



EVERSON PEREIRA DE ANDRADE

**ESTUDO DA ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA
DA MANGA TOMMY ATKINS NA FAIXA DE
MICRO-ONDAS**

**João Pessoa - PB
Março de 2018**



Everson Pereira de Andrade

ESTUDO DA ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA DA MANGA TOMMY ATKINS NA FAIXA DE MICRO-ONDAS

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.
Orientador

João Pessoa – PB, março de 2018
©Everson Pereira de Andrade – eversonandrade76@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

A553e Andrade, Everson Pereira de.
Estudo da espectroscopia dielétrica da manga tommy atkins
na faixa de micro-ondas / Everson Pereira de Andrade. – 2018.
56 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto
Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, 2018.

Orientador: Prof^o Joabson Nogueira de Carvalho

1. Eletromagnetismo. 2. Constante dielétrica. 3. Material
dielétrico. 4. Tangente de perdas. 5. Manga Tommy Atkins. 6.
Maturação. I. Título.

CDU 537.8

Ivanise Andrade M. de Almeida
Bibliotecária-Documentalista
CRB-15/0096


ESTUDO DA ESPECTROSCOPIA DIELÉTRICA DA MANGA TOMMY ATKINS NA FAIXA DE MICRO-ONDAS

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

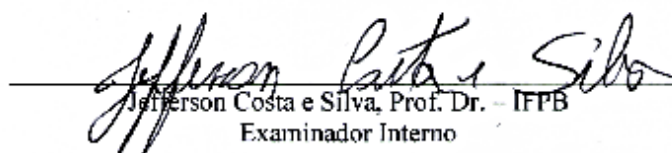
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 23/03/2018

BANCA EXAMINADORA


Joabson Nogueira de Carvalho, Prof. Dr. – IFPB
Orientador


Alexandre Fonseca D'Andrea, Prof. Dr. – IFPB
Examinador Externo


Joelson Zogueira de Carvalho, Prof. Dr. – UFPB
Examinador Externo


Jefferson Costa e Silva, Prof. Dr. – IFPB
Examinador Interno

João Pessoa – PB
Março de 2018

DEDICATÓRIA

A Deus.

Aos meus pais, Maria de Lourdes Pereira de Andrade e Geraldo José de Andrade. À minha esposa, Maria da Luz dos Santos Andrade e meus Filhos, Maria Clara dos Santos Andrade e Miguel Arthur dos Santos Andrade.

AGRADECIMENTOS

Tenho tanto a agradecer e a tantas pessoas que com certeza faltaria espaço, mas quero aqui expressar o meu mais profundo agradecimento a todos que tornaram possível este trabalho.

Agradeço a Deus, que esteve, está e sempre estará ao meu lado nos momentos bons e ruins, me iluminando e mandando anjos para me ajudar nos momentos difíceis.

Aos meus pais que me deram a vida e sempre confiaram na minha capacidade e me instruíram no caminho correto.

A minha esposa Maria da Luz dos Santos Andrade e aos meus filhos Maria Clara dos Santos Andrade e Miguel Arthur dos Santos Andrade por compreenderem minha ausência durante a realização deste trabalho.

As minhas irmãs Elisângela Pereira de Andrade e Edjane Pereira de Andrade pelo incentivo e apoio.

Ao meu professor orientador Joabson Nogueira de Carvalho pela confiança e principalmente pela paciência em mim dedicada, com toda solidariedade e humildade me explicou e orientou, incentivando-me a prosseguir com este trabalho.

Agradeço aos professores do IFPB, por sempre nos orientar e fornecer ambientes favoráveis a pesquisa.

Aos meus colegas de Mestrado, em especial a Paulo Fernandes, Maciel Oliveira, Giulliane, Lais, e muitos outros que durante esse período de aprendizagem nos apoiamos uns nos outros, direta ou indiretamente, e todos aqueles que fizeram parte deste processo de aprendizagem.

EPÍGRAFE

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

A assinatura dielétrica da manga Tommy Atkins pelo método da sonda coaxial, com comparação da constante dielétrica e a tangente de perda em diversos estádios de maturação de frutos de um mesmo lote, produzidos na região de Petrolina-PE é apresentada neste trabalho. É verificada a variação dos parâmetros dielétricos da fruta em diversas frequências, durante o processo de maturação, considerando as transformações fisiológicas para a taxa de respiração, formação de etileno, do amido, dos açúcares e ácidos solúveis tituláveis. Os resultados mostram uma grande correlação entre os parâmetros dielétricos e o estágio de maturação da manga, quando se verifica a variação diária da constante dielétrica e fator de perdas. A assinatura dielétrica obtida permite identificar o pico de maturação, que, para o manejo da amostra utilizada, ocorre aproximadamente no sexto dia após a colheita. Os resultados também sugerem que os parâmetros dielétricos podem ser importantes indicadores na análise da manga Tommy Atkins, principalmente pela possibilidade de efetuar medidas externas, não destrutivas, o que pode se tornar uma ferramenta imprescindível para os produtores.

Palavras-chave: Assinatura dielétrica, manga Tommy Atkins, caracterização dielétrica, maturação.

ABSTRACT

Dielectric signature of the Tommy Atkins mango by the coaxial probe method, with the comparison of dielectric constant and a loss tangent in several maturation stages of fruits of the same lot, produced in the Petrolina-PE region is presented in this work. In this work is checking a variation of the daily parameters of the fruit at different frequencies, during the maturation process, considering as physiological transformations for respiration rate, ethylene formation, starch, soluble sugars and acids. The results show a high correlation between the dielectric parameters and the maturation stage of the sleeve when a daily variation of dielectric constant and loss factor is observed. Signature obtained allows to identify the peak of maturation, which, for the management of the sample used, there is no episode after a harvest. The results are also suggested for the parameters allowed, and may be important for the analysis of the Tommy Atkins mango, mainly in the possibility of carrying out external, non-destructive measures, which can be an indispensable tool for producers.

Key-words: Dielectric signature, Tommy Atkins mango, dielectric characterization, maturation.

Sumário

| | |
|--|----|
| DEDICATÓRIA | 3 |
| AGRADECIMENTOS | 6 |
| EPÍGRAFE | 7 |
| RESUMO | 8 |
| ABSTRACT | 9 |
| 1. Formulação do Problema | 14 |
| 1.2. Objetivo Geral | 18 |
| 1.2.1. Objetivos Específicos | 18 |
| 2. Fundamentação Teórica | 20 |
| 2.1. Materiais Dielétricos | 20 |
| 2.2. Fatores que influenciam as propriedades dielétricas dos materiais | 23 |
| 2.3. Aspectos Gerais da Manga Tommy Atkins | 27 |
| 2.3.1. Trocas Gasosas | 28 |
| 2.3.2. Fases de amadurecimento | 29 |
| 3. Materiais e Métodos | 33 |
| 4. Resultados | 37 |
| 4.1. Indicadores visuais da maturação | 37 |
| 4.2. Espectroscopia dielétrica da manga Tommy Atkins | 40 |
| 4.2.1. Resultados para a constante dielétrica | 40 |
| 4.2.2. Desvio padrão para a constante dielétrica | 44 |
| 4.2.3. Resultados para a tangente de perdas | 46 |
| 4.2.4. Desvio padrão para a tangente de perdas | 50 |
| 5. Considerações Finais | 52 |
| Referências | 53 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1.1 – Permissividade complexa para alguns produtos agrícolas cultivados nos Estados Unidos, Rússia e outros países..... | 17 |
| Tabela 2.1 – Constante dielétrica relativa ϵ_r' e fator de perda dielétrica ϵ_r'' para a água a temperatura indicada. | 265 |
| Tabela 2.2 – Parâmetros de relaxação de Debye para a água com ϵ_s = constante dielétrica estática, ϵ_∞ = constante dielétrica em alta frequência e τ = tempo de relaxação..... | 265 |
| Tabela 2.3 – Taxa e Padrão de respiração de algumas frutas e hortaliças a 20°C..... | 30 |
| Tabela 3.1 – Taxa e Padrão de respiração de algumas frutas e hortaliças a 20°C..... | 33 |
| Tabela 4.1 – Estádios de maturação da manga Tommy Atkins de acordo com a coloração da casca, proposto por GTZ..... | 38 |
| Tabela 4.2 – Desvio padrão da constante dielétrica da manga Tommy Atkins nas frequências de 1 - 10 GHz. | 45 |
| Tabela 4.3 – Desvio padrão para a tangente de perdas da manga Tommy Atkins nas frequências de 1 - 10 GHz. | 50 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Exemplos de mangas Tommy Atkins utilizados na pesquisa. | 18 |
| Figura 2.1 – Estádios de desenvolvimento do fruto. | 32 |
| Figura 3.1 – Setup de medição de características dielétricas por sonda coaxial. | 34 |
| Figura 3.2 – Manga Tommy Atkins: a) partes da manga; b) Indicação dos locais de medição. | 35 |
| Figura 4.1 – Maturação da Tommy Atkins de acordo com a colação da casca em nove dias. | 39 |
| Figura 4.2 – Variação da massa das frutas analisadas. | 40 |
| Figura 4.3 – Constante dielétrica em função da frequência para cada dia de medição. . | 41 |
| Figura 4.4 – Constante dielétrica da manga Tommy Atkins em seus diferentes estádios de maturação nas frequências de 1 - 10 GHz. | 42 |
| Figura 4.5 – Constante dielétrica da manga Tommy Atkins em função do dia após colheita. (a) $f = 100$ MHz, (b) $f = 1$ GHz, (c) $f = 2$ GHz, (d) $f = 3$ GHz, (e) $f = 4$ GHz, (f) $f = 5$ GHz, (g) $f = 6$ GHz, (h) $f = 7$ GHz, (i) $f = 8$ GHz, (j) $f = 9$ GHz, (k) $f = 10$ GHz | 44 |
| Figura 4.6 – Tangente de perdas da manga Tommy Atkins em função da frequência para cada dia de medição. | 46 |
| Figura 4.7 – Tangente de perdas da manga Tommy Atkins em seus diferentes estádios de maturação nas frequências de 1 - 10 GHz. | 47 |
| Figura 4.8 – Tangente de perdas da manga Tommy Atkins em função do dia após colheita. (a) $f = 100$ MHz, (b) $f = 1$ GHz, (c) $f = 2$ GHz, (d) $f = 3$ GHz, (e) $f = 4$ GHz, (f) $f = 5$ GHz, (g) $f = 6$ GHz, (h) $f = 7$ GHz, (i) $f = 8$ GHz, (j) $f = 9$ GHz, (k) $f = 10$ GHz..... | 49 |

Siglas e Símbolos

| | |
|-------------------|---|
| ATT | – Ácido Total Titulável |
| FAO | – Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação |
| IBGE | – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| OCDE | – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico da Europa |
| pH | – Potencial Hidrogeniônico |
| RF | – Rádio Frequência |
| SST | – Sólidos Solúveis Totais |
| C | – Velocidade da Luz |
| J | – Parte Imaginária de um Número Complexo, $j = \sqrt{-1}$ |
| E | – Permissividade Elétrica |
| ϵ' | – Constante Dielétrica |
| ϵ'' | – Fator de Perda |
| ϵ_s | – Constante Dielétrica Estática |
| ϵ_0 | – Permissividade no Espaço Livre |
| ϵ_∞ | – Constante Dielétrica em Altas Frequências |
| M | – Permeabilidade Magnética |
| μ_0 | – Permeabilidade no Espaço Livre |
| V | – Velocidade da Luz no Vácuo |
| T | – Tempo de Relaxação |

1. Formulação do Problema

1.1. Introdução

O Brasil se configura entre os nove maiores produtores de manga do mundo, com uma área de 67 mil hectares. A (*Mangifera Indica L.*) cv. *Tommy Atkins* é a diversidade mais desenvolvida, e por consequência, a que está com a maior capacidade de comercialização no mundo, devido a suas propriedades fenológicas e organolépticas. Contudo, esta diversidade corre riscos biológicos e econômicos devido, à maior parte da produção se concentra em uma única espécie [1].

Originária do Sudeste asiático, a manga se espalhou por várias regiões do mundo. Diversas variedades são produzidas atualmente, sendo esta a fruta climatérica que mais contribui com as exportações brasileiras, por ser uma fruta de clima tropical, de boa aparência e aroma agradável, sua comercialização se dá de forma *in natura*, o que exalta sua importância na economia brasileira, gerando divisas para o Brasil [1].

A agricultura assume um papel importante na economia brasileira, abrangendo cerca de 4 % de seu Produto Interno Bruto (PIB). Segundo projeções da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico da Europa (OCDE) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), o Brasil assumirá a liderança das exportações mundiais do setor agrícola em 2024 [2]. O relatório da conjuntura agrícola brasileira do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de Novembro de 2016 indica que o Brasil possui uma área cultivada de mais de 57 milhões de hectares, com uma produção de quase 184 milhões de toneladas de produtos agrícolas [3], e segundo a OCDE/FAO poderá chegar a uma área superior a 69,4 milhões de hectares em 2024.

A produção agrícola no Brasil da manga Tommy Atkins foi superior a 900 milhões de toneladas no ano de 2015; com destaque para a região Nordeste que teve uma produção de mais de 654 milhões de toneladas em 2015, com maior ênfase para os estados da Bahia e Pernambuco e a região sudeste que obteve uma produção superior a 307 milhões de toneladas em 2015, com distinção para São Paulo [4]. Esses dados comprovam a relevância dos produtos na economia local e a necessidade de produção de conhecimento acerca dos mesmos, de forma a agregar valor à sua comercialização.

A agricultura tem ciclo complexo e de grande dimensão, envolvendo a produção, colheita, pós-processamento, transporte, comercialização e consumo. Algumas tecnologias são empregadas para agregar valor ou aumentar o tempo de prateleira dos produtos, dentre as quais se destacam a esterilização, pasteurização, secagem, congelamento, refrigeração, defumação, dentre outras. Em alguns desses processos, as eletro-tecnologias têm sido utilizadas e reconhecidas como de grande potencial de aplicação, devido principalmente aos aspectos de segurança, qualidade e eficiência, além de, em alguns casos, a possibilidade de efetuar medidas quantitativas de forma não invasiva.

Em meio às eletro-tecnologias relevantes para a indústria de processos alimentares, pode-se destacar o aquecimento por micro-ondas, radiofrequência, aquecimento ôhmico ou por resistência elétrica, indução com infravermelho, campos elétricos pulsados, campos eletromagnéticos em altas frequências, radiação ultravioleta, espectroscopia em diversas faixas de frequências, dentre outras.

