

MODELIZAÇÃO DE EQUIVALENTE ELÉCTRICO PARA REDE DE NERVURAS DE FOLHAS VEGETAIS

Manuel Joaquim Boldt de Jesus



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2012

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de
Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores

Candidato: Manuel Joaquim Boldt de Jesus, Nº 1910267, 1910267@isep.ipp.pt
Orientação científica : Prof. J. A. Tenreiro Machado, jtm@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização de Automação e Sistemas
Departamento de Engenharia Electrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto
31 de Dezembro de 2012

À minha esposa e minhas filhas.

Agradecimentos

O mestrado foi para mim uma aposta pelo gosto de querer saber e, por isso, uma das decisões importantes da minha vida.

Para isso contribuiu muito o desafio colocado pelo meu orientador, Professor tenreiro Machado, a quem devo o incentivo e apoio que me deu ao longo deste estudo.

Ao ISEP, a possibilidade da realização deste curso e toda a colaboração que tive quando necessitei em momentos críticos.

Quero também agradecer ao meu amigo e colega, Fernando António, o incentivo e ajuda que me deu em determinados momentos críticos que enfrentei durante este estudo. Assim como também a meus amigos e colegas mais próximos que sempre me incentivaram.

Não podia terminar sem expressar o meu profundo agradecimento à minha esposa e minhas filhas que me ajudaram a criar a predisposição psicológica para este estudo com o ambiente harmonioso que sempre souberam proporcionar.

Manuel Boldt

Resumo

A tese tem como objectivo principal a criação de um modelo equivalente eléctrico da rede de nervuras de algumas folhas vegetais e analisar o seu comportamento a estímulos eléctricos, analisando-se também a respectiva resposta em frequência.

A motivação desta tese passa pela observação dos sistemas existentes na natureza. Neste caso, as folhas vegetais e analisar se são sistemas de ordem fraccionária ou não.

Para a sua elaboração, fez-se uma breve abordagem à estrutura das plantas, sob o ponto de vista da botânica e elaborou-se um método de fotografia das amostras, mapeamento da rede de nervuras e medição dos segmentos que compõem essa mesma rede.

A tese termina com um capítulo de resultados experimentais.

Palavras-Chave

Resistência hidráulica, inércia hidráulica, “compliance” hidráulica, modelização, resposta em frequência, ordem fraccionária.

Abstract

The dissertation has as main objective the creation of an electrical equivalent model for the sap network of some vegetal leaves and analysis of its behavior to electrical stimulus as well as its frequency response.

The motivation for this dissertation involves the observation of systems in the natural world, in this particular case the vegetal leaves and analyze if the behavior is of fractional order or not.

To its implementation it was made a brief review to the leaf structure in the biological point of view. It was arranged an image acquisition method for the leaf samples, involving a sap network mapping system and the measurement of the segments for that network.

The dissertation ends with a chapter where experimental results are presented.

Keywords

Hydraulic resistance, hydraulic inertance, hydraulic compliance, modeling, frequency response, fractional order.

Résumé

La thèse a pour objectif principal la création d'un modèle équivalent électrique du réseau de veines de certains légumes feuilles et d'analyser leur comportement à des stimuli électriques, analyse également sa réponse en fréquence.

La motivation de cette thèse est l'observation des systèmes existants dans la nature. Dans ce cas, les légumes à feuilles, et d'analyser si les systèmes sont d'ordre fractionnaire ou non.

Pour sa préparation, a fait une brève approche de la structure des plantes, du point de vue de la botanique et développé une méthode d'échantillons photographie, la cartographie du réseau de veines et de mesure de segments comprenant le même réseau.

La thèse se termine par un chapitre des résultats expérimentaux.

Mots-clés

Résistance hydraulique, Inertance hydraulique, Capacité hydraulique, Réponse en fréquence, ordre fractionnaire.

Índice.

- i. Agradecimentos
 - ii. Resumo
 - iii. Abstract
 - iv. Résumé
 - v. Índice
 - vi. Índice de figuras
 - vii. Índice de tabelas
-
1. Introdução
 - 1.1. Contextualização
 - 1.2. Objectivo
 - 1.3. Calendarização
 - 1.4. Estrutura da dissertação
 2. Breve abordagem da biologia das plantas
 - 2.1. Introdução
 - 2.2. A raíz
 - 2.3. O caule
 - 2.4. A folha
 - 2.4.1. Conceito
 - 2.4.2. Morfologia da folha
 3. Imagem
 - 3.1. Introdução
 - 3.2. Aquisição
 - 3.3. Segmentação
 - 3.4. Estruturação das amostras/Mapeamento
 - 3.5. Medição
 4. Modelização
 - 4.1. Abordagem hidráulica - eléctrica
 - 4.1.1. Resistência hidráulica
 - 4.1.2. Inertância hidráulica
 - 4.1.3. Capacidade/Compliance hidráulica
 - 4.1.4. Modelização das amostras em estudo
 5. Simulação e análise
 - 5.1. Tipos de software de simulação disponível e sua selecção
 - 5.2. Organização dos modelos para análise
 - 5.3. Curvas obtidas por simulação
 6. Análises
 - 6.1. Comportamento dos modelos na zona do joelho da curva
 - 6.2. Visão global da evolução com a complexidade
 7. Conclusão
 8. Referências

Índice de figuras.

Figura 1	Cronologia
Figura 2	Tipos de raízes
Figura 3	Função das raízes
Figura 4	Morfologia do caule
Figura 5	Morfologia do caule
Figura 6	Partes principais da folha
Figura 7	Folhas incompletas
Figura 8	Contorno foliar
Figura 9	Contorno foliar
Figura 10	Base foliar
Figura 11	Ápice foliar
Figura 12	Margem foliar
Figura 13	Subdivisão do limbo
Figura 14	Nervação foliar
Figura 15	Distribuição das folhas no caule
Figura 16	Composição foliar
Figura 17	Recorte de Figura a 200 dpi
Figura 18	Recorte de Figura a 600 dpi
Figura 19	Recorte de Figura a 1200 dpi
Figura 20	Recorte de Figura a 2400 dpi
Figura 21	Factor de ampliação
Figura 22	Separação das nervuras
Figura 23	Marcação de pontos de referência na folha
Figura 24	Comparação das duas fases de segmentação
Figura 25	Processo de contorno das nervuras
Figura 26	Resultado do processo de contorno
Figura 27	Exemplo de recorte de Figura
Figura 28	Marcação de segmentos
Figura 29	Exemplo de mapeamento
Figura 30	Medição de segmentos
Figura 31	Resistência hidráulica
Figura 32	Inertância hidráulica
Figura 33	Inertância hidráulica
Figura 34	Capacidade hidráulica
Figura 35	Modelo do equivalente eléctrico sem fugas
Figura 36	Modelo do equivalente eléctrico com fugas
Figura 37	Folha Citrus Sinensis (Folha de Laranjeira)
Figura 38	Folha Cersis Silliquestrums (Folha de Olaia)
Figura 39	Folha Ficus Carica (Folha de Figueira)
Figura 40	Elementos de Impedância
Figura 41	Mapeamento da rede de impedâncias da folha Citrus Sinensis (Folha de Laranjeira)
Figura 42	Idêntificação de camadas Citrus Sinensis
Figura 43	Modelização da folha Citrus Sinensis (Folha de Laranjeira) sem fugas
Figura 44	Mapeamento da rede de impedâncias da folha Cersis Silliquestrum (Folha de Olaia)

