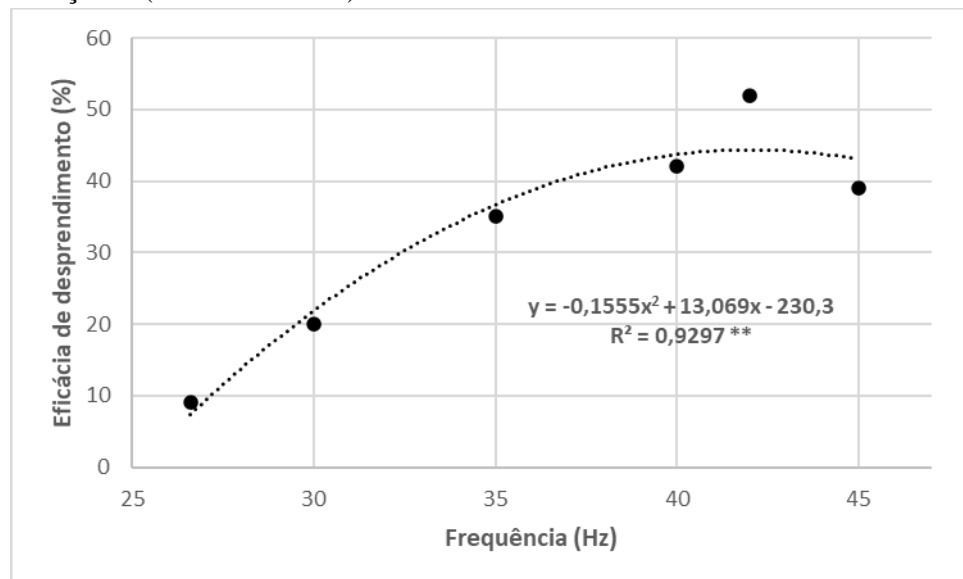
FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor
FRE	5	3621,111111	724,222222	16,842	0,0000 **
error	12	516,000000	43,000000		
Total corrigido	17	4137,111111			

CV=20,01%; média geral = 33%.

Fonte: Do autor (2021).

As maiores eficácias de desprendimento, como já esperado, ocorreram nas maiores frequências, observando-se efeito altamente significativo. A Figura 13 ilustra os resultados da análise de regressão, onde o modelo apresenta um excelente ajuste, com coeficiente de determinação aproximado de 93%.

Figura 13 - Comportamento observado e estimado de eficácia de desprendimento, para a solução 4 (SISVAR v. 5.6)



Fonte: Do autor (2021).

Para a mesma variável resposta, na faixa de frequências entre 16,6 e 33,0 Hz, Coelho et al. (2015) encontraram um melhor ajuste, usando modelos lineares diretamente proporcionais. O valor máximo verificado de 52% a 42 Hz, supera o determinado experimentalmente em

outros trabalhos com faixas de frequências semelhantes, como o de Coelho et al. (2015), com 27% a 33 Hz e Guedes (2011), com 30% a 45 Hz.

Em suma o melhor resultado para a eficiência de seletividade ocorreu na frequência de 40Hz e para a eficácia a de desprendimento de 42Hz.

Para a capacidade de produção efetiva, observa-se efeito altamente significativo da frequência, também com resultado já esperado de maior capacidade nas maiores frequências. A Figura 14, ilustra o comportamento da análise de regressão, onde o modelo apresenta bom ajuste, com coeficiente de determinação de 88%. O modelo estima uma capacidade de produção efetiva, máxima de 30 Lh⁻¹ a 45 Hz. Álvarez, Tascón e Ramírez (2004), em experimento com desprendimento seletivo manual, conseguiram 49 Lh⁻¹; Cárdenas et al. (2013) conseguiram uma média de 23,0 Lh⁻¹, com média de carga pendente de frutos maduros de 63,3%, similar à carga pendente de frutos maduros dos ensaios da solução 4, com média de 58%.