Dentre os processos industriais realizados sobre alimentos que envolvem a aplicação de ondas eletromagnéticas e suas interações com os produtos, pode-se destacar [5] a secagem (redução do teor de água, para efeito de conservação, redução de volume ou massa do alimento), tratamento de sementes para controle de germinação, tratamento de frutas e hortaliças para reduzir a cinética do amadurecimento e aumentar o tempo de prateleira dos produtos, controle de pragas com a irradiação controlada de ondas eletromagnéticas, reduzindo a infestação dos produtos, cocção dos produtos (aquecimento dielétrico) em fornos domésticos ou industriais, medição da umidade por processos elétricos ou eletromagnéticos, sensoriamento remoto de produção agrícola, descongelamento de alimentos, espectroscopia eletromagnética, capaz de identificar determinadas características de produtos por meio não invasivo, ou seja, sem o uso de técnicas perfurantes ou destrutivas ao fruto, assim como detectar doenças que possam estar infestando os produtos. Na maior parte desses processos é necessário conhecer as características eletromagnéticas do material, seja a resistência, condutividade, permissividade e tangente de perdas.

O desenvolvimento de produtos agrícolas ocorre em ciclos, que geralmente incluem o crescimento e florescimento da planta, desenvolvimento do fruto, maturação fisiológica, amadurecimento, senescência (ou envelhecimento) e morte. Alguns

produtos possuem fases intermediárias a essas no seu desenvolvimento [6]. De toda forma, em cada fase do seu desenvolvimento, o produto passa por várias transformações físico-químicas e muitas vezes, alterações na sua fisiologia, que repercute nas propriedades dielétricas. Em vários produtos, a presença de eletrólitos na fase de maturação, altera bastante a condutividade elétrica do produto ou mesmo sua constante dielétrica ou tangente de perdas. O monitoramento das propriedades dielétricas permite identificar possíveis alterações fisiológicas no produto.

As propriedades dielétricas de produtos agrícolas tem sido alvo de diversas pesquisas ao longo dos últimos anos [7]. Em princípio, essas características eram estudadas em função da sua influência no aquecimento dielétrico. Dentre as primeiras aplicações, podemos citar o estudo da resistência elétrica para determinar o teor de umidade em grãos, feita inicialmente de forma invasiva, com uso de eletrodos. De acordo com Nelson [8], o teor de umidade foi determinado a partir da medição da permissividade do grão. Para isso, os grãos foram colocados entre as placas de um capacitor e a capacitância era medida na faixa de 1 a 50 MHz.

A determinação rápida e não destrutiva de umidade tem sido a aplicação mais frequente na utilização das propriedades dielétricas de produtos agrícolas relatada na literatura. Os primeiros resultados quantitativos referentes às propriedades dielétricas de produtos agrícolas foram relatados na Rússia para o trigo e outros grãos [9]. Nas décadas de 1980 e 1990, outras técnicas na faixa de Radiofrequência (RF) foram aplicadas com sucesso para determinação da umidade em outros produtos.

Dentre as propriedades dielétricas, dois parâmetros são importantes, a permissividade é a tangente de perdas. A permissividade elétrica que representa a capacidade do material de absorver e armazenar energia, em resposta a um campo elétrico aplicado, e a tangente de perda que indica a dissipação de energia em forma de calor. No domínio da frequência, a permissividade elétrica do material assume um valor complexo, dependendo do meio material a parte complexa pode ser nula.

A espectroscopia é o estudo do espectro eletromagnético. Originalmente esse termo foi utilizado na faixa da luz visível e depois estendido para as demais faixas do espectro. Basicamente a espectroscopia eletromagnética é o estudo das propriedades eletromagnéticas e sua dependência com a frequência ou comprimento de onda [10]. A literatura especializada apresenta a espectroscopia de diversas frutas e legumes, na faixa

de micro-ondas para determinação de doenças internas ou para determinação do grau de maturação dos produtos [10]. Os valores de referência para a permissividade elétrica complexa de diversos produtos agrícolas podem ser encontrados na literatura, com destaque para os produtos cultivados nos Estados Unidos, Rússia e outros países da Europa. A Tabela 1.1 mostra os valores da constante dielétrica (ϵ') e fator de perdas dielétrica (ϵ'') para diversos produtos agrícolas [10]. Pode ser comprovado que os valores da permissividade complexa variam com a frequência para cada produto. Outros resultados mostram a existência de variações com o grau de maturação e temperatura do produto [11].

Tabela 1.1 – Permissividade complexa para alguns produtos agrícolas cultivados nos Estados Unidos, Rússia e outros países.

| Produto | 10 MHz | | 100 MHz | | 1 GHz | |
|---------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | ϵ' | ϵ'' | ϵ' | ϵ'' | ϵ' | ϵ'' |
| Maçã | 109 | 281 | 71 | 33 | 64 | 10 |
| Abacate | 245 | 759 | 66 | 89 | 56 | 14 |
| Banana | 166 | 834 | 76 | 91 | 65 | 18 |
| Cenoura | 598 | 1291 | 87 | 157 | 72 | 23 |
| Pepino | 123 | 361 | 80 | 39 | 77 | 9 |
| Laranja | 197 | 617 | 78 | 69 | 73 | 13 |
| Batata | 183 | 679 | 73 | 77 | 62 | 16 |
| Uva | 122 | 570 | 78 | 60 | 73 | 13 |

Fonte: [12]

O objetivo do presente trabalho é investigar como os campos eletromagnéticos, na faixa de radiofrequência e em micro-ondas, interagem com a manga Tommy Atkins comercializada na região metropolitana de João Pessoa, avaliando a dependência em frequência, nos diferentes estádios de maturação, relacionado à massa e a coloração da casca da fruta no período de oito dias. Na Figura 1.1 pode ser observados mangas Tommy Atkins de um mesmo lote, em três estádio maturação, utilizados nesta pesquisa.

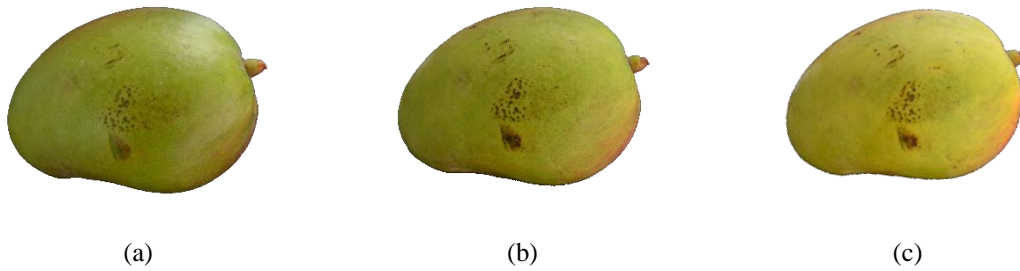


Figura 1.1 – Exemplos de mangas Tommy Atkins retirados do mesmo lote em três estágios de maturação utilizados na pesquisa.

A caracterização de produtos agrícolas é realizada a partir da espectroscopia dielétrica, que consiste na determinação da constante dielétrica e do fator de perdas de um determinado produto. No caso em estudo, de produtos agrícolas regionais, que não estão devidamente caracterizados na literatura especializada, justificando a presente pesquisa.

1.2. Objetivo Geral

A determinação da assinatura dielétrica da manga Tommy Atkins ao longo do período de maturação da fruta, produzida na região de Petrolina – PE e comercializada na região metropolitana de João Pessoa, pelo método da sonda coaxial é o objetivo geral deste trabalho.

1.2.1. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Revisar a bibliografia sobre características dielétricas de materiais, bem como sobre o desenvolvimento da manga Tommy Atkins;
- Medir e avaliar a constante dielétrica e a tangente de perda de amostras da manga Tommy Atkins pelo método da sonda coaxial, durante o período de maturação, na faixa de frequência de 100 MHz a 10 GHz;

- Realizar um estudo de variabilidade dos valores da permissividade e tangente de perda, utilizando diversas amostras da manga Tommy Atkins, e aplicar modelos estatísticos.
- Relacionar os resultados obtidos com as fases de maturação da manga Tommy Atkins;
- Identificar características dos produtos analisados, em busca de um padrão ou assinatura para a caracterização eletromagnética;

1.3. Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em mais quatro capítulos além desta introdução.

- No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica utilizada.
- No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos a serem utilizados no desenvolvimento do projeto.
- No capítulo 4 são mostrados os resultados finais.
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões sobre o estudo.

2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo são abordadas as bases teóricas das propriedades dielétricas dos materiais, com ênfase na constante dielétrica e tangente de perdas. Para o entendimento da variação desses parâmetros na manga Tommy Atkins, será descrito como é o desenvolvimento dessa fruta, desde seu plantio, destacando os aspectos fisiológicos da fruta na fase pós-colheita, onde ocorre o amadurecimento da manga nos sistemas produtivos em grande escala.

2.1. Materiais Dielétricos

Do ponto de vista eletromagnético, um material qualquer pode ser classificado segundo suas propriedades na presença de um campo elétrico ou magnético. Dessa forma, os materiais podem ser condutores, que são aqueles capazes de conduzir corrente elétrica, apresentando uma resistência finita, além de não influenciar nas linhas de campo magnético externo aplicado; isolantes elétricos, de condutividade elétrica praticamente nula; além dos materiais magnéticos, que são capazes de armazenar energia contida no campo magnético. De forma geral, todos os materiais apresentam uma ou outra dessas propriedades, podendo ser indicativos de um determinado estado desse material.

As propriedades dielétricas de alimentos e de outros materiais compõem uma importante área de conhecimento, tais propriedades são atributos essenciais para a compreensão da relação entre a energia eletromagnética e as estruturas dos materiais, e pelos parâmetros de comprimento de onda, frequência, temperatura entre outros. Esta forma de análise é chamada de espectroscopia dielétrica. Essa técnica se baseia na ação de um campo externo colocado com a medida da polaridade do sistema de cargas elétricas, conhecida como momento dipolar elétrico de uma porção do material, indicada muitas vezes em função da permissividade elétrica e do fator de perda dielétrica [12].

Essa técnica é aplicada na constatação de várias informações sobre alimentos que demonstram ser exigências dos consumidores, no que tange a suas características e

aspectos, diminuindo os desperdícios e aumentando as margens de negociação, além de determinar possíveis doenças no alimento de forma não invasiva [13], [14].

Materiais dielétricos são aqueles que apresentam baixa condutividade elétrica quando comparados com outros materiais, como os metais. Isto faz com que eles possam ser utilizados como isolantes. Muitos materiais como alimentos, organismos vivos e outros produtos agrícolas podem ser descritos pelas suas propriedades dielétricas, pois conduzem corrente elétrica em algum grau, influenciam a distribuição de campos eletromagnéticos e correntes na região delimitada pelos materiais [15]. Assim, as propriedades dielétricas determinam a transitoriedade com que o material vai aquecer na presença de um sinal de rádio frequência (RF) ou de micro-ondas. O controle sobre os campos elétricos possibilitam também um meio para identificar outras propriedades dielétricas, como constante dielétrica, tangente de perdas, permeabilidade magnética, entre outras, por meio de medições elétricas não invasivas. Os produtos agrícolas são materiais com características dielétricas. O estudo das propriedades dielétricas de produtos agrícolas pode ser utilizado na aplicação de sensoriamento de qualidade na indústria agrícola, como também em aplicações de aquecimento de dielétrico, como otimização na cadeia produtiva.

As características eletromagnéticas de um material determinam o comportamento das ondas eletromagnéticas que incidem no mesmo. Dessa forma, o conhecimento da constante dielétrica ou permissividade relativa (ϵ_r'), permeabilidade magnética relativa (μ_r'), condutividade (σ) e fator de perda dielétrica (ϵ_r''), são essenciais para determinar o coeficiente de reflexão (Γ), o coeficiente de transmissão (T) e a atenuação da onda eletromagnética que atravessa o material.

A permissividade elétrica representa a capacidade do material, no caso alimento, absorver e armazenar energia, em resposta a um campo elétrico aplicado. Esta propriedade tem influencia na reflexão das ondas (em fronteiras) e na atenuação das ondas no interior dos materiais. No domínio da frequência, a permissividade elétrica do material assume um valor complexo, sendo a mesma representada como na Eq. (2.1).

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'', \quad (2.1)$$

em que $j = \sqrt{-1}$. A permissividade complexa relativa no espaço livre dado pela Eq. (2.2).

$$\varepsilon_r^* = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (2.2)$$

Na qual (ε_0) é definido como sendo a permissividade elétrica no espaço livre ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m). A parte real de (2.2), conhecida como “constante dielétrica relativa”, representa a capacidade do material, no caso alimento, armazenar energia, em resposta a um campo elétrico aplicado, já a parte imaginária de (2.2), conhecido como “fator de perda dielétrica”, refere-se à energia dissipada em forma de calor.

A Equação (2.1) sugere que as quantidades ε' e ε'' estão defasadas entre si. O ângulo que representa esta defasagem, conhecido como “tangente de perdas” ($\tan\delta$), ou fator de dissipação, sendo este um importante estimador das características dielétricas do meio. A tangente de perdas representa a razão entre a energia perdida e a energia armazenada por ciclo do campo externo aplicado. Em termos numéricos, a tangente de perdas é representada pela Eq. (2.2).

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (2.3)$$

A propagação de uma onda eletromagnética é controlada pelas propriedades elétricas e magnéticas do meio de propagação, bem como pela frequência do campo magnético aplicado. Essas propriedades são afetadas pelos fatores: composição do material, temperatura e a frequência de oscilação do campo eletromagnético [16]. De maneira geral, durante as diversas fases de desenvolvimento dos produtos agrícolas, ocorrem várias transformações físico-químicas, produção de eletrólitos, sais (condutores) e outros elementos, influenciando diretamente nas suas propriedades dielétricas.

Também encontramos efeitos semelhantes relacionados aos campos magnéticos, mas não serão considerados neste trabalho devido a não variação deste parâmetro no material considerado.

2.2. Fatores que influenciam as propriedades dielétricas dos materiais

As propriedades dielétricas de muitos alimentos e outros materiais variam com a influência de vários outros fatores, em materiais higroscópicos como em produtos agrícolas, a água é um fator predominante. As propriedades dielétricas também dependem da frequência alternada aplicada no campo elétrico, da temperatura, da densidade e da fase de amadurecimento do produto [16]. Em geral, as propriedades eletromagnéticas dos materiais dependem da sua composição química, sua densidade, temperatura e outros parâmetros, de forma que, cada material possui diferentes valores de permissividade e perda dielétrica, que o caracteriza particularmente.

Com a exceção de alguns materiais que não absorvem energia na faixa de RF ou em micro-ondas, as propriedades dielétricas da grande maioria dos materiais se modificam com a frequência dos campos elétricos aplicados. Um ponto importante que colabora para a dependência da frequência e a polarização, oriunda da orientação de campo elétrico imposto às moléculas que possuem dipolos de momentos permanentes. Nos materiais polares, a permissividade elétrica pode ser expressa pela Eq. (2.4).