Figura 45	Idêntificação de camadas <i>Cersis Silliquestrum</i>
Figura 46	Modelização da folha <i>Cersis Silliquestrum</i> (Folha de Olaia) sem fugas
Figura 47	Mapeamento da rede de impedâncias da folha <i>Ficus Carica</i> (Folha de Figueira)
Figura 48	Idêntificação de camadas <i>Ficus Carica</i>
Figura 49	Modelização da folha <i>Ficus Carica</i> (Folha de Figueira) sem fugas
Figura 50	<i>Citrus Sinensis</i> Sector 1A
Figura 51	<i>Citrus Sinensis</i> Sector 2A
Figura 52	<i>Citrus Sinensis</i> Sector 3A
Figura 53	<i>Citrus Sinensis</i> Sector 4A
Figura 54	<i>Citrus Sinensis</i> Sector 6C
Figura 55	<i>Cersis Silliquestrum</i> Sector 1A
Figura 56	<i>Cersis Silliquestrum</i> Sector 2
Figura 57	<i>Cersis Silliquestrum</i> Sector 3
Figura 58	<i>Ficus Carica</i> Sector 1A
Figura 59	<i>Ficus Carica</i> Sector 3
Figura 60	<i>Ficus Carica</i> Sector 5
Figura 61	Curvas de circuitos sem fugas (<i>Citrus Sinensis</i>)
Figura 62	Curvas de circuitos com fugas (<i>Citrus Sinensis</i>)
Figura 63	Curva de circuitos sem fugas (<i>Cersis Silliquestrum</i>)
Figura 64	Curva de circuitos com fugas (<i>Cersis Silliquestrum</i>)
Figura 65	Curva de circuitos sem fugas (<i>Ficus Carica</i>)
Figura 66	Curva de circuitos com fugas (<i>Ficus Carica</i>)
Figura 67	Análise de tendência <i>Citrus Sinensis</i> 1A sem fugas
Figura 68	Análise de tendência <i>Citrus Sinensis</i> 2C sem fugas
Figura 69	Análise de tendência <i>Citrus Sinensis</i> 4C sem fugas
Figura 70	Análise de tendência <i>Citrus Sinensis</i> 6C sem fugas
Figura 71	Análise de tendência <i>Citrus Sinensis</i> 1A com fugas
Figura 72	Análise de tendência <i>Citrus Sinensis</i> 2C com fugas
Figura 73	Análise de tendência <i>Citrus Sinensis</i> 4C com fugas
Figura 74	Análise de tendência <i>Citrus Sinensis</i> 6C com fugas
Figura 75	Análise de tendência <i>Cerssis Silliquestrum</i> 1A sem fugas
Figura 76	Análise de tendência <i>Cerssis Silliquestrum</i> 3 sem fugas
Figura 77	Análise de tendência <i>Cerssis Silliquestrum</i> 1A com fugas
Figura 78	Análise de tendência <i>Cerssis Silliquestrum</i> 3 com fugas
Figura 79	Análise de tendência <i>Ficus Carica</i> 1A sem fugas
Figura 80	Análise de tendência <i>Ficus Carica</i> 2 sem fugas
Figura 81	Análise de tendência <i>Ficus Carica</i> 1A com fugas
Figura 82	Análise de tendência <i>Ficus Carica</i> 2 com fugas
Figura 83	Evolução <i>Citrus Sinensis</i> (sem fugas)
Figura 84	Evolução <i>Citrus Sinensis</i> (sem fugas) Vista em pormenor
Figura 85	Evolução <i>Cersis Silliquestrum</i> (sem fugas)
Figura 86	Evolução <i>Cersis Silliquestrum</i> (sem fugas) Vista em pormenor
Figura 87	Evolução <i>Ficus Carica</i> (sem fugas)
Figura 88	Evolução <i>Ficus Carica</i> (sem fugas) Vista em pormenor
Figura 89	Evolução <i>Citrus Sinensis</i> (com fugas)
Figura 90	Evolução <i>Citrus Sinensis</i> (com fugas) Vista em pormenor

Figura 91	Evolução <i>Cersis Silliquestrum</i> (com fugas)
Figura 92	Evolução <i>Cersis Silliquestrum</i> (com fugas) Vista em pormenor
Figura 93	Evolução <i>Ficus Carica</i> (com fugas)
Figura 94	Evolução <i>Ficus Carica</i> (com fugas) Vista em pormenor

Índice de tabelas.

Tabela 1	Comparação Resolução – tempo de digitalização e tamanho
Tabela 2	Características da folha Citrus Sinensis (Folha de Laranjeira)
Tabela 3	Características da folha Cersis Silliquestrum (Folha de Olaia)
Tabela 4	Características da folha Ficus Carica (Folha de Figueira)
Tabela 5	Divisão do circuito Citrus Sinensis
Tabela 6	Divisão do circuito Cersis Silliquestrum
Tabela 7	Divisão do circuito Ficus Carica
Tabela 8	Observação de resultados Citrus Sinensis (sem fugas)
Tabela 9	Observação de resultados Citrus Sinensis (com fugas)
Tabela 10	Observação de resultados Cersis Silliquestrum (sem fugas)
Tabela 11	Observação de resultados Cersis Silliquestrum (com fugas)
Tabela 12	Observação de resultados Ficus Carica (sem fugas)
Tabela 13	Observação de resultados Ficus Carica (com fugas)
Tabela 14	Resultados da análise de tendência Citrus Sinensis (Sem fugas)
Tabela 15	Resultados da análise de tendência Citrus Sinensis (com fugas)
Tabela 16	Resultados análise de tendência Cersis Silliquestrum, (sem fugas)
Tabela 17	Resultados análise de tendência Cersis Silliquestrum (com fugas)
Tabela 18	Resultados análise de tendência Ficus Carica (sem fugas)
Tabela 19	Resultados análise de tendência Cersis Silliquestrum 1B (sem fugas)

Capítulo 1

1 Introdução.

Este estudo tem por objectivo observar a rede de nervuras de folhas vegetais de tipos diferentes e determinar se formam sistemas de ordem fraccionária ou não.

Para a realização deste estudo fez-se uma resumida abordagem teórica na área da biologia das plantas, para assim se poder ter uma melhor ideia da sua diversificação, metodologia e classificação.

As amostras são digitalizadas, a partir das imagens obtidas analisa-se a sua rede de nervuras, efectuando-se um mapeamento dos ramos a serem considerados para o modelo a estudar e a partir desse mapeamento efectuam-se as medições dos respectivos segmentos.

Cada um desses segmentos dará origem a um elemento de equivalente eléctrico de impedância que formará um circuito equivalente á rede hidráulica considerada, ao qual, através de programa de simulação de circuitos se analisará a sua resposta em frequência e respectivo comportamento.

1.1 Contextualização.

Este trabalho resulta de um desejo de realizar um estudo mais direccionado no âmbito da modelização de sistemas, aliado ao desafio proposto pelo meu orientador, de algo menos convencional, baseado no comportamento de sistemas vegetais, procurando relacionar a estrutura hidráulica das nervuras de folhas vegetais, com a rede de impedância eléctrica procurando determinar a natureza desse comportamento e suas características e sua respectiva tendência.

Este estudo tomou como fundamento os trabalhos publicados por "Clara Ionescu e J. Tenreiro Machado, com o título, Mechanical Properties and impedance of the branching network of the sapping system in leaf of *Hidrangea Macrophila*.

Este estudo faz a equivalência do modelo hidráulico de algumas amostras de folhas vegetais com o seu análogo eléctrico, introduzindo-se neste estudo também as componentes de fugas inerentes aos respectivos modelos.