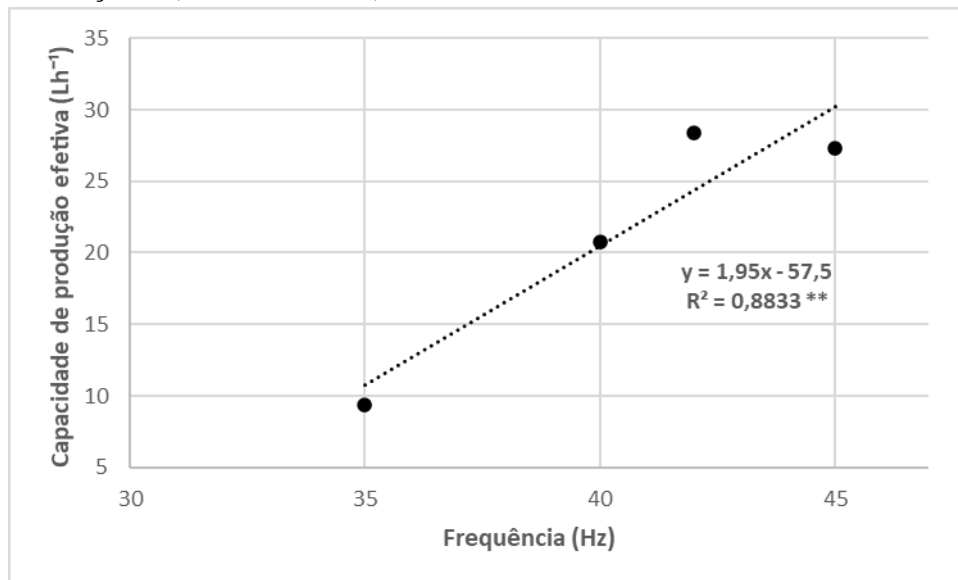
Tabela 19 - Capacidade de produção efetiva da solução 4, com frequências de 27; 30; 35; 40; 42 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).

Capacidade de Produção Efetiva (Lh⁻¹)					
		Frequência (Hz)			
		35	40	42	45
Média		9,4	20,8	28,4	27,3
Δ		1,89	2,46	6,51	3,01
Mínimo		7,6	18	23,3	24
Máximo		11,4	22,3	35,7	29,9
CV (%)		18,17			
FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor
FRE	3	682,736825	227,578942	14,914	0,0012 **
error	8	122,071267	15,258908		
Total corregido	11	804,808092			

CV=18,17%; média geral = 21,5 Lh⁻¹.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 14 - Comportamento observado e estimado da capacidade de produção efetiva, para a solução 4 (SISVAR v. 5.6).



Fonte: Do autor (2021).

Quanto aos danos causados nas plantas, os efeitos também foram significativo para a frequência. Com maiores frequências maiores foram os danos em gramas de folhas e ramos destacados. A Figura 15, ilustra o resultado da análise de regressão dos resultados experimentais, sendo que os danos são diretamente proporcionais à frequência, chegando a 124g a 45Hz. Autores, como Aristizábal, Tascón e Gómez (2003), encontraram danos aproximados às 74 g, os quais consideraram como muito baixos.