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau}, \quad (2.4)$$

em que $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular do campo e ε_{∞} representa a constante dielétrica em frequências altas, quando a disposição das moléculas não tem tempo para se alinhar com o campo externo e contribuir para a polarização total, ε_s representa a constante dielétrica estática, ou seja, o valor da frequência é zero, e τ representa o tempo de relaxação, que é o período associado com o tempo que os dipolos têm para retornar a orientação aleatória quando é retirado o campo elétrico [17]. Decompondo a Eq. (2.4) nas partes reais e imaginárias, obtemos as expressões para a constante dielétrica e fator de perdas, dados pelas Eq. (2.5) e (2.6), respectivamente.

$$\varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (2.5)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (2.6)$$

A água pura, no estado líquido, pode ser um exemplo de um dielétrico polar. Por meio do modelo da relaxação dielétrica de Pellat-Debye é possível calcular a permissividade relativa do dielétrico, podendo ser conceituada como o atraso da resposta de um sistema devido à variação das forças sob o qual está sujeito. A frequência de relaxamento é influenciada pelo aumento da temperatura [18].

Para as frequências radioelétricas, o material pode ser modelado eletronicamente como uma série de elemento de circuitos equivalente paralelo. Portanto é possível medir os parâmetros de circuitos adequadamente, como a impedância ou admitância. As propriedades dielétricas desse material, com uma frequência particular, consistem na determinação da forma em que a permissividade do material interage com os parâmetros do circuito.

Técnicas para medir as propriedades dielétricas, nas escalas de baixa frequência, frequência média e de alta frequência são abordadas em [19]. Essas medições inseriram várias pontes e circuitos ressonantes. A determinação das propriedades dielétricas das amostras de grão para áudio frequências de 250 Hz a 20 kHz foram determinadas a partir de medições da ponte de precisão usando amostras confinadas num suporte coaxial [20]. Em frequências muito baixas, no entanto, deve-se ter atenção também ao eletrodo de polarização, uma vez que ele pode invalidar os dados de medição, bem como para frequências abaixo da qual isto afeta as medições dependentes da natureza e da condutividade dos materiais a ser medido [21, 22].

Muitos dados referentes às propriedades dielétricas em grãos e sementes foram obtidos no intervalo de 1-50 MHz com base em uma série de circuitos ressonantes [23, 24, 25]. Novas Técnicas foram elaboradas para intervalos de maior frequência onde as amostras foram inseridas em linhas de transmissão coaxiais [26], [27].

Existem muitos métodos de caracterização das propriedades elétricas e magnéticas de determinados produtos, dentre eles podemos destacar o método da sonda coaxial, que é recomendado para amostras líquidas e semissólidas, sendo a preparação de suas amostras rápida e de fácil manuseio, exigindo uma calibração do analisador; o método da linha de transmissão, onde a amostra é introduzida em um guia de onda retangular ou em um guia coaxial e é utilizado para amostras sólidas que devem ser manipuladas de acordo com o guia a ser utilizado; o método do espaço livre dispõe de duas antenas do tipo corneta retangular e um analisador de rede vetorial. Neste caso a

amostra do material deve ser colocada entre as antenas para calcular o coeficiente de transmissão e assim determinar a permissividade elétrica do material, podendo ser aplicado para amostras sólidas e para medições em altas frequências [28]; enfim, os métodos baseados na ressonância têm mais exatidão na obtenção da permissividade elétrica e da permeabilidade magnética dos materiais. Esses métodos são muito utilizados devido ao reduzido pré-processamento da amostra, elevada precisão e capacidade de obter medidas em elevadas temperaturas, sendo o método de cavidade ressonante muito utilizado. Os métodos de ressonância são mais recomendados para materiais de média e baixa perda [29].

Para dielétricos complexos, como materiais agrícolas, outros fatores podem interferir nos efeitos de relaxação dielétrica. A dependência da temperatura de ϵ_{∞} é relativamente baixa, e à medida que ϵ_s aumenta, a influência na região de dispersão é menor. Fora da região de dispersão, a constante dielétrica tendem a diminuir com a elevação da temperatura [30].

As propriedades do dielétrico para a água líquida estão listadas na Tabela 2.1 para algumas frequências, a temperaturas de 20°C e 50°C onde foram selecionados a partir de dados da literatura. Pode ser verificada uma grande variação nos valores da constante dielétrica, que para este caso, diminui com o aumento da frequência, e da temperatura, que altera o valor da permissividade para mais ou para menos, dependendo da frequência.

Na Tabela 2.2 podem ser observados os valores da relaxação, os valores da constante estática e da alta frequência da constante dielétrica para a água no intervalo de temperatura de 0°C a 60°C. Para este caso, verifica-se uma redução do tempo de relaxação com o aumento da temperatura, o que implica no aumento da frequência de relaxação proporcional ao aumento da temperatura do material.

Tabela 2.1 – Constante dielétrica relativa ϵ_r e fator de perda dielétrica ϵ_r'' para a água a temperatura indicada.

| Frequência (GHz) | 20°C | | 50°C | |
|---------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | ϵ' | ϵ'' | ϵ' | ϵ'' |
| 0.6 | 80.3 | 2.75 | 69.9 | 1.25 |
| 1.7 | 79.2 | 7.9 | 69.7 | 3.6 |
| 3.0 | 77.4 | 13.0 | 68.4 | 5.8 |
| 4.6 | 74.0 | 18.8 | 68.5 | 9.4 |
| 7.7 | 67.4 | 28.2 | 67.2 | 14.5 |
| 9.1 | 63.0 | 31.5 | 65.5 | 16.5 |
| 12.5 | 53.6 | 35.5 | 61.5 | 21.4 |
| 17.4 | 42.0 | 37.1 | 56.3 | 27.2 |
| 26.8 | 26.5 | 33.9 | 44.2 | 32.0 |
| 36.4 | 17.6 | 28.8 | 34.3 | 32.6 |

Fonte: [31] e [32]

Tabela 3.2 – Parâmetros de relaxação de Debye para a água com ϵ_s = constante dielétrica estática, ϵ_∞ = constante dielétrica em alta frequência e τ = tempo de relaxação.

| Temperatura, °C | ϵ_s | ϵ_∞ | τ , os | Frequência de Relaxação (GHz) |
|-----------------|--------------|-------------------|-------------|-------------------------------|
| 0 | 87.9 | 5.7 | 17.67 | 9.007 |
| 10 | 83.9 | 5.5 | 12.68 | 12.552 |
| 20 | 80.2 | 5.6 | 9.36 | 17.004 |
| 30 | 76.6 | 5.2 | 7.28 | 21.862 |
| 40 | 73.2 | 3.9 | 5.82 | 27.346 |
| 50 | 69.9 | 4.0 | 4.75 | 33.506 |
| 60 | 66.7 | 4.2 | 4.01 | 39.690 |

Fonte: [31] e [32]

2.3. Aspectos Gerais da Manga Tommy Atkins

Estabelecer o estágio de maturação fisiológica da manga Tommy Atkins no momento da colheita tem sido um grande desafio para os produtores. O estágio inaceitável de maturação fisiológica é uma das principais causas de prejuízos, ou da baixa qualidade das mangas brasileiras que são exportadas para a Europa [33]. Por esses motivos, novas atitudes com o intuito de melhorias através da introdução de tecnologias agrícolas e agroindustriais que potencialize as técnicas de desenvolvimento, a definição do ponto de colheita, o transporte e armazenamento, a vida de prateleira e comercialização dos frutos são implantadas. Todos esses fatores que implicam na qualidade dos frutos e acarreta perda econômica, são oriundos das dificuldades de encontrar um padrão para o ponto de colheita, que normalmente é determinado pela aparência exterior do fruto como: forma, tamanho, brilho, cor da casca, aspecto das lenticelas e número de dias após florada [34]. Outras formas de determinação do estágio de maturidade de forma não invasiva é pela solidez da polpa, conteúdo do amido, sólidos solúveis, acidez tituláveis, taxa de respiração e produção de etileno [35]. O ponto de colheita perfeito seria aquele que sucedesse com o crescimento fisiológico aceitável que pudesse ocasionar um tempo de prateleira satisfatório para sua comercialização sem que alterasse sua qualidade.

Os pontos primordiais que indicam a colheita são: aparência externa do fruto (lenticelas, ombro, casca), coloração da polpa, determinação dos sólidos solúveis totais e solidez [36].

Estudos recentes têm evidenciado a relevância do metabolismo dos carboidratos a respeito das transformações bioquímicas que acontece no fruto após a colheita, especialmente na modificação do amido em açúcares solúveis. Esta transformação essencial para o amadurecimento pode ser afetada, caso o fruto seja colhido antes de atingir a quantidade máxima de amido ou o estágio de maturação mínima para se desenvolver [34].

As regiões geográficas melhores adaptadas para a produção de manga são as que têm temperaturas médias entre 30°C a 33° C durante seu desenvolvimento [37], principalmente quando estas estão no estágio juvenil, crescimento máximo, maturação e senescência [38].

Os frutos quando juvenis demonstram um crescimento lento. Acúmulo de matéria fresca e seca, quantidade de transpiração elevada e um minúsculo embrião [39].

Caracteriza-se como estágio de crescimento máximo a expansão do volume do fruto, inclusive da semente [40]. A manga Tommy Atkins por ser climatérica, ao atingir de maturação fisiológica, encontra-se em ponto de colheita. O tempo que leva para atingir este estágio diferencia para cada tipo de fruto: 80 dias para a manga Irwin [41], 90 dias para as cultivares Langra, Krishnabhog, Alphonso, Dashehari e Fazli Zafrani [42] e de 90 a 150 dias para o cultivo da Tommy Atkins [43]. No estágio de maturação se define por grandes transformações químicas na casca e na polpa do fruto como: alta dependência carbono / nitrogênio (C/N), abundância na quantidade de amido, auge climatérico, tendo o início exato do amadurecimento, abundância de matéria seca, interrupção do crescimento da semente e um modesto aumento do volume e do massa [41].

O fruto é considerado em ponto de colheita quando atinge seu estágio de maturação fisiológica de desenvolvimento possibilitando um amadurecimento mesmo após ser colhido [44].

Na senescência, último estágio de desenvolvimento, a taxa de respiração aumenta, ocorre uma ligeira diminuição na quantidade de sacarose e um crescimento na quantidade de glicose, caracterizando o princípio da quebra da organização celular, que leva o fruto à morte [38].

2.3.1. Trocas Gasosas

Os frutos climatéricos, mesmo na pós-colheita, continuam seu processo de respiração intensa, a fim de adquirirem energia para seus processos metabólicos como a condensação de pigmentos, enzimas e demais materiais de estrutura celular [45]. Essa energia advém da decomposição oxidativa e liberação de energia de moléculas mais complexas como amido, açúcares, lipídios, proteínas e ácidos orgânicos de reservas exclusivas, em moléculas simples com CO_2 e H_2O . É durante a respiração que os compostos ricos em energia sofrem transformações, como perda de massa, mudança no valor nutritivo e aroma, precisando, a planta, de oxigênio do ar para dar continuidade à respiração.

Representação simplificada da respiração da planta:

Compostos ricos em energia + O_2 = CO_2 + H_2O + energia para a planta

Toda energia que a planta produz é utilizada, em parte por ela mesma, para sua manutenção e a outra parte é liberada para o meio ambiente em forma de calor [46].

A proporção de sólidos solúveis totais (SST), usualmente é feito com o intuito de se ter uma aproximação da quantidade de açúcares presentes no fruto, apesar de que, por ser medido por refratômetro, engloba além dos açúcares, as pectinas, sais e ácidos. Com o amadurecimento dos frutos, os SST vão aumentando, os quais são compostos essencialmente por açúcares solúveis [47].

O aumento da quantidade de SST em manga varia no intervalo de 7,0 a 17,4°Brix, conforme a cultivar e seu estágio de maturação.

É possível medir a acidez do fruto utilizando basicamente dois procedimentos, a acidez total titulável (ATT) que caracteriza todos os grupos de ácidos encontrados (ácidos orgânicos livres, no formato de sais e compostos fenólicos) e o potencial hidrogeniônico (pH) que define o acúmulo hidrogeniônico da solução [48].

A manga é classificada como um fruto ácido, tendo a maior parte dos cultivares um pH abaixo de 4,5, com o amadurecimento, a quantidade de ácidos orgânicos diminui na maioria dos frutos tropicais aumentando o pH, em consequência a sua utilização no ciclo de Krebs, ao longo do procedimento respiratório ou de sua transformação em açúcares [45].

Com o processo de amadurecimento, os sólidos solúveis totais (SST) tendem a aumentar, enquanto a acidez total titulável (ATT) diminui com o amadurecimento, logo, a relação SST/ATT é a indicação do sabor, aumentando à medida que os SST aumentam e ocorre a diminuição dos ATT [49].

O amadurecimento dos frutos depende da produção do hormônio etileno que está relacionada com a taxa de respiração. Uma qualidade dos frutos climatéricos é a habilidade de demonstrar a geração auto catalítica de etileno [50].

A geração de etileno pode acontecer antes, depois ou durante o pico climatérico, dependendo da cultivar [51].

As enzimas principais na geração do etileno são a ACC-oxidase e ACC-sintase, não tendo uma geração uniforme em todas as partes do fruto, na parte mais interna e mais externa do mesocarpo e na casca [52].

2.3.2. Fases de amadurecimento

Algumas frutas e hortaliças continuam com seu processo de amadurecimento mesmo após a colheita, denominadas climatéricas. As frutas climatéricas manipulam as reservas de substrato ou de matérias orgânicas ricos em energia, com a finalidade de

respirar e adquirir a energia suficiente para manter tais reações metabólicas. A respiração é o primordial meio fisiológico envolvido na fisiologia pós-colheita de frutas e hortaliças. Essa respiração tem dependência com vários fatores, sendo a temperatura elevada uma causa para o aumento da respiração e com isso reduzindo consideravelmente sua vida útil.

Toda espécie cultivada possui uma taxa respiratória característica, como mostra na Tabela 2.3, em sua maioria, o ímpeto de respiração de produtos imaturos é elevado, vindo a diminuir com o tempo, durante o crescimento e frutificação das plantas e volta a aumentar ao início da fase de maturação.

A transitoriedade e o envelhecimento das frutas e hortaliças são simétricos ao tipo e ao grau de respiração de cada fruta ou hortaliças, sendo classificada como climatéricas e não-climatéricas.

Os frutos cuja respiração é climatérica apresentam um alto grau de respiração e como consequência, o processo de amadurecimento e envelhecimento ocorre com maior rapidez, acarretando um maior consumo de energia [53].

Tabela 4.3 – Taxa e Padrão de respiração de algumas frutas e hortaliças a 20°C.

| Produto | Respiração (ml. Kg⁻¹. h⁻¹) | Padrão Respiratório |
|---|---|----------------------------|
| Abacate (<i>Persea americana</i>) | 30 | Climatérico |
| Abóbora cv. Jacarezinho (<i>Cururbita máxima</i>) | 45 | Climatérico |
| Alface cv. Baba (<i>Lactura sativa</i>) | 75 | Não-climatérico |
| Alho cv. Amarante (<i>Allium sativum</i>) | 20 | Não-climatérico |
| Banana (<i>Musa spp</i>) | 30 | Climatérico |
| Buriti (<i>Mauritia vinífera</i>) | 20 | Climatérico |
| Batata-doce (<i>Ipomoea batatas</i>) | 13 | Não-climatérico |
| Laranja (<i>Citrus sinensis</i>) | 17 | Não-climatérico |
| Mandioca (<i>Manhot indica</i>) | 15 | Não-climatérico |
| Manga (<i>Mangifera indica</i>) | 60 | Climatérico |

Fonte: [53]

Para vários tipos de produtos agrícolas como frutas e hortaliças, existe uma fase no qual os frutos se mostram nas melhores condições, tanto para colheita quanto para consumo. A aparência física e critérios bioquímicos precisos do fruto descrevem o seu estado fisiológico.