1.2 Objectivo.

O objectivo deste estudo visa a implementação de um processo de discriminação das estruturas de nervuras das folhas vegetais, principalmente das mais evidentes, a partir do qual se procederá a um mapeamento das mesmas, evidenciando-as, para deste modo se criar um modelo físico dessas estruturas.

Utilizando os respectivos modelos físicos, pretende-se através de processos de simulação, identificar e conhecer o comportamento desses mesmos modelos e respectivas tendências, tentando identificar se obedecem a ordem inteira ou a ordem fraccionaria.

1.3 Calendarização.

Para realização deste estudo, houve necessidade de efectuar pesquisas em temas diversos, tais como imagem, processamento e segmentação, modelização de sistemas físicos em particular em sistemas hidráulicos e sua analogia com o seu equivalente eléctrico. Este estudo teve como fundamento a seguinte metodologia:

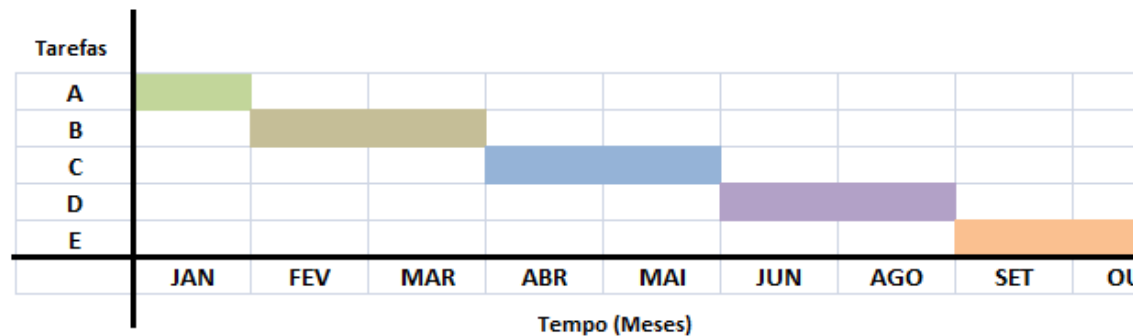


Figura 1 Cronologia

- A - Pesquisa de processos de aquisição de imagem adequados para a situação.
- B - Segmentação e pesquisa de um processo de evidenciação das folhas vegetais.
- C - Mapeamento e modelização das amostras.
- D - Implementação dos modelos e sua simulação.
- E - Análise e conclusões.

1.4 Estrutura da dissertação.

Esta dissertação tem como estrutura o seguinte modelo.

O capítulo 2 faz uma abordagem sumaria a classificação e estruturação das plantas, com particular interesse na folha, no respeitante a sua classificação e caracterização, com particular interesse no que diz respeito aos tipos de nervação.

O capítulo 3 tem como assunto, a imagem e temas que são necessários para a implementação deste estudo, como sejam, o método de aquisição a ser adoptado, a segmentação da imagem e sua importância no contexto deste estudo, medição sobre a imagem método de mapeamento e estruturação das amostras adoptado.

O capítulo 4 aborda o tema da modelização, em particular no âmbito deste estudo, que concerne a implementação de um modelo eléctrico equivalente ao seu similar hidráulico.

No capítulo 5 abordam-se os tipos de *software* existentes para simulação de circuitos eléctricos, efectua-se as simulações, a análise das amostras e explica-se a metodologia utilizada para organização dos modelos sujeitos a estudo, apresentando-se as respectivas leituras e gráficos gerados.

Por último, o capítulo 6 apresenta os resultados e análises das simulações efectuadas às amostras sujeitas a este estudo e respectivas conclusões.

Capítulo 2

2 Breve abordagem da biologia das plantas

2.1 Introdução

Para a realização deste estudo, sobre modelização das folhas vegetais, pensa-se ser importante fazer uma abordagem sobre o ponto de vista teórico á constituição das plantas na sua vertente biológica. Principalmente focalizada na morfologia da folha, esta componente da planta é o objecto deste estudo. Assim, será feita uma abordagem mais sumária à raiz e ao caule, fazendo-se uma descrição mais minuciosa da folha. Não se irá abordar a flor por não ser necessária para este estudo e para não alongar demasiado este capítulo.

2.2 A Raiz

O conceito que se pode fazer da raiz é esta ser a parte do eixo vegetal desprovido de folhas e das suas ramificações. Geralmente não apresentam clorofila, são adaptadas às funções de fixação e absorção de água e sais minerais em solução. A raiz também executa a função de acumulação de substâncias de reserva.

Pode-se classificar a raiz sob diversos aspectos, como sejam a origem, o meio onde se desenvolvem e a sua função.

Quanto á origem, as raízes podem ser normais, se o seu desenvolvimento se faz partir da radícula do embrião. Ou adventícias, se o seu desenvolvimento se faz partir do caule ou das folhas.

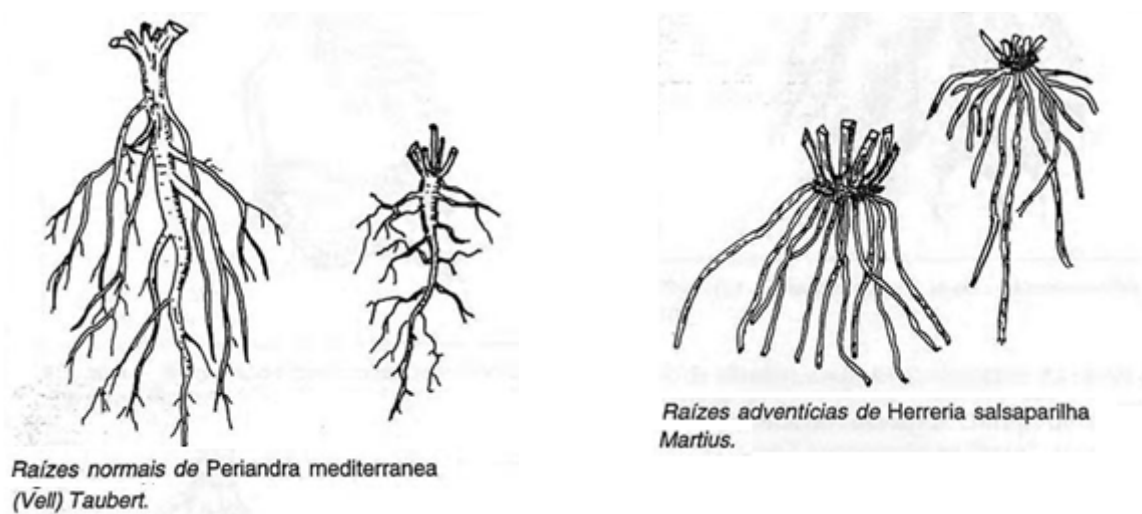


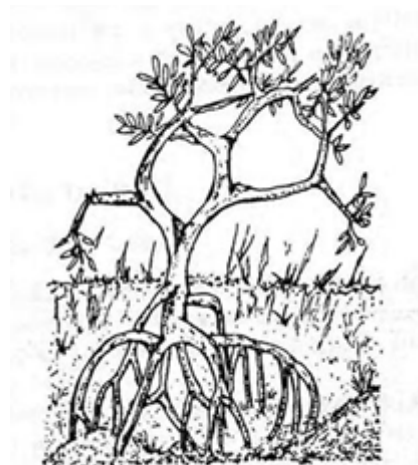
Figura 2 a) Tipo de Raízes

Relativamente ao meio onde se desenvolvem, as raízes podem ser terrestres, o seu desenvolvimento processa-se sob o solo, aéreas, o seu desenvolvimento acontece sobre o solo ou aquáticas, desenvolvendo-se em meio aquático.