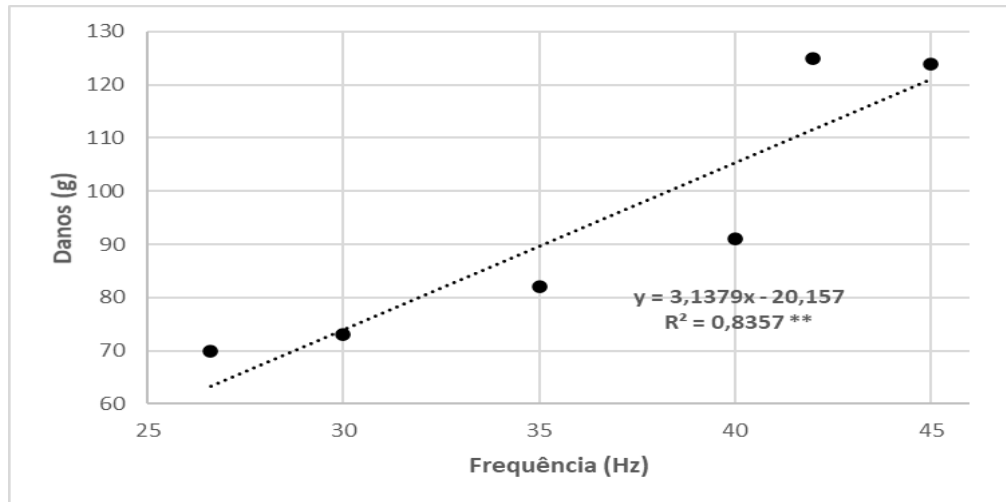
Tabela 20 - Danos causados pela solução 4, com frequências de 27; 30; 35; 40; 42 e 45 Hz. (SISVAR v. 5.6).

Danos (g)						
	Frequência (Hz)					
	27	30	35	40	42	45
Média	70	73	82	91	125	124
δ	22,23	32,79	8,08	10,02	4,16	20,55
Mínimo	57	43	75	80	122	104
Máximo	96	108	91	99	130	145
CV (%)	20,18					
FV	GL	SC	CM	Fc	p-valor	
FREC	5	9016,666667	1803,333333	4,975	0,0107 *	
error	12	4349,333333	362,444444			
Total corregido	17	13366,000000				

CV=20,18%; media geral = 94 g.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 15 - Comportamento observado e estimado da variável resposta danos, para a solução 4 (SISVAR v. 5.6).



Fonte: Do autor (2021).

5 CONCLUSÃO

- A metodologia de projeto conceitual mostrou-se uma ferramenta útil ao desenvolvimento objetivo e estruturado das soluções propostas;
- A solução 4, selecionada como a melhor das quatro soluções desenvolvidas no projeto conceitual, apresentou os maiores valores para a eficácia de seletividade, com média de 85% e chegando aos melhores resultados de 89% a 92% a 40Hz;
- A solução 4 apresentou eficácia de desprendimento média de 33%, chegando a 52% do volume total de frutos maduros nas plantas, na frequência de 42Hz;
- A maior capacidade produtiva foi de 28,4 Litros por hora, também para a frequência de 42Hz;
- Quanto aos danos causados nas plantas, o comportamento mostrou-se linear a frequência, com valores entre 91 a 125 gramas de folhas e ramos destacados por planta, para as frequências de 40 a 42Hz;
- A simplicidade do mecanismo correspondente a solução 4, permite facilmente a alteração das frequências e amplitudes, com a variação da rotação operacional e número de massas desbalanceadas, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- AGROSERVICES. Produtores de cafés especiais apostam na colheita seletiva. **Publicação virtual da rede agroservices**, 28 Ago. 2015. Disponível em: <www.redeagroservices.com.br/Noticias/2015/07/Produtores-de-cafes-especiais-apostam-na-colheita-seletiva.aspx>. Acesso em: 14 Set. 2016.
- ÁLVAREZ, J. A. V.; TASCÓN, C. E. O.; RAMÍREZ, C. A. R. Evaluación de dos sistemas para el manejo de mallas en la cosecha manual del café, **Cenicafé**, Chinchina, v.55, n.2, p.130-135, 2004. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/e7ca/1d3df17cfa8cb5a67c52e4249fd2bd07e1b8.pdf>>. Acesso em: 19 Dez. 2019
- ARISTIZÁBAL, I. D. T.; TASCÓN, C. E. O.; ÁLVAREZ, F. M. Evaluación del principio de vibración lateral en múltiples puntos del follaje para la cosecha mecanizada de café, **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, Medellín, v. 56, n. 1, p. 1849-1864, 2003. Disponível em: <<http://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/viewFile/24542/25147>>. Acesso em: 17 Ago 2017.
- BARBOSA, J. A.; SALVADOR, N.; SILVA, F. M. da. Desempenho operacional de derriçadores mecânicos portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 129-132, Mar. 2005. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662005000100020&lng=en&nrm=iso>. access on 04 July 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000100020>.
- BARBOSA, J. N. et al. Spatial distribution of coffees from Minas Gerais state and their relation with quality, **Coffee Science**, Lavras, v.5, n.3, p.237-250, set/dez 2010. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/340/pdf>. Acesso em: 10 nov 2020.
- BERNARDES, T. et al. Diagnóstico físico-ambiental da cafeicultura no estado de Minas Gerais - Brasil, **Coffee Science**, Lavras, v.7, n.2, p.139-151, maio/ago 2012. Disponível em: <http://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/download/241/pdf#:~:text=declividades entre 20 e 30,%25 é próximo de 85%25>. Acesso em: 10 nov 2020.
- CÁRDENAS, E. L. M. et al.. Development of a new striker for a portable coffee harvesting tool, *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, Medellín, v.66, n.2, p.7.071-7.083, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472013000200008>. Acesso em: 19 Dez. 2019
- CÁRDENAS, E. L. M.; TASCÓN, C. E. O.; MEJÍA, F. A. A Portable Device to Assist in the Harvest of Coffee in Colombia. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, v. 68, n. 1, p. 7471-7479, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47833>>. Acesso em: 15 Nov. 2016.