No desenvolvimento dos frutos ocorre uma série de procedimentos (estádios) que vão desde o início do crescimento até a sua morte. O crescimento ocorre ainda na planta, com o aumento do comprimento e acumulando carboidratos em forma de amido, sendo o aumento irreversível das características do fruto. É na maturação fisiológica que o fruto é colhido e tem início a maturação que se realiza em três fases: a pré-climatérica, de reações metabólicas baixas; a fase climatérica, que tem um aumento considerável na taxa de respiração onde se realiza as reações metabólicas relevantes de maturação do fruto, como amolecimento da polpa, transformação do amido em açúcares, alteração da cor da casca verde para amarela e melhoria de atributos próprios como aroma e sabor, e a senescência é o envelhecimento do fruto, onde ocorre uma redução nas propriedades da qualidade do fruto, como redução na quantidade de açúcares, aumentando o teor de glicose [54]. No final desta fase, o fruto se torna macio e os tecidos internos se desintegram o que culmina com a morte do fruto. O processo de amadurecimento pós-colheita pode ser acelerado por fatores como o aumento da temperatura, que aumenta a porosidade da casca, permitindo a troca de gases mais acelerada.

A Figura (2.1) ilustra graficamente as fases intermediárias de desenvolvimento da manga Tommy Atkins, desde a florescência (início) até sua morte. Verifica-se que alguns dos estádios de desenvolvimento ocorrem simultaneamente, como a maturação e a senescência. Assim, no processo de maturação, após a maturidade fisiológica, que indica o ponto de colheita da fruta, inicia-se a maturação e a senescência de forma simultânea, conduzindo o mesmo ao estágio final, com a morte do fruto.

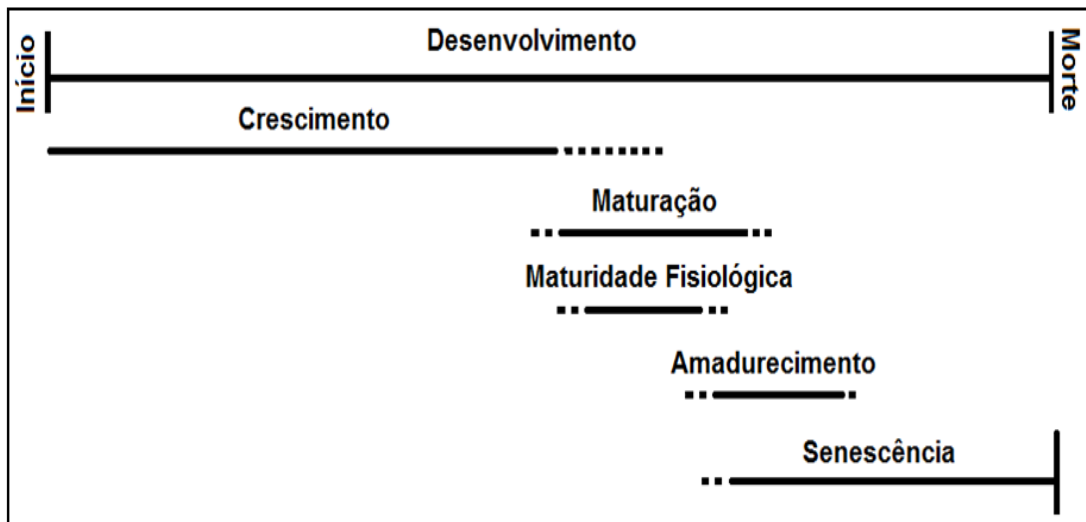


Figura 2.1 – Estádios de desenvolvimento do fruto.

Fonte: [6]

Neste capítulo foram apresentadas as propriedades eletromagnéticas dos materiais e sua dependência com a frequência e temperatura e outros fatores, além de discutir as técnicas de medição desses parâmetros. Também foi apresentada cada fase do ciclo de vida da manga Tommy Atkins, com destaque às alterações físico-químicas que ocorre em cada estágio de seu desenvolvimento. Em seguida, os parâmetros eletromagnéticos da manga serão apresentados em função do seu estágio de crescimento.

3. Materiais e Métodos

Neste trabalho o método de Sonda Coaxial é utilizado para determinação da constante dielétrica e tangente de perdas da manga Tommy Atkins, produzida no perímetro irrigado do Rio São Francisco, na cidade de Petrolina – PE e comercializados *in natura* na região metropolitana de João Pessoa.

Os frutos foram obtidos na CEASA na cidade de João Pessoa-PB, no segundo dia após a colheita, que ocorreu na sua maturação fisiológica, conhecida popularmente como estágio de maturação “de vez” (casca verde escura e roxa, polpa branco-creme).

Foram escolhidas cinquenta amostras da manga Tommy Atkins, com massa médio variando entre 400g e 720g. Os frutos permaneceram em temperatura de 26°C e em condições ambientes. Na caracterização, serão observadas as variações dos parâmetros em relação à frequência e estágio de maturação/desenvolvimento, procurando correlacionar a “assinatura” das medições com outros parâmetros do produto. Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas características da Tommy Atkins.

Tabela 5.1 – Taxa e Padrão de respiração de algumas frutas e hortaliças a 20°C.

| Descrição | Em 100 g de parte comestível |
|---------------------|------------------------------|
| Umidade (%) | 85,8 |
| Calorias (Kcal) | 51 |
| Calorias (KJ) | 212 |
| Proteínas (g) | 0,9 |
| Lipídios (g) | 0,2 |
| Carboidratos (g) | 12,8 |
| Fibra Alimentar (g) | 2,1 |
| Cálcio (mg) | 8 |
| Fósforo (mg) | 14 |
| Vitamina C (mg) | 7,9 |

Fonte: [55]

As medições foram realizadas no Laboratório de Medidas em Telecomunicações do Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB). As medições ocorreram durante o período de maturação da fruta. Neste período, o total de 50 amostras da manga Tommy Atkins partiram do mesmo estádio de maturação, sendo acompanhadas durante oito dias, em que foram medidas a constante dielétrica e a tangente de perda sobre a casca, de maneira não invasiva. Os frutos foram divididos em lotes de 10 unidades uniformes. Cada dia foi utilizado frutas de um lote (10 unidades) e uma amostra de cada um dos outros lotes, totalizando 14 medições por dia. Os resultados foram tratados usando a média estatística e o desvio padrão das medições realizadas. No final do período de observação, cerca de 40% dos frutos estavam com sinal de falência dos seus tecidos, enquanto o restante apresentavam sinais de senescência, com casca enrugada e coloração amarelada.

Os experimentos foram conduzidos em temperatura ambiente (26°C), mantendo-a estável durante todo o processo. As medições da constante de dielétrica relativa (ϵ_r') e da tangente de perdas ($\tan\delta$) foram realizadas com auxílio do Analisador de Redes Vetorial (VNA), modelo 16451B, e do conjunto de medições de dielétricos modelo 85070, ambos fabricados pela *Keysight*, na faixa de frequências de 1 GHz a 10 GHz. Na Figura (3.1) é apresentado o *setup* de medição da permissividade e tangente de perdas da manga Tommy Atkins.

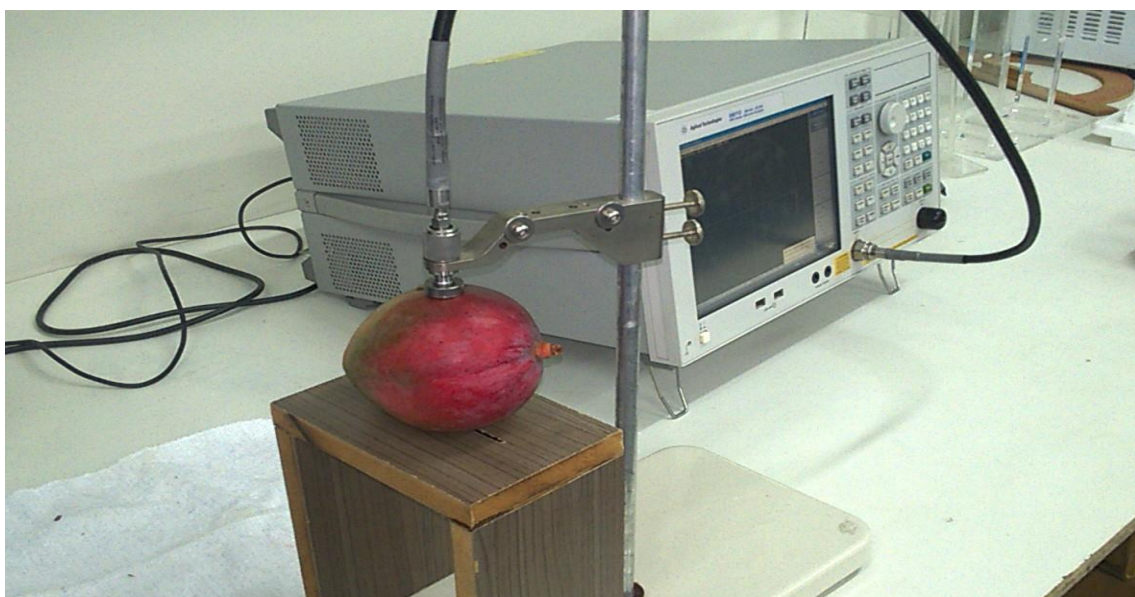


Figura 3.1 - Setup de medição de características dielétricas por sonda coaxial.

A manga Tommy Atkins é constituída por quatro partes: pedúnculo, casca, poupa e caroço. Na Figura 3.2 é possível observar as componentes de uma manga Tommy Atkins. As medições foram realizadas considerando as duas faces de cada fruta, considerando uma região mais plana da casca. Na maioria dos frutos, foram efetuadas duas medidas na região da base dorsal da manga, evitando imprecisão do processo de medição. Para efetuar as medições, a sonda é calibrada para a faixa de frequência de interesse, no caso, entre 100 MHz a 10 GHz. As frequências foram escolhidas por apresentarem melhores resultados em análise anterior. A Figura 3.2 indica os pontos de medições em ambas às faces da manga. Os pontos de medição foram escolhidos por causa de o método utilizado exigir a superfícies de medição mais plana possível para que não exista a alteração dos resultados pela penetração de ar na ponta de prova.

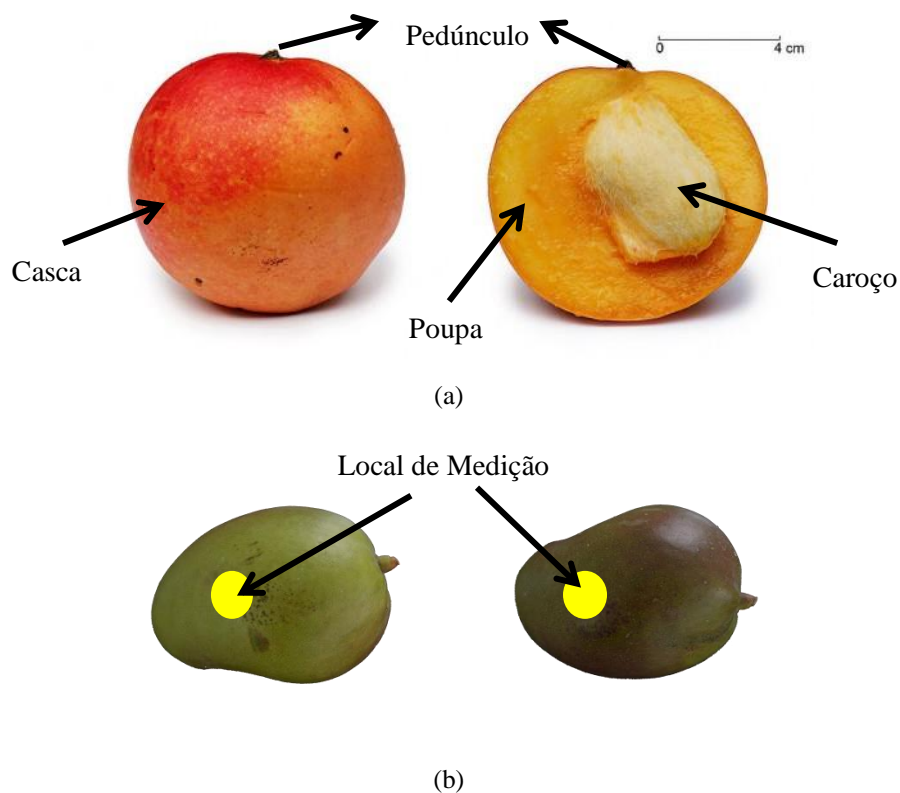


Figura 4.2 - Manga Tommy Atkins: a) partes da manga; b) Indicação dos locais de medição.

Fonte: O Autor

Outros aspectos da manga, como variação da coloração da casca e variação de massa e dimensões também foram acompanhados durante o período de medidas. A maturação foi classificada a partir da cor da casca, de acordo com a escala proposta em GTZ [56]. Os indicadores de luminosidade e cromaticidade ou pureza da cor foram determinados por processos fotográficos, através do histograma de cores.

Neste capítulo foram apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, com o método utilizado nas medições e a determinação da maturação das amostras. No próximo capítulo são apresentados os resultados medidos da caracterização dielétrica da Tommy Atkins.

4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da espectroscopia dielétrica da manga Tommy Atkins, incluindo a variação da cor da casca, aspectos sensoriais, variação de massa e dimensões e finalmente da constante dielétrica e tangente de perdas em função da frequência, pelo método da sonda coaxial com o acompanhamento dos resultados durante nove dias.

4.1. Indicadores visuais da maturação

Foram selecionados cinco frutos de cada lote, para acompanhamento da variação da cor da casca. Os indicadores de luminosidade e intensidade de cor foram determinados através de processo fotográfico, com a medição da intensidade do canal de verde (considerando o perfil de cor RGB) e do canal amarelo (considerando o perfil de cor CMYK). Os resultados foram enquadrados na escala proposta no manual da GTZ, aceito pela comunidade internacional como o padrão de cores para determinar o amadurecimento deste tipo de manga. A escala considera cinco gradações da cor da casca, relacionando aos estádios de maturação, sendo o primeiro estágio (1) de casca verde escuro, (2) de casca verde claro, (3) com percentual da cor da casca menor que 30% de amarelo, (4) com percentual de casca amarelada entre 30% e 70% e (5) com casca acima de 70% de amarelo. Os percentuais foram determinados a partir do histograma de cor, considerando toda a superfície da casca. A Tabela 4.1 mostra a escala de maturação para um dos frutos utilizados no experimento, acompanhado da análise sensorial. O estado de maturação da Tommy Atkins pode ser identificado pelo aumento no desvio padrão do amarelo (CMYK) e pelo menor nível de verde no perfil RGB.