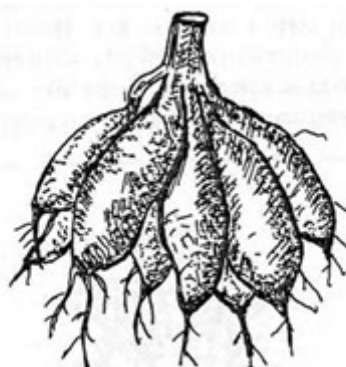
No que concerne à função, ela pode ser de reserva, fixadoras, suportes, respiratórias ou tubulares.



Raízes fixadoras grampiformes de Hederá helix L.



Raízes escoras de Rhizophora sp.



Raízes tuberosas de adália-de-jardim (Dahlia sp.).

Figura 3 Função das raízes

2.3 O caule

O conceito que se pode ter para o caule é o facto de este ser o órgão portador de folhas e das suas possíveis modificações. Incluindo estruturas reprodutivas, estabelecendo ligações entre estas partes e as raízes. Na maioria dos vegetais, o caule é inteiramente aéreo, existindo caules subterrâneos e caules aquáticos.

A função fundamental do caule é a de suportar as folhas, flores e frutos, podendo exercer ainda outras funções. Tais como:

A reserva de nutrientes e de água, como por exemplo os tubérculos.

A propagação vegetativa, diversos tipos de caules portadores de gemas.

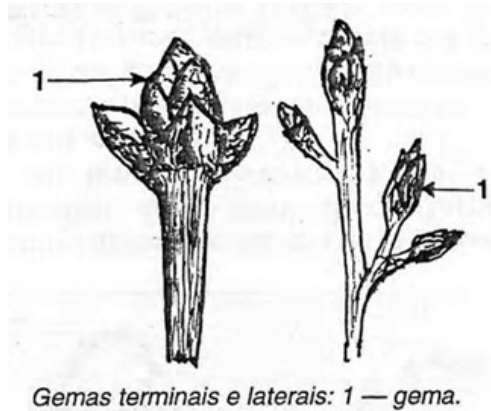
Síntese de substâncias.

Resistência contra altas e baixas temperaturas, bem como queimaduras, como por exemplo o rizoma, troncos com súber muito desenvolvido.

A origem do caule é proveniente de parte do desenvolvimento do embrião contido nas sementes. O embrião basicamente é constituído de radícula, caulículo, cotilédones e gêmula.

Da morfologia externa do caule, fazem parte as gemas, os nós, entrenós e as folhas.

As gemas são regiões merismáticas protegidas por primórdios foliares ou por escamas localizadas em diversos pontos do caule. As gemas podem-se classificar em gemas terminais, aquelas que ocorrem no ápice foliar e gemas laterais, aquelas que ocorrem em axilas de folhas.



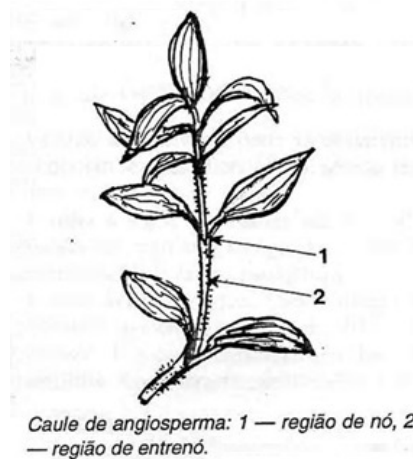
Gemas terminais e laterais: 1 — gema.

Figura 4 Morfologia do caule

Os nós são regiões do caule onde ocorre a inserção das folhas nestas regiões ocorrem também gemas axilares.

Os entrenós são regiões localizadas entre dois nós consecutivos.

As folhas são expansões laterais do caule.



Caule de angiosperma: 1 — região de nó, 2 — região de entrenó.

Figura 5 Morfologia do caule

O caule pode ser classificado sob vários aspectos, quanto á forma, no que concerne ao porte, quantidade de tecidos lenhosos, quanto ao ambiente onde se desenvolvem e quanto á função.

Relativamente á forma, o caule pode ser cilíndrico quando a sua secção transversal é aproximadamente circular. Ou prismáticos quando a sua secção transversal assume contorno obtuso ou poligonal.

No que concerne ao porte e tecidos lenhificados, o caule pode ser herbáceo, trata-se de um caule contendo pouco material lenhificado, apresenta geralmente uma coloração esverdeada e dotado de flexibilidade.

Pode ser arbustivo, trata-se de caules lenhosos e ramificados, frequentemente divididos desde a base e não ultrapassando muito três metros de altura.

Pode ainda ser arbóreo, sendo um caule geralmente bastante lenhificado, alcançando dimensões consideráveis entre três e muitos metros de altura. A parte basal deste caule,

geralmente indivisa, formando o tronco e ocorrendo na sua parte superior divisões que vão originar a copa.

Relativamente ao ambiente onde se desenvolvem, os caules podem ser aéreos, subterrâneos e aquáticos.

Os caules aéreos podem ainda ser agrupados em caules erectos, caules trepadores e caules rastejantes. Podendo ainda os caules rastejantes serem agrupados em dois tipos. Estolho e sarmento.

Os caules subterrâneos podem ser classificados em três tipos. Rizomas, tubérculos, bolbos tunicados, bolbos escamosos e bolbos sólidos ou cheios.

Os caules aquáticos são todos aqueles que se desenvolvem em meio aquoso.

A função principal do caule é de suporte mecânico das folhas e dos órgãos produtivos bem como o transporte das seivas entre estes órgãos e as raízes.

Alguns tipos de caules sofrem modificações adaptando-se ao desempenho de outros tipos de função.

Com base nestes critérios e no respeitante á função, os caules podem ser classificados em três tipos. Caules adaptados á função de assimilação, caules adaptados á função de reprodução e caules adaptados á função de reserva.

2.4 A folha

As folhas são órgãos da planta especializadas na captação de luz e trocas gasosas com a atmosfera para realizar a fotossíntese e respiração. Salvo raras exceções, associadas a plantas de climas áridos, as plantas tendem a maximizar a superfície em relação ao volume de modo a aumentar tanto a área da planta exposta á luz, quanto a área da planta onde as trocas gasosas são possíveis por estar exposta á atmosfera.

2.4.1 Conceito

As folhas aparecem agarradas ao caule, formando apêndices laminares deste, tem normalmente clorofila e apresentam geralmente crescimento limitado.

Quando a folha está completa é constituída de peça laminar á qual se chama limbo, de parte estreita e geralmente subcilíndrica, denominada pecíolo e de parte basal que pode ser provida de estípulas e de bainhas.

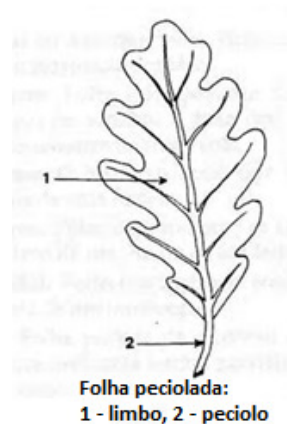


Figura 6 Partes principais da folha

As estípulas são formações laminares, quase sempre em número de duas que aparecem na base foliar. As bainhas correspondem a bases foliares alargadas que envolvem total ou parcialmente o caule.

A folha tem origem no embrião, em especial, a gémula do embrião é o ponto de origem das primeiras folhas do vegetal. As folhas subsequentes originam-se como expansões laterais exógenas dos caules.

2.4.2 Morfologia da folha

A folha pode ser completa ou incompleta. Devendo no primeiro caso considerar-se três partes nos estudos morfológicos da mesma, que são o limbo, pecíolo ou a base foliar.