CARVALHO, Luciano Torres et al.. DESENVOLVIMENTO DE UMA DERRIÇADORA PORTÁTIL PARA COLHEITA DE CAFÉ. **Anais 1º Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, Poços de Caldas, 2000. p. 1.109-1.113. Disponível em:

<http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio1/Pos2.pdf>. Acesso em: 17 Out. 2017.

CHALFOUN, Sára Maria. Glossário de termos utilizados na cafeicultura, **EPAMIG-CTSM**, Lavras, 2008.

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, MI, USA, v.17, n.4, p.475-479, 2001.

COELHO, A. L. de F. et al., Detachment efficiency of fruits from coffee plants subjected to mechanical vibrations, **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 406-412, Out./Dez. 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pat/v45n4/1517-6398-pat-45-04-0406.pdf>>. Acesso em: 20 Fev. 2017.

COELHO, A. L. de F. et al., Dynamic test for determining the elastic modulus of coffee fruit-stem-branch system, **Acta Scientiarum - Technology**, Maringá, v. 39 suplemento, p. 579-586, 2017. Disponível em:

<<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/30101/pdf>>. Acesso em: 19 Dez. 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB -. Indicadores da Agropecuária, Observatório Agrícola / **Companhia Nacional de Abastecimento**. ano XXV, No. 9, setembro 2016. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_09_29_09_55_56_revista_indicadores_da_agropecuaria_-_setembro_2016_-_versao_final_internet.pdf . Acesso em: 14 Out. 2016

CONAB, Acompanhamento da safra brasileira café, Brasília, v.6, n.3, 47 pp., terceiro levantamento, setembro, 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>. Acesso em: 11 Out. 2020

ESPINOSA, B. G.; RODRIGUEZ, A. M.; GUERRA, O. L. Búsqueda de modos de vibración apropiados para la cosecha selectiva del café, **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2007. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93216102>>. Acesso em: 17 Ago 2017.

FEDERAÇÃO NACIONAL DOS CAFEEIROS DA COLÔMBIA - FNC. Reto Coffee PickInn, 2017. Disponível em:

<https://openstartups.induct.no/public/pages/CoffeePickInnES#challenge> . Acesso em: 08 Out. 2020.

FERREIRA, D. F. SISVAR. Versão 5.6. Lavras: **UFLA/DEX**, 2015. Disponível em: <<http://www.dex.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>>. Acesso em: 11 jul 2017.