Tabela 6.1 – Estádios de maturação da manga Tommy Atkins de acordo com a coloração da casca, proposto por GTZ

| Estádio | Indicador Visual | Cor predominante | Dias Após a Colheita | Características Sensoriais |
|---------|---|------------------|----------------------|---|
| 1 |  | Verde Escuro | 1 - 2 | Rigidez elevada. Coloração da casca com tonalidades de verde e vermelho. |
| 2 |  | Verde Claro | 3 - 4 | Menor rigidez. Redução da coloração vermelha e da tonalidade de verde na casca. |
| 3 |  | < 30% Amarelo | 5 - 6 | Menor firmeza do fruto em relação ao estágio anterior. A maioria dos frutos começam a ter a cor amarelada. |
| 4 |  | 30-70% Amarelo | 7 - 8 | Aroma intenso dos frutos. Redução da firmeza em relação ao estágio anterior. Início da senescência de alguns frutos da amostra. |
| 5 |  | >70 % Amarelo | 8 - 10 | Os frutos possuem coloração amarelada, com decréscimo da firmeza e início do enrugamento da casca. Não foi observada uma uniformidade nas amostras. |

Fonte: O Autor.

É importante observar que o método de determinação do estágio de maturação pela cor da casca não é um método preciso. Nas amostras utilizadas no presente estudo foi verificado que alguns exemplares não alteraram significativamente a cor da sua casca, enquanto outros passaram do estágio 1 para o 4 sem apresentar as características sensoriais e de aroma típicos dos estádios 2 e 3. Uma comparação da maturação de acordo com a coloração durante um período de nove dias em frutas com maior coloração de verde e de vermelho é visualizada na Figura 4.1. Pode ser observado que a amostra 1 permaneceu com a tonalidade de verde predominante durante os nove dias de observação, com sinais de morte dos tecidos a partir do oitavo dia. A amostra 2 da

mesma figura teve o mesmo comportamento da maioria dos frutos observados nesta pesquisa, com a coloração da casca passando do verde e vermelho escuro nos primeiros dias, para a coloração amarela predominante no nono dia de observação, sem sinais de morte de tecidos do fruto.

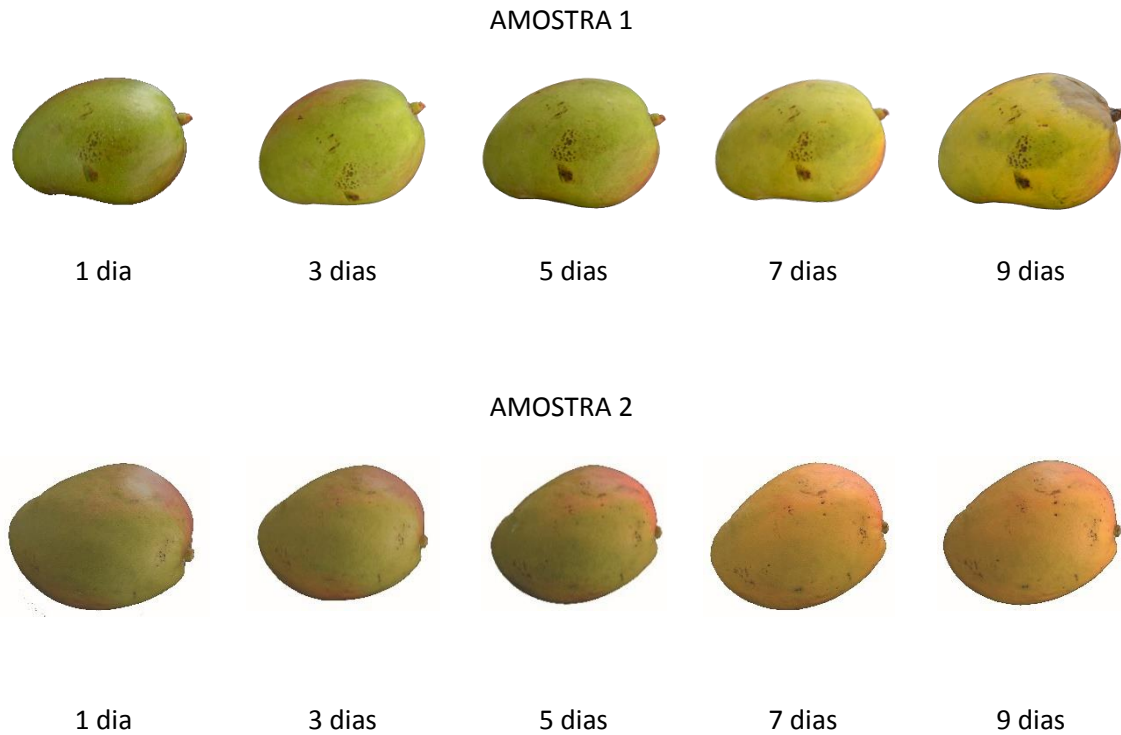


Figura 5.1 – Maturação da Tommy Atkins de acordo com a coloração da casca em nove dias.

Fonte: O Autor

Durante a maturação também foi verificado a variação das dimensões e massa das frutas. A Figura 3.2, apresenta a variação da massa de um conjunto de 15 frutas escolhidas aleatoriamente. O resultado mostra uma variação uniforme de perda de massa, onde cada fruta perde cerca de 0,8% de sua massa a cada dia para as condições de armazenamento em que as mesmas se encontravam. A perda de massa e redução do volume está associada ao processo de respiração, no processo de perda da clorofila e da aquisição de água.

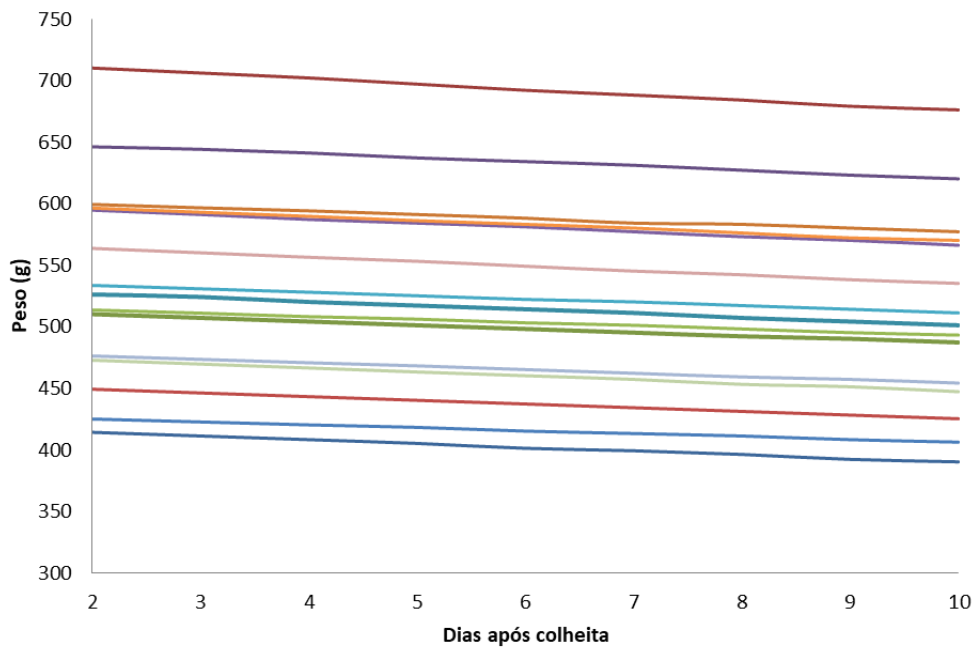


Figura 6.2 – Variação da massa das frutas analisadas.

Fonte: O Autor

4.2. Espectroscopia dielétrica da manga Tommy Atkins

A seguir, são apresentados os resultados medidos da constante dielétrica e tangente de perdas da manga Tommy Atkins pelo método da sonda coaxial com o acompanhamento dos resultados durante nove dias. As medições foram realizadas nas faixas de frequências de 1 – 10 GHz, nas amostras para os diferentes estádios de maturação.

4.2.1. Resultados para a constante dielétrica

Os resultados da média das medidas da constante dielétrica em função da frequência são mostrados na Figura 4.3. Inicialmente foi constatada uma variação dos valores medidos com o passar dos dias de maturação da fruta. Os valores da permissividade diminuem com o aumento da frequência para a faixa entre 100 MHz e 1 GHz. A partir dessa frequência, para os frutos nos estádio 1 (2º e 3º dia de colheita) e 2 (4º e 5º dia) passam a aumentar, sendo mais significativo para as mangas no estádio 1.

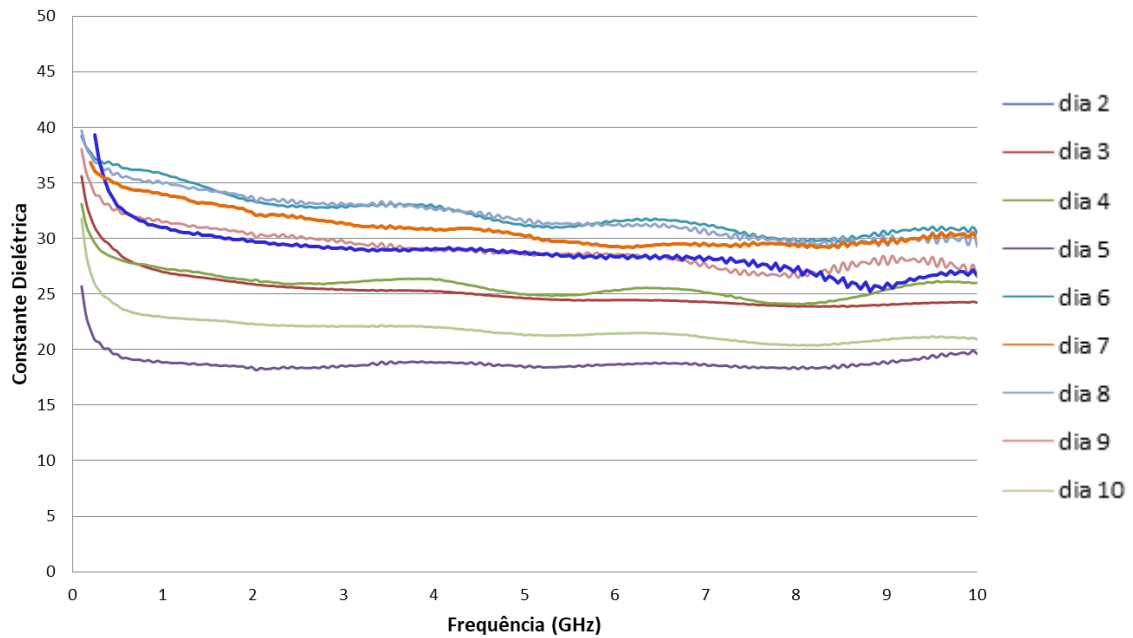


Figura 7.3 – Constante dielétrica em função da frequência para cada dia de medição.

Fonte: O Autor

Os valores medidos a cada dia não respondem de forma uniforme com o passar dos dias. Em alguns casos foram observadas nas diversas medições que em algumas frequências em particular os valores aumentam, enquanto em outras os valores reduzem. Também pode ser observado que os valores da constante dielétrica tendem reduzir no estágio de senescência, onde ocorre a morte dos tecidos. Outra característica importante é o aumento do desvio padrão nas medições em frequências elevadas, notadamente nos últimos dias de medição, podendo ser relacionado aos diferentes estádios de maturação neste período dos frutos no período. Na Figura 4.4 pode ser observada a variação da constante dielétrica em função do dia de medição.

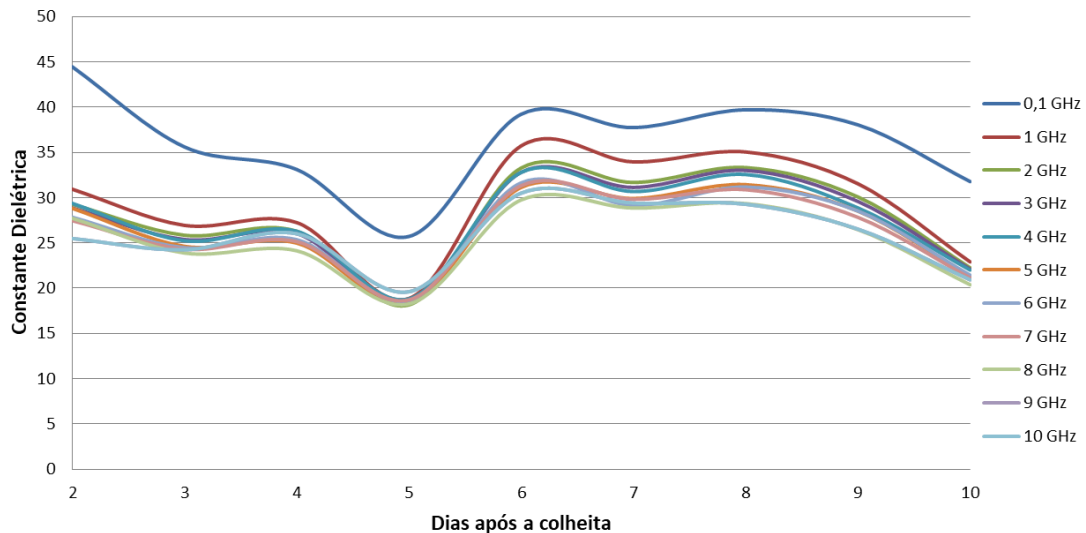
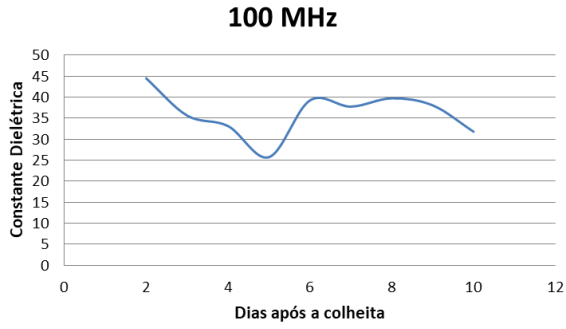


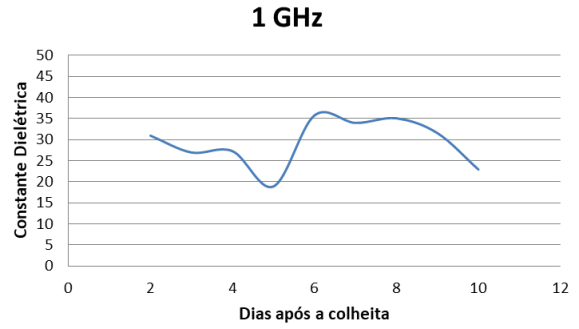
Figura 8.4 – Constante dielétrica da manga Tommy Atkins em seus diferentes estádios de maturação nas frequências de 1 - 10 GHz.