No segundo caso falta o pecíolo ou a base foliar, pode ser provida ou não de bainha ou estípulas.

Quando uma folha não possui pecíolo esta é denominada de folha sésstil. Quando a folha não possui pecíolo e o limbo foliar envolve completamente o caule é denominado de amplexicaule.

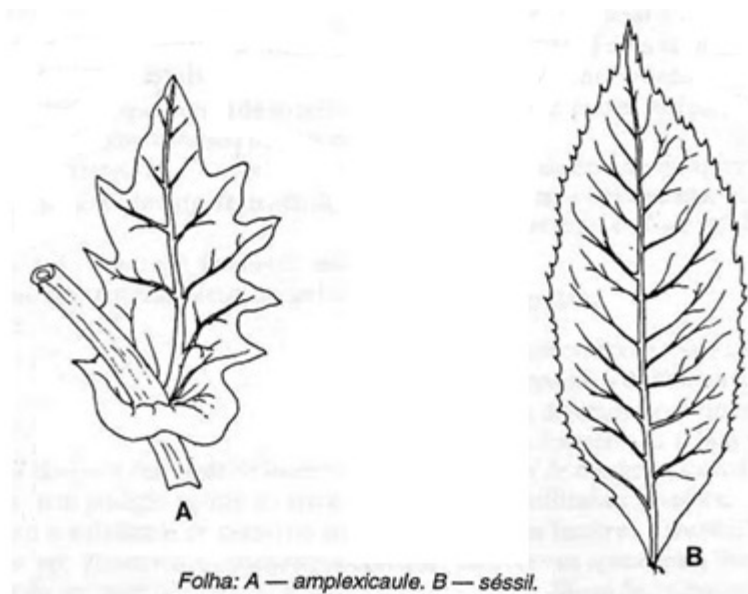


Figura 7 Folhas incompletas

O limbo foliar ou a folha propriamente dita corresponde á expansão laminar, de côr normalmente verde onde se observam duas faces. Pode-se estudar o limbo foliar levando-se em consideração as seguintes características.

A forma da folha, da qual pode ser considerado o contorno, a base, o ápice e a margem. Pode-se subdividir o limbo em nervação, decorre da distribuição das mesmas pela superfície da folha, coloração que exhibe, consistência e superfície.

O Contorno foliar é considerado como uma linha imaginária que liga os pontos extremos da lâmina foliar. Na natureza, as folhas apresentam contornos variados os quais se apresentam nas figuras 7 e 8, apresentadas na página seguinte.

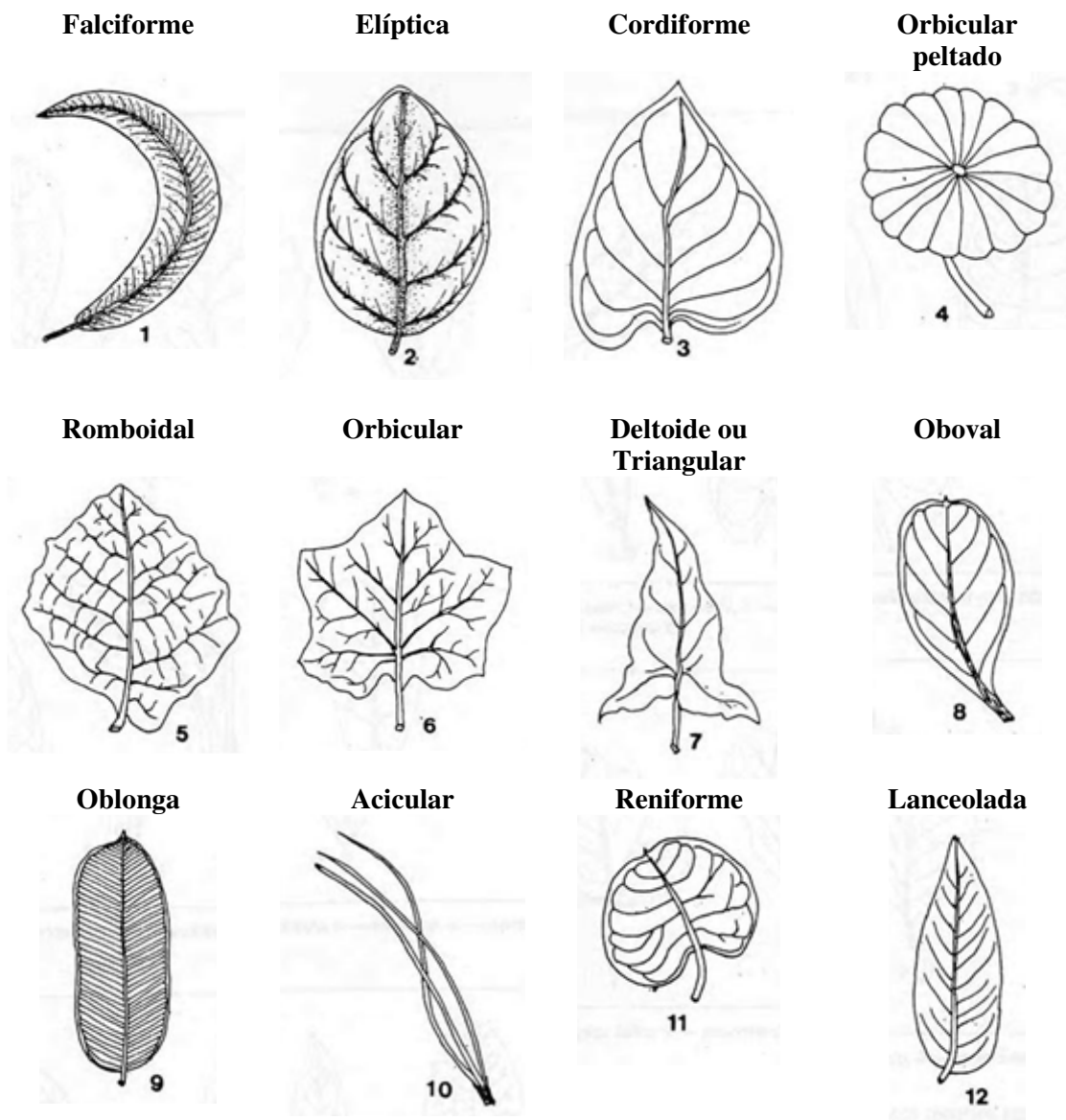


Figura 8 Contorno foliar

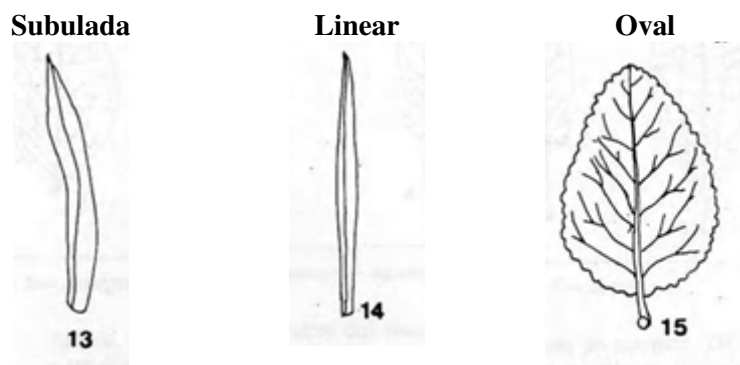


Figura 9 Contorno foliar

A base é uma porção da lâmina foliar onde se insere o pecíolo. Normalmente, este tem posição oposta ao ápice. Em conformidade com a existência de plano de simetria e assimétrica segundo a forma, pode apresentar os seguintes tipos, conforme se ilustra na figura abaixo.