GIRALDO, P. J. R. et al.. Aplicación de una metodología estructurada para el diseño de un sistema de cosecha selectiva de café, **Scientia et technica**, Pereira, v.20, n.1, p.10-19, Mar. 2015. Disponível em: <DOI:10.22517/23447214.9009>. Acesso em: Jan. 22 de 2020.

GUEDES, D. M. Influência do impacto das hastes rígidas no processo de colheita do café por vibrações. **Dissertação Mestrado**. Orientador: Daniel Marçal de Queiroz, Universidade Federal de Viçosa, 2011.

IBGE, 2019 Disponível em:

ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2019/pib-vol-val_201902caderno.pdf

INACIO, Alexandre. Mudanças na colheita podem elevar a rentabilidade no café. Disponível em: <http://agribizz.blogspot.com.br/2010/04/custo-da-producao-de-cafe.html>. Acesso em: 14 Set. 2016

MEJÍA, F. A.; TASCÓN, C. E. O.; URIBE, J. R. S. Evaluation of Mechanical Beaters in Coffee Harvesting, **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, Medellín, v. 66, n. 1, p. 6919-6928, Jan. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472013000100009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 Out. 2016.

MIALHE, L. G. Manual de mecanização agrícola, **Ed. Agronômica Ceres**, São Paulo, p. 122, 1974.

REZENDE, Fabiano Alvarenga. Determinação das Áreas Cafeeiras Mecanizáveis no Sul de Mina Gerais com Cenários para a Colheita. **Dissertação Mestrado**. Orientador: Fábio Moreira da Silva, Universidade Federal de Lavras, 2008.

ROCHA, A. C. da et al.. Colheita seletiva de café arábica em região de altitude do estado do espírito santo. **Memorias 34° Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras**. 2005. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58677/1/Colheita-seletiva.pdf>. Acesso em: 14 Set. 2016

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**, v. 14, n. 4, p. 425-431, 2010a. Disponível em: DOI <10.1590/S1415-43662010000400012>. Acesso em: 25 Jul. 2017.

SANTOS, F. L. et al.. Analysis of the coffee harvesting process using an electromagnetic shaker, **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 32, n. 3, p. 373-378, 2010b. Disponível em: <DOI 10.4025/actasciagron.v32i3.6782>. Acesso em: 25 Jul. 2017.

SANTOS, F. L. et al.. Simulation of the dynamic behavior of the coffee fruit-stem system using finite element method, **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 1, p. 11-17, Jan./Mar. 2015. Disponível em: <<http://go-galegroup.ez26.periodicos.capes.gov.br/ps/i.do?p=AONE&sw=w&u=capes&v=2.1&it=r&id=GALE%7CA442117491&asid=325aadb093d33c4b2171a056f20eee42>>. Acesso em: 26 Oct. 2016.

SILVA, F. C. da et al.. Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 468-474, Mar. – Abr. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542010000200028> . Acesso em: 17 Ago. 2017.

SILVA, F. M. da et al.. Desempenho operacional da colheita mecanizada e seletiva do café em função da força de desprendimento dos frutos. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 53-60, Jan. -Mar. 2013a. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/345/pdf> . Acesso em: 14 Set. 2016.

SILVA, F. M. da et al.. Viabilidade técnica e econômica da colheita mecanizada do café, **Visão Agrícola**, n.12, Jan - Jul, 2013b, p. 98 - 101. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va12-colheita-e-preparo01.pdf> . Acesso em: 15 Set. 2016

TINOCO, H. A. et al.. Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica* L. var. Colombia estimating its geometrical and mechanical properties, **Computers and Electronics in Agriculture**, v.118, p.17-27, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.06.011>>. Acesso em: 26 Out. 2017.

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: 15 Out. 2020.

VILLIBOR, G. P. et al.. Determination of modal properties of the coffee fruit-stem system using high speed digital video and digital image processing, **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 38, n. 1, p. 41-48, Jan./Mar. 2016. Disponível em: <[10.4025/actascitech.v38i1.27344](http://dx.doi.org/10.4025/actascitech.v38i1.27344)>. Acesso em: 24 Nov. 2016.