Fonte: O Autor

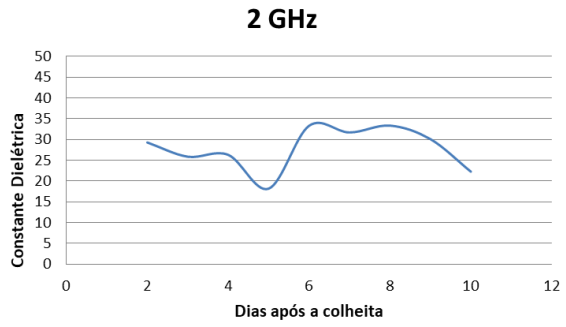
Pode ser observado que a variação da constante dielétrica indica a “assinatura” da constante dielétrica para a manga Tommy Atkins. Neste caso, observa-se que até o quinto dia após a colheita, para as condições em que foram mantidas as frutas, ocorreu o pico da maturação. Nos dias anteriores, ocorre uma pequena variação nos valores da permissividade, com tendência a redução. Esse período coincide com a fase pré-climatérica, com menor taxa de respiração e baixa atividade metabólica. O menor valor em todas as medições ocorreu exatamente no quinto dia após a colheita. A partir de então, pode-se verificar um aumento significativo no valor da constante dielétrica. Neste estágio, o fruto apresenta as características de aroma intenso e menor rigidez na análise sensorial. A partir do oitavo dia de medição, alguns frutos já apresentavam sinais de senescência, com o início da destruição dos seus tecidos. Neste período, ocorreu uma queda considerável no valor da constante dielétrica, sendo maior em algumas frequências. Para melhor visualização da variação da frequência em cada dia, a Figura 4.5 mostra a variação da constante dielétrica, obtendo a assinatura para cada dia nas frequências indicadas.



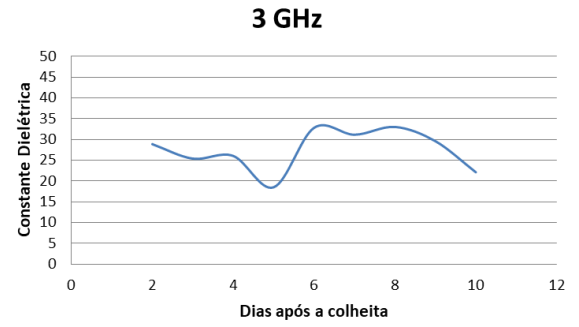
(a)



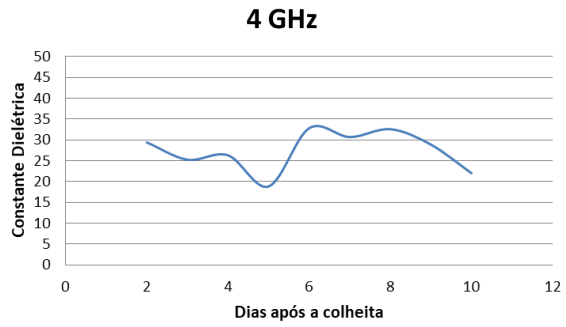
(b)



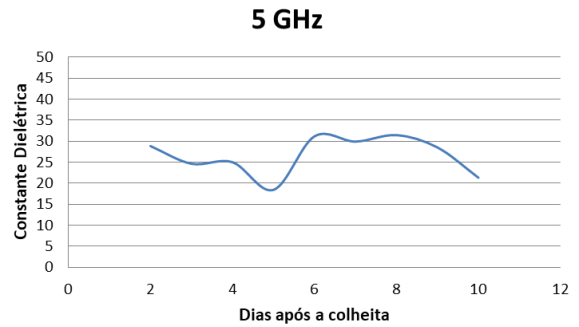
(c)



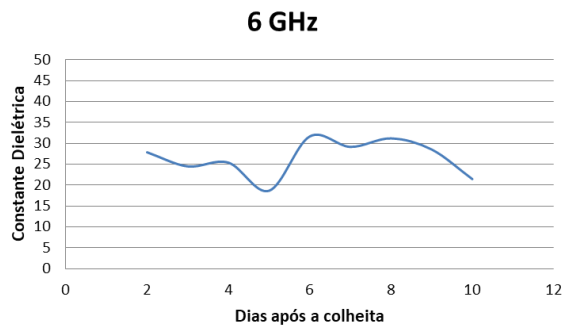
(d)



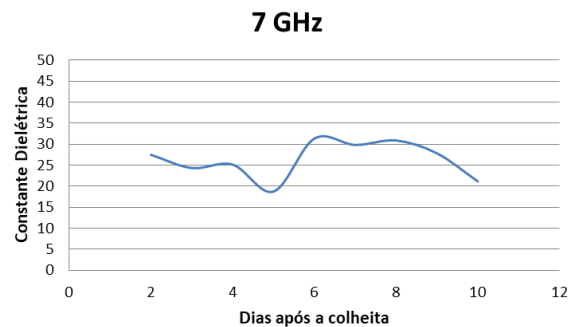
(e)



(f)



(g)



(h)

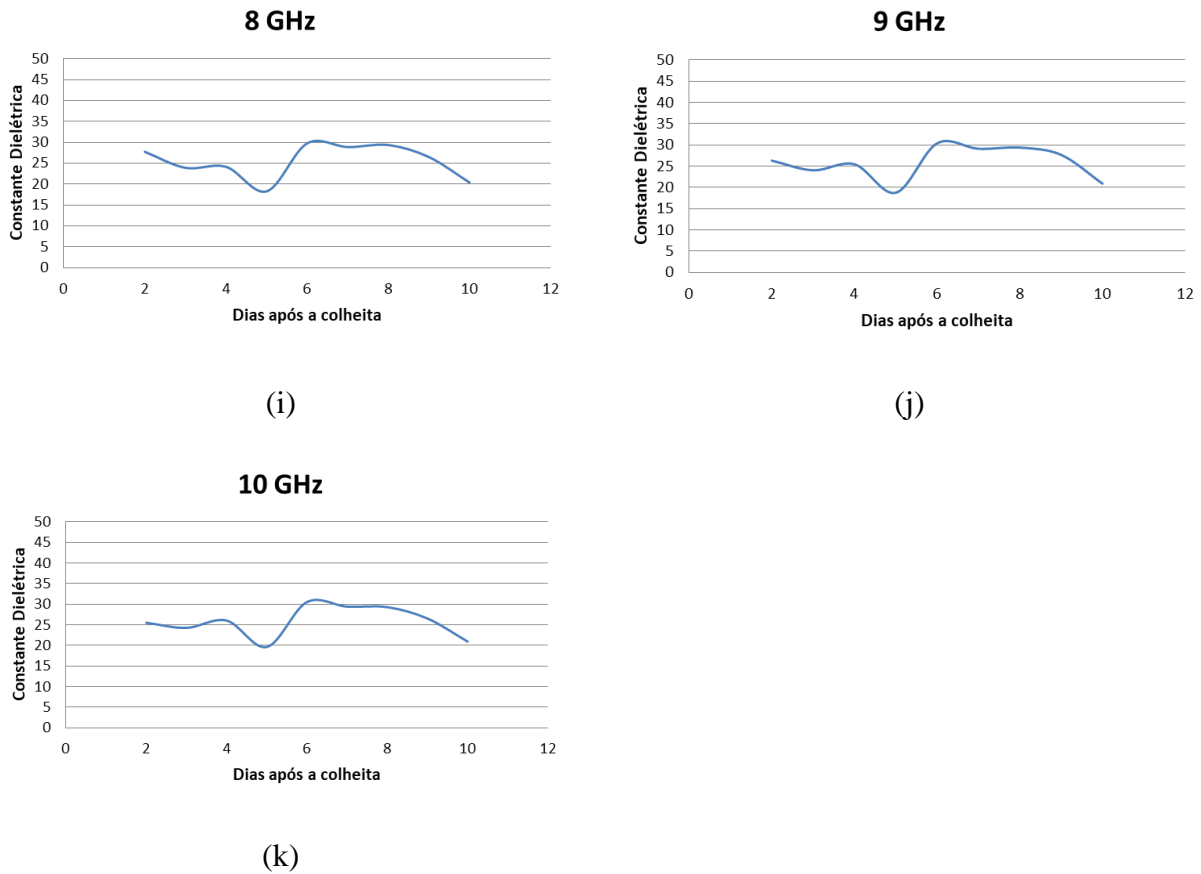


Figura 9.5 – Constante dielétrica da manga Tommy Atkins em função do dia após colheita. (a) $f = 100$ MHz, (b) $f = 1$ GHz, (c) $f = 2$ GHz, (d) $f = 3$ GHz, (e) $f = 4$ GHz, (f) $f = 5$ GHz, (g) $f = 6$ GHz, (h) $f = 7$ GHz, (i) $f = 8$ GHz, (j) $f = 9$ GHz, (k) $f = 10$ GHz.

Fonte: O Autor

Dos gráficos da Figura 4.5 pode ser verificado que a assinatura da constante dielétrica é praticamente a mesma em toda a faixa, alterando apenas os valores a cada frequência. Pequenas mudanças podem ser observadas, principalmente nas frequências mais baixas. A maior parte das vezes que um mesmo material tem assinatura da constante dielétrica variável com a frequência ocorre que na sua composição existem elementos que são mais susceptíveis a uma frequência do que a outra, podendo, neste caso, ser verificados parâmetros de qualidade da fruta a partir da análise de uma ou outra frequência em particular.

4.2.2. Desvio médio para a constante dielétrica

O experimento considerou as medições num conjunto de 50 frutas, que foram agrupadas em cinco grupos, cada um com 10 mangas. A cada dia foi medido a constante

dielétrica e a tangente de perdas em 14 mangas, sendo 10 de um mesmo grupo e uma fruta de cada grupo escolhida aleatoriamente. Como cada fruta foi medida em cada um dos lados e em cada medida foi considerado 201 valores de frequência entre 100 MHz e 10 GHz, durante nove dias, foram produzidos um total de 270 tabelas, contendo cada uma os 201 dados para cada um dos parâmetros dielétricos. Assim, o presente experimento produziu um total de 108.540 registros. Os valores foram tratados e apresentados como média estatística. A seguir, são apresentados os valores do desvio médio para os valores da constante dielétrica, sendo os resultados apresentados em função da frequência de medição, como mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 7.2 – Desvio médio da constante dielétrica da manga Tommy Atkins nas frequências de 1 - 10 GHz.

| Frequência (MHz) | Constante Dielétrica Média | Desvio Médio |
|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| 100 | 44,457 | 0,5123 |
| 500 | 32,254 | 0,5189 |
| 1000 | 30,859 | 0,5173 |
| 1500 | 26,427 | 0,4544 |
| 2000 | 25,906 | 0,4422 |
| 2500 | 25,566 | 0,4298 |
| 3000 | 26,036 | 0,4450 |
| 3500 | 26,277 | 0,4480 |
| 4000 | 26,381 | 0,4428 |
| 4500 | 18,661 | 0,0650 |
| 5000 | 18,554 | 0,0639 |
| 5500 | 18,508 | 0,0630 |
| 6000 | 29,138 | 0,6065 |
| 6500 | 29,266 | 0,6026 |
| 7000 | 30,868 | 0,6227 |
| 7500 | 29,895 | 0,5789 |
| 8000 | 30,001 | 0,5741 |
| 8500 | 26,916 | 0,4754 |
| 9000 | 28,432 | 0,5229 |
| 9500 | 27,664 | 0,4810 |
| 10000 | 20,914 | 0,0950 |

Fonte: O Autor

O desvio médio da constante dielétrica apresentam menores valores nas diversas frequências no pico climatérico e na senescência da fruta, quando os valores da constante dielétrica são mínimos. De forma geral, os maiores valores para o desvio médio foram obtidos nas frequências de 6 GHz a 7 GHz, evidenciando maiores variações nos valores medidos para as diversas frequências nesses dias. Este fato pode estar relacionado a não homogeneidade na maturação das frutas, uma vez que algumas

frutas apresentaram sinais de senescência a partir do sétimo dia após colheita, enquanto outros apresentavam firmeza na análise sensorial mesmo passado os nove dias de observação. Esta variação também foi percebida para variação da cor da casca (que foi também usada como indicador do estágio de maturação), que também apresentou não uniformidade no tempo.

4.2.3. Resultados para a tangente de perdas

Os resultados da média das medidas da tangente de perdas em função da frequência são mostrados na Figura 4.7. Assim como ocorreu com a constante dielétrica, o comportamento da variação da tangente de perdas não é uniforme com o passar dos dias. Foram observadas variações nos valores para cima ou para baixo, dependendo do estágio de maturação da fruta. Assim, também podemos correlacionar o valor da tangente de perdas com os estádios de maturação.

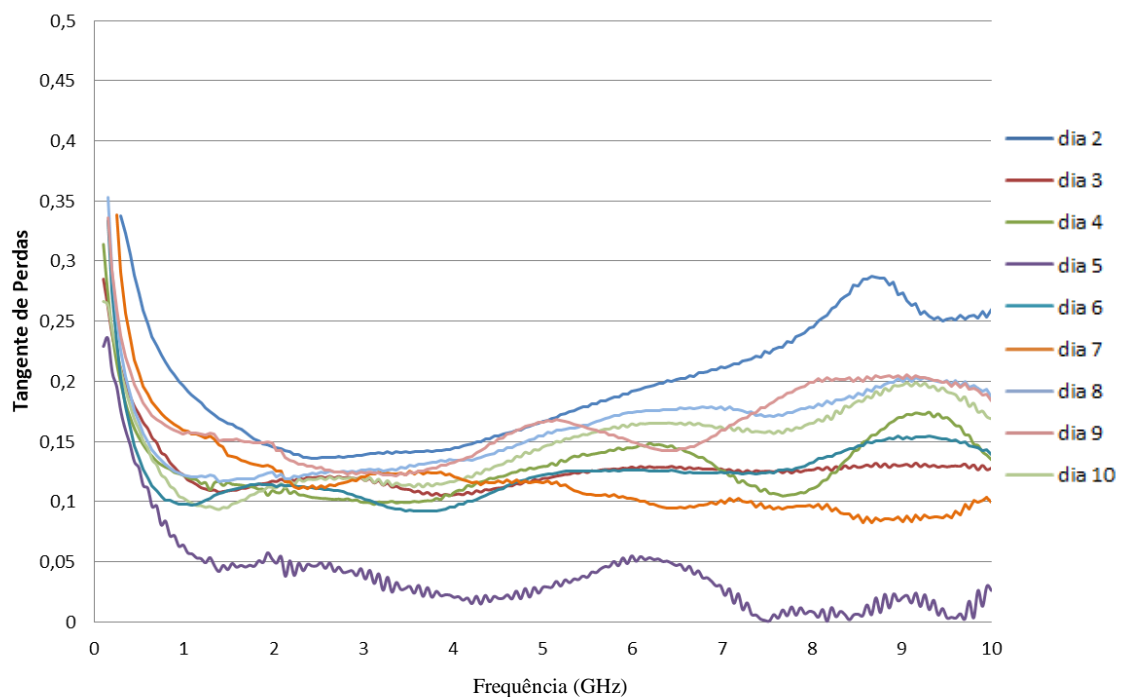


Figura 10.6 – Tangente de perdas da manga Tommy Atkins em função da frequência para cada dia de medição.