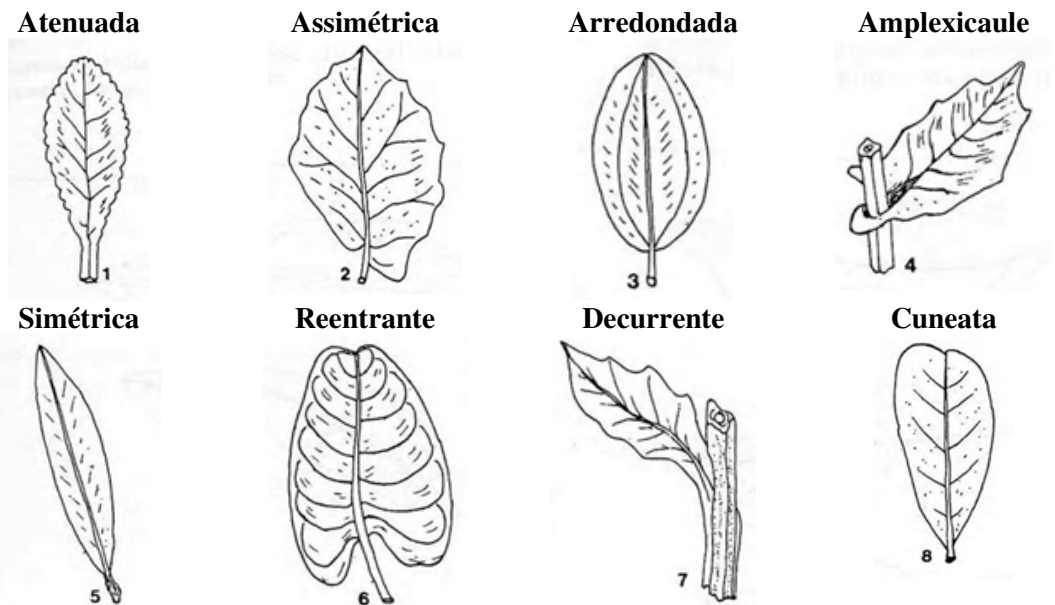


Figura 10 Base foliar

O ápice foliar é a parte mais externa da folha, ou seja, a sua parte mais terminal. O ápice da folha apresenta variações. Assim, alguns dos principais ápices são ilustrados na figura seguinte.

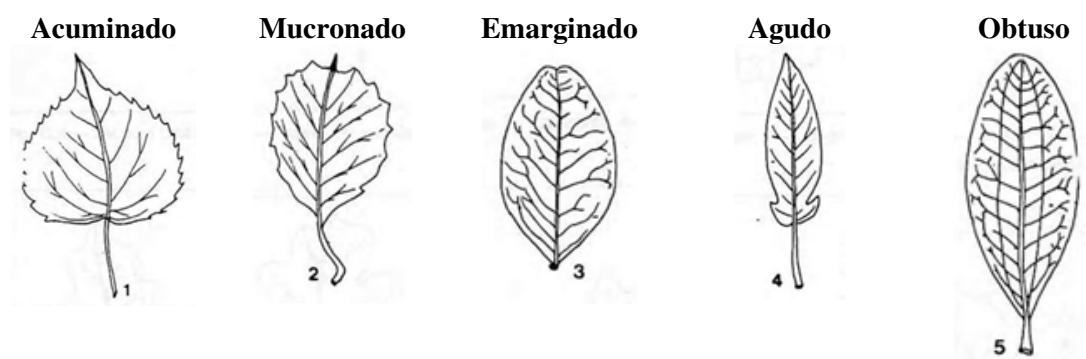


Figura 11 Ápice foliar

A margem foliar corresponde ao limite externo, periférico da lâmina foliar. Em conformidade com os diversos tipos de recortes que podem aparecer nas margens, as folhas são denominadas de acordo com o recorte que apresentam, conforme a figura 11 ilustra.

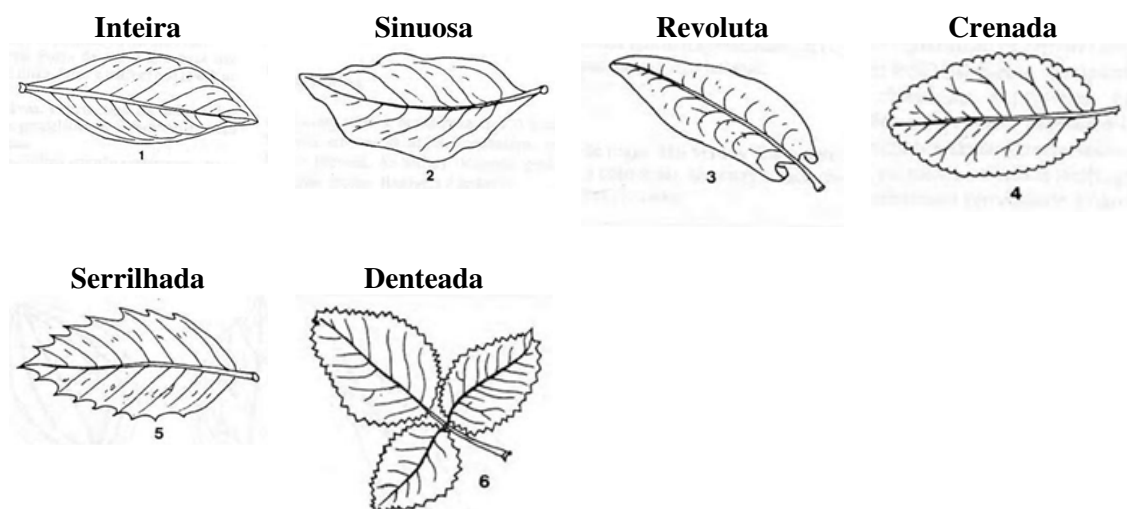


Figura 12 Margem foliar

A superfície do limbo pode apresentar-se sem recortes, com recortes pequenos, recortes muito profundos. Além dos recortes da margem, de acordo com estas características o limbo pode ter as formas que se apresentam na figura 12.

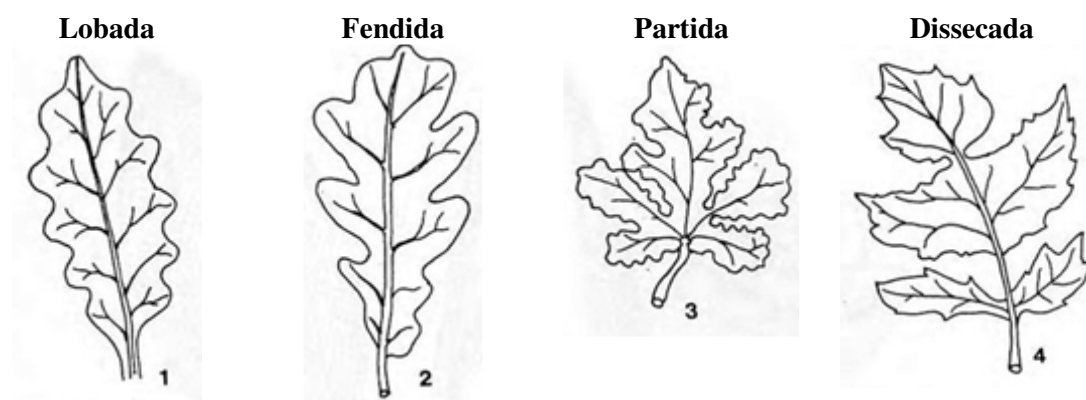


Figura 13 Subdivisão do limbo

As folhas apresentam diferentes tipos de nervação. Observando-se o limbo foliar, especialmente a sua face inferior nota-se que ele é percorrido por finos cordões denominados nervuras. Chama-se nervação á disposição apresentada pelas nervuras da folha. Os principais tipos de nervação são ilustrados na figura 13.

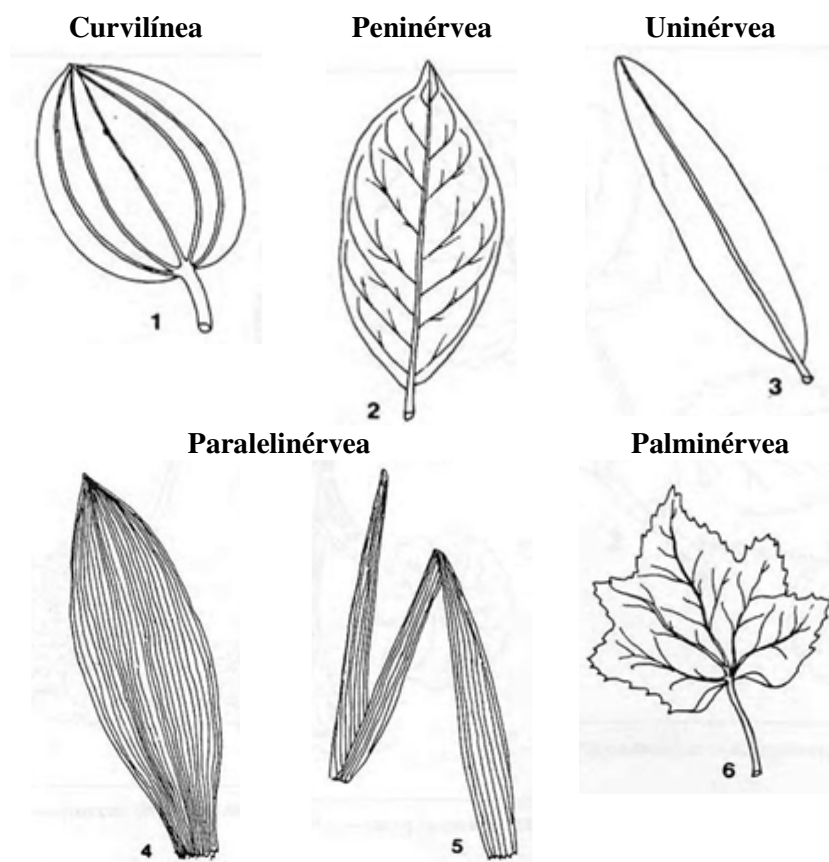


Figura 14 Nervação Foliar

As folhas normalmente apresentam coloração verde. No que diz respeito á coloração, devem ser mencionados os seguintes tipos:

Folhas concolores, apresentam a mesma tonalidade igual em ambas as faces.

Folhas bicolores, as suas faces tem tonalidades diferentes.

Folhas variegadas, apresentam zonas de coloração diferentes.

Designa-se por consistência da folha a resistência que o limbo foliar apresenta em certas acções mecânicas tais como, a flexão e a pressão. De um modo geral podem ser classificadas em quatro categorias:

Duras; moles; flexíveis e friáveis.

Quanto á superfície do limbo foliar varia muito de folha para folha. Certas características da superfície apresentam importância na identificação da folha. A superfície foliar pode assim ser classificada de acordo com o tacto e a visão. Assim, de acordo com o tacto, podem ser:

Lisas; ásperas; verrucosas; sedosas; lanudas; tomentosas.

De acordo com a visão, podem ser:

Glabras; pubescentes; rugosas; onduladas; luzidias.

Denomina-se por pecíolo foliar o pedúnculo que liga a lâmina foliar ao caule. Este pedúnculo pode-se inserir na margem foliar ou não.

Quando o pecíolo se insere á margem foliar, é denominado lateral. Quando se insere no centro da lâmina foliar, a folha é denominada peltada.

O pecíolo pode assumir diversos tipos de aspecto, tais como:

Recto; curvo; torcido; achatado.

O aspecto da secção transversal do pecíolo também apresenta importância e podem ter secções dos seguintes tipos:

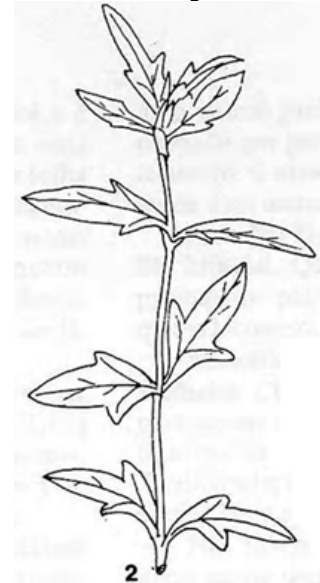
Circular; Poligonal; côncava; biconvexa; oval.

A disposição das folhas sobre o caule é tema importante e o estudo da sua distribuição tem o nome de filotaxia. De acordo com esse estudo, as folhas podem ser do tipo representado na Figura 14.

Folhas Verticiladas



Folhas Opostas



Folhas Alternas

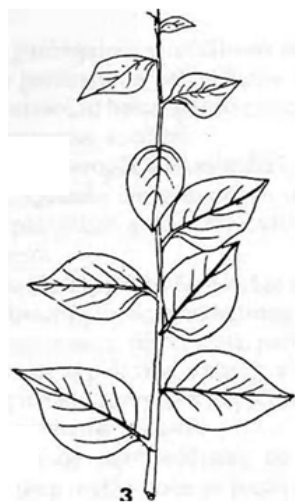


Figura 15 Distribuição das folhas no caule

Quanto ao tempo de duração das folhas, este varia de conformidade com a espécie vegetal a que pertence. Assim, sobre este aspecto, as folhas podem ser persistentes e neste caso apresentam uma duração maior, podendo permanecer até mais de um ano no vegetal. Ou caducas e neste caso caem em certa altura do ano, deixando o vegetal despido, sem folhas.

A composição foliar classifica as folhas quanto ao facto de possuírem apenas um limbo ou mais do que um. Assim, são classificadas nos seguintes grupos:

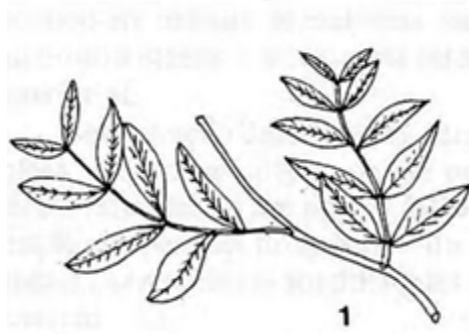
Folhas simples aquelas que só possuem um limbo.

Compostas aquelas que possuem mais do que um limbo, estes passam a chamar-se de folíolos, todos eles presos ao pecíolo indiviso.

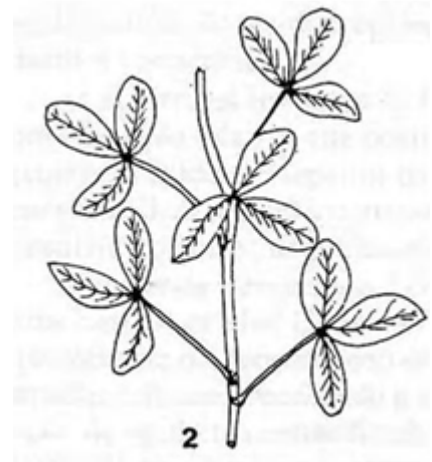
Recompostas, portadoras de vários folíolos presos ao pecíolo ramificado.