Fonte: O Autor

Como os valores da tangente de perdas não tem um comportamento uniforme, os valores são apresentados para cada frequência em função do dia de observação, facilitando correlacionar o valor da tangente de perdas com o estágio de maturação da fruta. O resultado é mostrado na Figura 4.8.

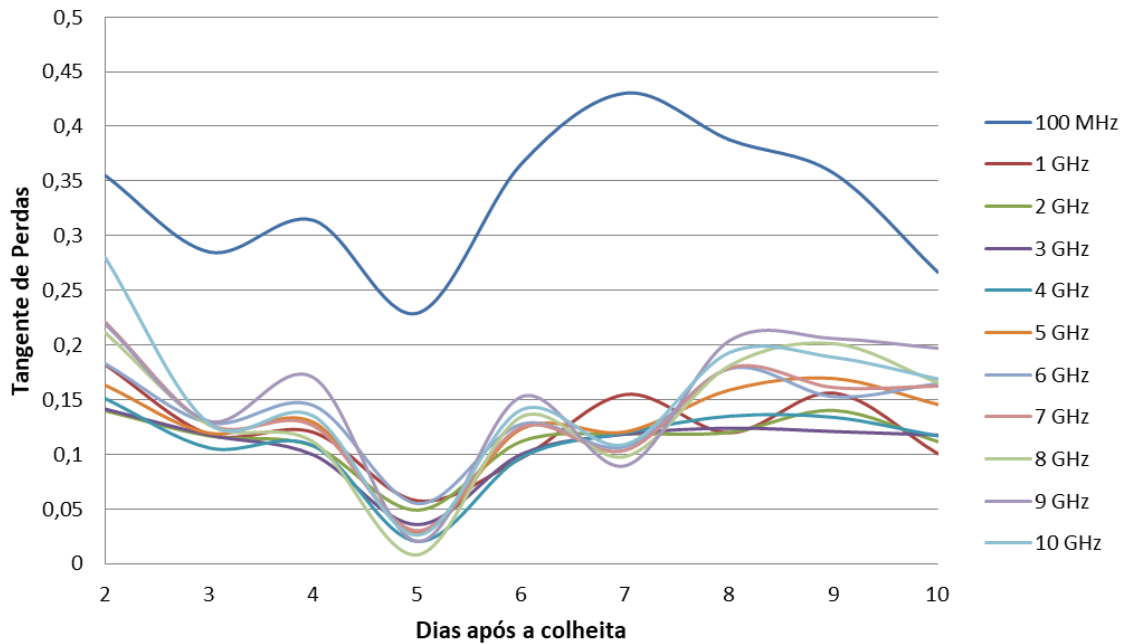
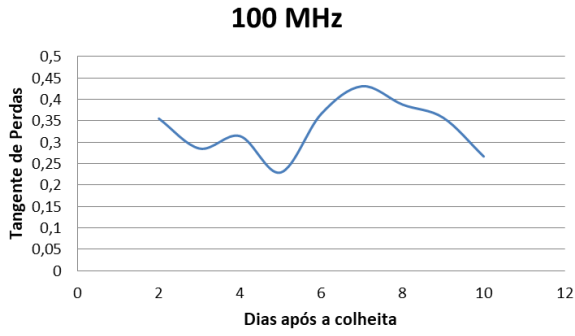


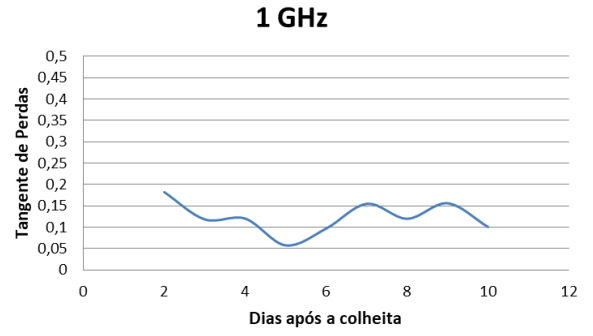
Figura 11.7 – Tangente de perdas da manga Tommy Atkins em seus diferentes estágios de maturação nas frequências de 1 - 10 GHz.

Fonte: O Autor

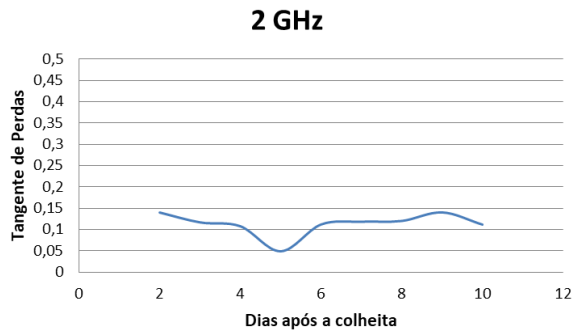
A Figura 4.8 mostra a assinatura da tangente de perdas durante o processo de maturação da manga Tommy Atkins. Verifica-se que até o quinto dia após a colheita, para frequências acima de 1 GHz, uma pequena variação da tangente de perdas, com o menor valor sendo observado no quinto dia após a colheita, que corresponde ao pico da maturação. Nessa faixa, a manga se encontra na fase pré-climatérica, com baixa atividade metabólica. Entre o quinto e o sexto dia, na fase climatérica, ocorre um aumento considerável da tangente de perdas, que pode ser associada ao aumento de líquidos ou eletrólitos na fruta. A partir daí, verifica-se um decréscimo desse valor, com outro pico de baixa no estágio de senescência da fruta. Também foi verificado diferentes assinaturas em função da frequência, assim, os resultados foram apresentados por faixa de frequência em função dos dias após a colheita, mostrados na Figura 4.9.



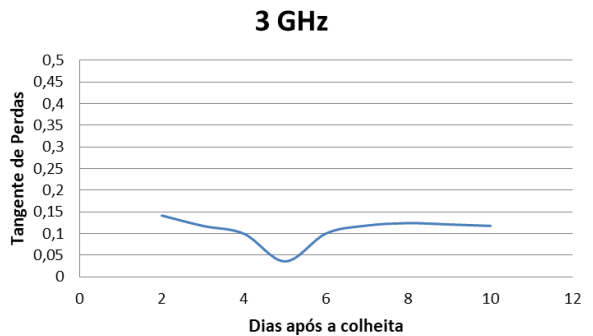
(a)



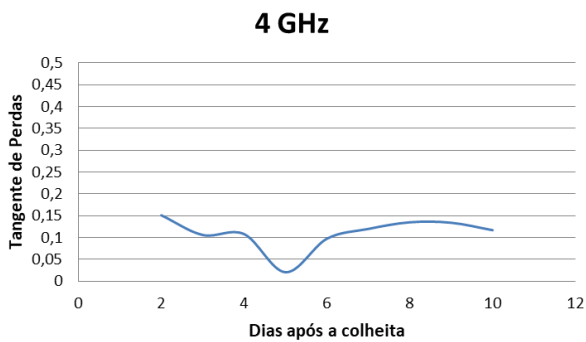
(b)



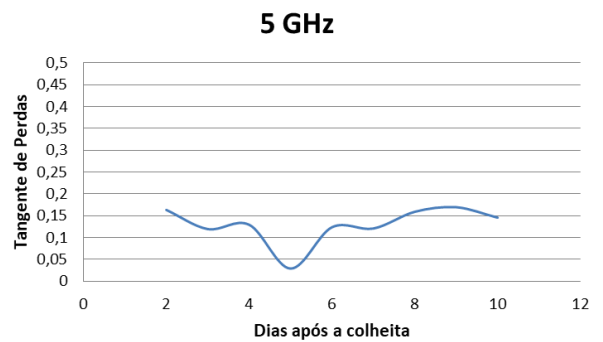
(c)



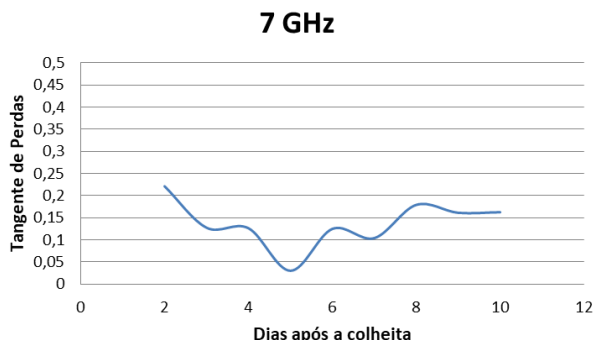
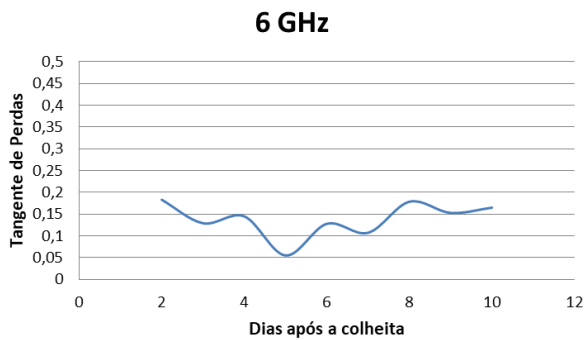
(d)



(e)



(f)



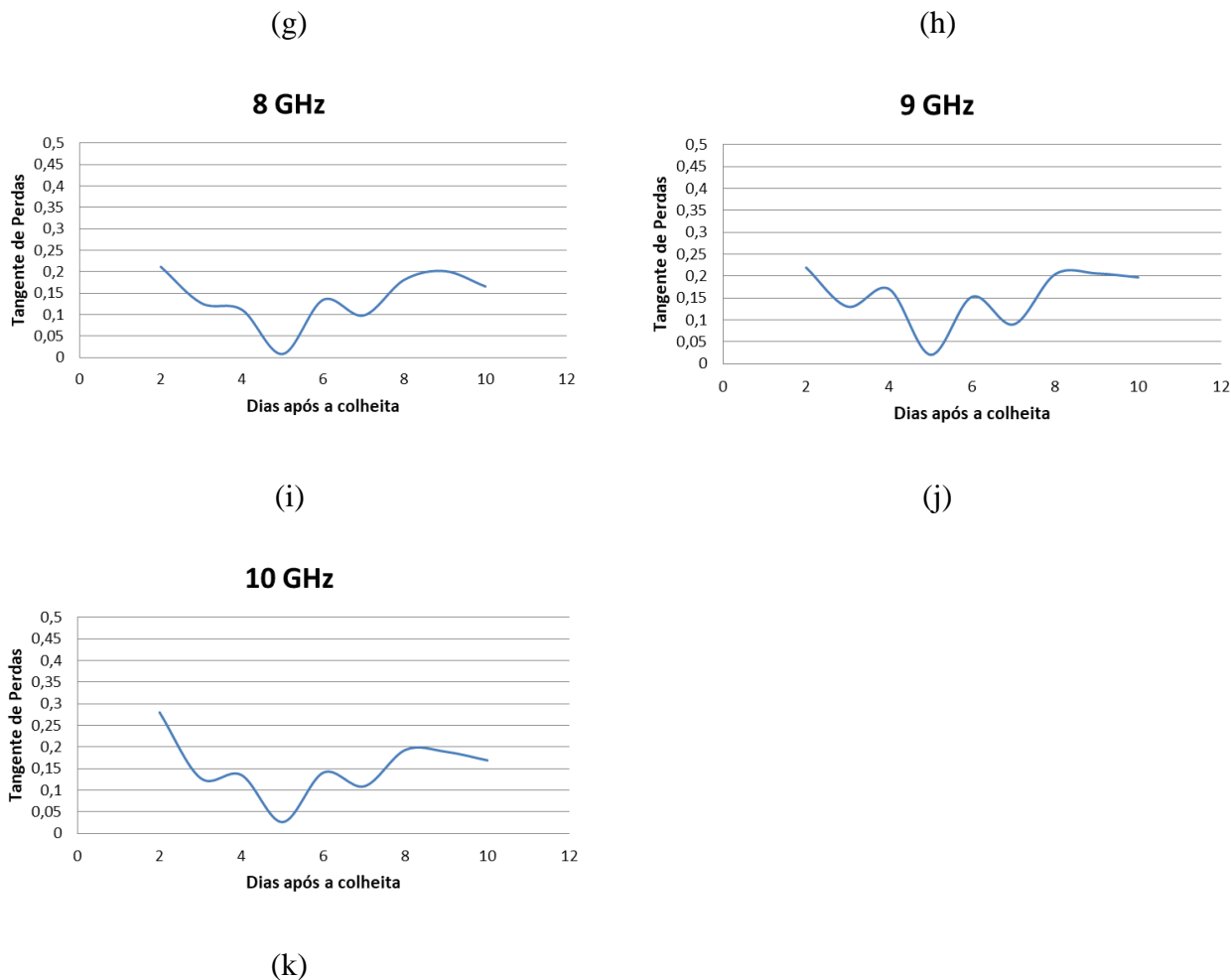


Figura 12.8 – Tangente de perdas da manga Tommy Atkins em função do dia após colheita. (a) $f = 100$ MHz, (b) $f = 1$ GHz, (c) $f = 2$ GHz, (d) $f = 3$ GHz, (e) $f = 4$ GHz, (f) $f = 5$ GHz, (g) $f = 6$ GHz, (h) $f = 7$ GHz, (i) $f = 8$ GHz, (j) $f = 9$ GHz, (k) $f = 10$ GHz.

Fonte: O Autor

Da análise dos gráficos da Figura 4.9, observa-se uma considerável diferença na assinatura da tangente de perdas até a frequência de 3 GHz. Pode-se atribuir essa diferença a outros elementos, como etileno, proteínas, amido ou outro elemento que pode ser encontrado na manga, devendo ser investigado a resposta em frequência para cada um desses elementos. Acima dessa frequência, foi constatado a mesma assinatura para a tangente de perdas, alterando apenas os valores, mantendo a mesma forma da assinatura, o que indica que este parâmetro acompanha as variações ocorridas no fruto durante o processo de maturação.

4.2.4. Desvio médio para a tangente de perdas

Diferente dos valores da constante dielétrica, a tangente de perdas apresenta variações consideráveis nas diversas frequências, principalmente nas frequências mais baixas. O desvio médio para a tangente de perdas são mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 8.3 – Desvio médio para a tangente de perdas da manga Tommy Atkins nas frequências de 1 - 10 GHz.

| Frequência (MHz) | Tangente de Perdas (Média) | Desvio Médio |
|------------------|----------------------------|--------------|
| 100 | 0,3549 | 0,00230 |
| 500 | 0,2484 | 0,00132 |
| 1000 | 0,1912 | 0,00159 |
| 1500 | 0,1089 | 0,00305 |
| 2000 | 0,1170 | 0,00254 |
| 2500 | 0,1201 | 0,00240 |
| 3000 | 0,0996 | 0,00151 |
| 3500 | 0,0992 | 0,00176 |
| 4000 | 0,1047 | 0,00192 |
| 4500 | 0,0212 | 0,00051 |
| 5000 | 0,0238 | 0,00053 |
| 5500 | 0,0370 | 0,00058 |
| 6000 | 0,1070 | 0,00516 |
| 6500 | 0,0944 | 0,00555 |
| 7000 | 0,1789 | 0,00455 |
| 7500 | 0,1706 | 0,00477 |
| 8000 | 0,1747 | 0,00502 |
| 8500 | 0,2059 | 0,00473 |
| 9000 | 0,1980 | 0,00438 |
| 9500 | 0,2061 | 0,00512 |
| 10000 | 0,1689 | 0,00130 |

Fonte: O Autor

Os valores do desvio médio evidenciam que para as frequências entre 4,5 GHz e 5,5GHz produzem os menores valores de desvio médio. Percebe-se também um comportamento diferente da tendência da variação deste parâmetro em relação aos valores obtidos nas altas frequências. Outra observação importante é que os menores valores da tangente de perdas, medidos no pico da maturação e na senescência produzem baixos valores no desvio médio, mostrando uma maior uniformidade das medições nesse período. De forma geral, os menores valores para o desvio médio (medições mais uniformes) foram observados para a frequência de 2 GHz.

Os valores do desvio médio para a constante dielétrica, mostrado na Tabela 4.2 e do desvio médio para a tangente de perdas, mostrado na Tabela 4.3 mostram que os

parâmetros não estão correlacionados entre si, e, portanto, as possíveis variações nos valores desses parâmetros podem estar associadas a diferentes parâmetros da fruta.

5. Considerações Finais

Neste trabalho foi realizada a caracterização elétrica da manga Tommy Atkins pelo método da sonda coaxial, comparando os resultados da constante dielétrica e da tangente de perda em diversos estádios de maturação de frutos de um mesmo lote. O objetivo do trabalho foi o da observação/obtenção da assinatura dielétrica da manga Tommy Atkins, a fim de identificar quaisquer distúrbios que possa ser localizado com desvios dessa assinatura, verificando a variação elétrica da fruta em diversas frequências, para diferentes estádios de maturação, sendo consideradas as transformações fisiológicas para a taxa de respiração, formação de etileno, do amido, dos açúcares e ácidos solúveis tituláveis. Pelos resultados observados é possível constatar que:

- A constante dielétrica e a tangente de perdas das mangas Tommy Atkins, medidas nas frequências de 100 MHz a 10 GHz, apresentaram redução significativa no quinto dia de colhida, mantido as condições ambientes, refrigeração em torno de 25/26°C, indicando assim seu pico de maturação, já em dias anteriores ocorreu pequenas variações, na fase pré-climatérica;
- O fator de maturação é função da produção de etileno, que pode variar de acordo com a temperatura de acomodação da fruta, assim como a refrigeração adequada é possível aumentar o tempo de vida útil para a venda e consumo da manga Tommy Atkins.

Para trabalhos futuros, pode-se correlacionar as transformações físico-químicas a cada frequência utilizada, e com isso também poder verificar a correlação dessas transformações com a cinética de amadurecimento, bem como a aplicação desse método em outros frutos, como tubérculos e vegetais em geral, servindo para melhoria de uso comercial dos produtos e a correção das propriedades elétricas com as variações fisiológicas e químicas dos produtos avaliados.

Referências

- [1] G. Gomes Porto, H. Peixoto Santos Filho, C. Fátima Machado e N. Fonseca, “Avaliação da resistência de variedade de mangueira *Mangifera indica* L., do BAG manga da Embrapa Mandioca e Fruticultura, ao fungo *Colletotrichum gloeosporioides*, Penz.,” *6º Jornada Científica- Embrapa Mandioca e Fruticultura*, 2012.
- [2] O.-F. A. O. 2015, OECD/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Paris: OECD Publishing, 2015.
- [3] IBGE, Indicadores do IBGE - Estatística da Produção Agrícola, Brasília: IBGE, 2016.
- [4] I. B. d. G. e. E.-. IBGE, “Sidra,” [Online]. Available: sidra.ibge.gov.br/tabela/5457. [Acesso em 06 05 2017].
- [5] S. Nelson, “Estimation of Permittivities of Solids From Measurements on Pulverized or Granular Materials,” em *Dielectric Properties of Heterogeneous Materials*, A. Priou, Ed., New York, Elsevier, 1992, pp. 122-142.
- [6] A. E. Watada, r. C. Herner, a. Kader, r. J. Romani e g. L. Staby, Terminology for the description of developmental stages of horticultural crops. *HortScience*, v. 19, n. 1, p. 20-21, 1984.
- [7] S. T. S. K. S. Nelson, “Dielectric spectroscopy of honeydew melons from 10 MHz to 1.8 GHz for quality sensing.,” *Transactions of the ASABE*, vol. 46, n. 6, pp. 1977-1981, 2006.
- [8] S. Neslon, “Dielectric properties of agricultural products and some applications.,” *Research in Agricultural Engineering*, vol. 54, n. 2, pp. 104-112, 2008.
- [9] N. Knipper, “Use of high-frequency currents for grain drying.,” *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 4, n. 4, pp. 349-360, 1959.
- [10] S. Nelson, “Dielectric Spectroscopy in Agriculture,” *Journal of NonCrystalline Solids* , vol. 351, n. 33, pp. 2940-2944, 2005.
- [11] J. S. Gomes, A. Costa, J. G. O. Mariano, M. A. Oliveira e J. N. Carvalho, “Caracterização das Propriedades Dielétricas do Mamão Papaia,” *12º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo 17º SBMO - Simpósio Brasileiro de*

Micro-ondas e Optoeletrônica LAWOFS 2016 - Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors. CD.1, pp. 1-5, 25-29 Julho 2016.

- [12] S. O. Nelson, "Dielectric Spectroscopy of Fresh Fruits and Vegetables," *In Antennas and Propagation society International Symposium, IEEE*, pp. 455-458, 2005.
- [13] M. E. Sosa-Morales, L. Valerio-Junco, A. Lopes-Malo e H. S. Garcia, "Dielectric properties of food: Reported data in the 21st century and their potential Applications," *Food Science and Technology*, vol. 43, pp. 1169-1179, 2010.
- [14] P. C. A. Junior, P. C. Corrêa e D. M. Queiroz., "Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas," *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 4, n. 3, pp. 403-408, 2000.
- [15] S. O. Nelson, *Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications*, San Diego: Elsevier, 2015.
- [16] S. O. Nelson e A. Datta, *Dielectric Properties of Food Materials and Electric Field Interactions*, New York, NY.: ELSEVIER, 2001.
- [17] P. Debye, *Polar Molecules*. The Chemical Catalog Co., New York, NY, 1929.
- [18] J. B. Hasted, *Aqueous Dielectrics.*, New York: Chapman and Hall, 1973.
- [19] R. Field, *Dielectric Measuring Techniques*. In: Von Hippel, A. (Ed.), *Dielectric Materials and Applications (Sec. 1, Lumped Circuits, A. Permittivity, Chapter Ii)*., New York, NY: John Wiley & Sons, 1954.
- [20] P. Corcoran, S. Nelson, L. Stetson e C. Schlaphoff, *Determining Dielectric Properties of Grain and Seed in the Audiofrequency Range*, *Trans. ASAE* 13 (3), 1970.
- [21] K. Foster e H. Schwan, *Dielectric Properties of Tissues and Biological Materials: A Critical Review*. In: Bourne, J.R, *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 1989.
- [22] B. Kwok, S.O.Nelson e E. Bahar, *Time-Domain Measurements for Determination of Dielectric Properties of Agricultural Materials*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 28(2): 109-112, 1979.
- [23] S. Nelson, *Dielectric properties of grain and seed in the 1 to 50-mc range.*, *Trans. ASAE* 8 (1), 38-48, 1965.
- [24] S. Nelson, *Electrical properties of agricultural products- a critical review*, *Trans.*

- ASAE 16 (2), 384-400, 1973a.
- [25] S. Nelson, Improved sample holder for Q-meter dielectric measurements, Trans. ASAE 22 (4), 950-954, 1979a.
- [26] J. Jorgensen, A. Edison, S. Nelson e L. Stetson, A Bridge Method for Dielectric Measurements of Grain and Seed in The 50- To 250- Mhz Range, Trans. ASAE 13 (1), 18-20,24, 1970.
- [27] L. E. Stetson e S. O. Nelson, A Method for Determining Dielectric Properties of Grain and Seed in The 200 To 500- Mhz Range, Trans. ASAE 13 (4), 491-495, 1970.
- [28] G. A. Cavalcante, Desenvolvimento de Circuitos Planares Sobre Substratos Têxteis. Tese, Natal, RN: PPGEE/UFRN, 2014.
- [29] H. Kassem, V. Virgneras e G. e Lunet, Characterization Techniques for Materials Properties Measurement, Microwave and Millimeter Wave Technologies from Photonic Bandgap Devices to Antennas and Applications., InTech, 2010.
- [30] C. Bottcher e P. Bordewijk, Theory of Electric Polarization, Vol. II, Dielectrics in Time-Dependent Fields., Amsterdam, Oxford, New York, NY: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.
- [31] J. Hasted, Aqueous Dielectric, London: Chapman and Hall, 1973.
- [32] U. Kaatze, Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature, J. Chem. Eng., 1989.
- [33] C. G. D. Botton, "Avaliação da Qualidade de Mangas Transportadas por via Marítima chegando na Europa pelo porto de Roterdã, Holanda," *Revista Brasileira de Fruticultura, Cruz das Almas*, vol. 14, n. 2, pp. 121-125, 1992.
- [34] E. Bleinroth, "Determinação do Ponto de Colheita de Frutas," em *Tecnologia de Pós-Colheita de Frutas Tropicais*, Campinas, ITAL, 1988, pp. 01-19..
- [35] C. Saucedo e L. Arévalo, "I Taller Regional de Manejo Poscosecha de Productos de Interés para el Tropicó," em *Fisiología y Tecnología Poscosecha de Mango*, San José, Costa Rica, Sáenz, M. V., 1994, pp. 110-120.
- [36] R. E. Alves, P. J. C. Genú e A. C. Q. Pinto, "Colheita e Pós-Colheita," em *A Cultura da Mangueira*, Brasília, Embrapa, 2002, pp. 381-405.
- [37] J. M. P. Lima Filho e e. al., "Ecofisiologia," em *A Cultura da Mangueira*, Brasília, Embrapa, 2002, pp. 37-49.

- [38] A. C. Hume, "The Mango," em *Biochemistry of Fruits and their products*, London, Academic Press, 1971, pp. 233-254.
- [39] A. Guarinoni, "Efecto del Estado de Madurez de los Frutos a la Cosecha sobre su Conservación," In: *Convresso Iberoamericadno de Tecnolgia Postcosecha y Agroexportaciones*, vol. 1, pp. 29-38, 2000.
- [40] S. S. Saini, R. N. Singh e G. S. Paliwal, "Growth and development of mango fruit I. Morphology and cell division," *Indian Journal of Horticulture*, vol. 28, n. 1, pp. 247-256, 1971.
- [41] T. T. Wang e C. C. Shiesh, "Fruit growth, development and maturity indices of 'Irwin' mango in Taiwan," *Acta Horticulturae*, vol. 269, pp. 189-196, 1990.
- [42] H. Subramanyam, S. Krishnamurthy e H. B. Parpia, "Physiology and biochemistry of mango fruit," em *Advances in Food Research*, San Diego, 1975, pp. 223-305.
- [43] V. M. Medina, "Colheita e Pós-Colheita do Fruto da manga. In: São José, A. R.; Souza, I. V.B.," em *Manga: Produção e Comercialização*, Vitória da Conquista, UESB, 1992, pp. 86-91.
- [44] E. C. Harvey, "Maturity Indices for Quality Control and Harvest Maturity. In: Prinsley, R. T.; Tucker, G.," em *Mangoes: a Review*, London, Commonwealth Science Council, 1987, pp. 40-55.
- [45] M. I. F. Chitarra e A. B. Chitarra, *Pós-Colheita de Frutos e Hortaliças: Fisiologia e manuseio*, Minas Gerais: Lavras, 2005.
- [46] E. D. G. Danesi e A. C. N. M. F. P. Lemes, "Uso do Frio na Conservação de Frutas e Hortaliças," *Fundamentum* n° 82, 2012.
- [47] L. C. d. O. Lima, *Tecido Esponjoso em Manga 'Tommy Atkins': Transformações Químicas e Bioquímicas no Mesocarpo Durante o Armazenamento*, Minas Gerais: Universidade Federal de Lavras, 1997.
- [48] A. Kramer, "Fruits and Vegetables. In: Twigg, B. A.," em *Quality Control for Food Industry*, Connecticut, AVI Publishing Company, 1973, pp. 157-227.
- [49] E. W. Bleinroth, "Determinação do Ponto de Colheita das Frutas," *Tecnologia de Pós-Colheita de Frutas Tropicais*, Vols. %1 de %2Manual Técnico, 9, n. 2, pp. cap 1. 1-18, 1992.
- [50] J. C. e. a. Pech, "Postharvest Physiology of Climateric Fruits Recent Developments in the Biosynthesis and Action of Ethylene," *Sciences des Aliments*, vol. 14, n. 1, pp. 3-15, 1994.

- [51] M. e. a. Trinidad, “Controlled Atmospheres do Not Significantly Increase the Storage Life of Refrigerated Kent Mangoes,” *Acta Horticulturae, Wageningen*, vol. 453, pp. 643-653, 1997.
- [52] A. U. Cua e M. C. C. Lizada, “Ethylene Production in the 'Carabao' Mango (*Mangifera Indica* L.) Fruit During Maturation and Ripening,” *Acta Horticulturae, Wageningen*, vol. 269, pp. 169-179, 1990.
- [53] A. G. Calbo, C. L. Moretti e G. P. Henz, “Respiração das Frutas e Hortaliças,” *Comunicado técnico 46*, 2007.
- [54] P. John e j. Marchal, “Ripening and biochemistry of the fruit. In: GOWER, S.,” em *Bananas and Plantains.*, Lodon, Chapman & Hall, 1995, pp. 434-467.
- [55] D. A. d. Silva e S. M. M. Calisto, “Avaliação Físico-químico e Sensorial da Manga Tommy atkins Submetidos à desidratação,” UTFPR, Londrina, 2013.
- [56] GTZ - Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, *Manual de exportación: frutas tropicales y hortalizas*, Eschborn, 2011.