A Figura seguinte ilustra exemplos destes tipos de folhas.

Folha Paripenada



Folha Trifoliada



**Folha Imparipenada
(imparipenada)**



Folha Palmada

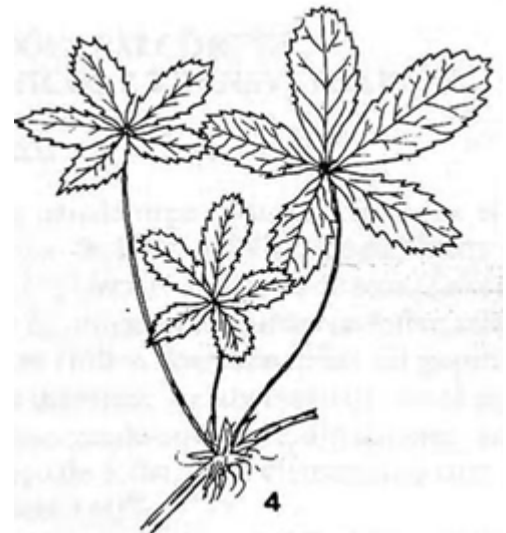


Figura 16 Composição foliar

Capítulo 3

3 Imagem

3.1 Introdução

A visão é talvez um dos fenómenos mais complexos e ao mesmo tempo de grande beleza. A possibilidade de podermos perceber objectos, perceber ou interpretar as suas formas, inferir as suas dimensões e distâncias relativas, distinguir a sua coloração, dá-nos vantagens na nossa interacção com o mundo exterior

As imagens são formadas por estímulos luminosos provenientes da reflexão da luz nos objectos. As nuances de cor, sombreamentos e texturas são constituídas por diferentes intensidades e fases da luz.

3.2 Aquisição

A aquisição de imagens é fundamentalmente um processo pela qual se registam e guardam as imagens para as rever noutra ocasião. De uma forma simplista, um dos métodos de aquisição mais vulgares e mais antigo é efectuado pelo nosso cérebro, utilizando a nossa memória. Conseguimos recordar imagens que memorizamos noutros momentos após ter ocorrido determinada cena. Este método embora eficaz, depende da nossa capacidade de memória, da selectividade do nosso consciente, ou subconsciente, mas não serve todos os propósitos. Se pretendemos transmitir uma imagem a alguém temos de a descrever com palavras, o que leva tempo e pode não ser tão exacto, depende do comunicador, se descreve essa imagem mais pormenorizadamente ou a descreve mais sumariamente. Depende também do receptor que dá a sua própria interpretação através de detalhes que para ele possam ser mais importantes ou não. Depende do objectivo pela qual se pretende transmitir a imagem, se é necessário descrever a cena com detalhe ou se pelo contrário apenas importa dar alguma informação sobre a mesma.

Através dos tempos o ser humano tem evoluído técnicas de modo a poder tornar mais simples determinadas tarefas, adaptando-as às suas necessidades. Assim, relativamente à imagem, o desenho seria logo de imediato uma forma de adquirir imagens que ficam registadas para voltarem a ser vistas noutras ocasiões, sem o perigo de serem alteradas, a não ser que alguém o faça de forma propositada.

Desde as pinturas rupestres deixadas pelos nossos antepassados pré-históricos, passando pelas pinturas deixadas durante o período da história clássica, até aos grandes pintores clássicos das várias épocas da história, temos descrições que nos possibilitam ter uma ideia de registo de momentos e inferir sobre o modo de vida dos nossos antepassados. Tudo isto através de registos de imagens que nos foram deixados e que são não mais do que uma forma de aquisição de imagens obtidas de forma manual que pela sua dificuldade, complexidade e pessoalidade se tornaram uma arte.

Embora preciso, este método de aquisição de imagem tem um problema que reside no tempo que demora para se obter. Um esboço pode levar de uns poucos segundos a uns minutos dependendo da destreza do desenhador. Uma pintura pode levar dias ou semanas. Dependendo também da destreza do executante. Neste processo, a memória ou as imagens que adquirimos no nosso cérebro também são importantes.

A evolução da ciência e tecnologia, mais precisamente, o estudo da luz e dos fenómenos luminosos, levou-nos à descoberta da “*pinhole*”. Este é um dispositivo simples, constituído por uma caixa fechada, as suas paredes internas pintadas a preto, para evitar a reflexão da luz. Numa das faces tinha um orifício muito pequeno e a sua

face oposta podia ser constituída por um material translúcido, onde era formada a imagem.

Este dispositivo serviu como ajuda para desenho, mais tarde, com a descoberta dos processos fotoquímicos, foi colocada uma placa fotográfica, dando assim origem á fotografia.

Foi o aperfeiçoamento deste dispositivo com a introdução de sistemas ópticos aplicados no orifício onde entra a luz, para amplificar e obter um melhor rendimento luminoso na imagem de forma a se poder obter melhores imagens, a substituição da placa translúcida por película fotográfica a que levou á câmara fotográfica que hoje conhecemos.

Este foi verdadeiramente o primeiro sistema de armazenamento e arquivo de imagens, que revolucionou o mundo. Tanto na fotografia como no cinema.

Versões tecnicamente mais elaboradas e pequenas da câmara fotográfica levaram a uma evolução fantástica em áreas como a documentação tanto para fins de lazer, como informativos de diversas áreas, muito particularmente na investigação científica.

É para nós comum os álbuns de fotografia de família, onde podemos lembrar os nossos avós, ou os documentários cinematográficos onde podemos rever registos de acontecimentos passados.

Até cerca de finais da década dos anos 70 a câmara fotográfica de filme teve uma enorme evolução e aperfeiçoamento. A evolução da electrónica, principalmente da electrónica digital com a cada vez maior integração de sistemas, deu origem às câmaras digitais. Primeiro para fins profissionais e científicos, depois alargadas á área de recreio e lazer, hoje tão bem conhecidas e comuns que até integram em dispositivos tais como telemóveis, tornando assim possível a qualquer pessoa registar imagens muito facilmente.

O método de aquisição utilizado neste estudo não exige câmaras muito sofisticadas, dadas as características das imagens que se pretendem obter neste estudo, é importante ter uma imagem de boa qualidade e resolução mas não ter ficheiros de imagens muito pesados para aliviar a sua carga durante o processamento subsequente.

Para este estudo as imagens a obter são provenientes de folhas vegetais e o objecto é fotografado em condições estáticas. As amostras a tratar serão recolhidas da natureza e então fotografadas em ambiente controlado.

Para esta finalidade pensou-se em utilizar um *scanner* onde a folha pode ser espalmada e fotografada. A informação que nos interessa extrair destas imagens é a sua rede de nervuras.

Por outro lado, o *scanner* torna a operação de medição na imagem mais simples, pois estando a digitalizar uma das faces não há aqui efeito de perspectiva sobre a imagem o qual, teria de ser tomado em consideração se fizéssemos a aquisição com uma câmara fotográfica. Tendo sido necessário para isso fazer a calibração dessa mesma câmara. Pelo exposto, o *scanner* serve os propósitos deste estudo.

Foi necessário efectuar alguns testes de aquisição de imagens para definir qual a parametrização a utilizar neste processo. Assim, foram efectuadas digitalizações numa amostra variando a resolução.

Verificou-se que o aumento da resolução aumenta também o detalhe da informação contida na imagem, pois havendo mais pontos para representar um objecto o detalhe com que este é visualizado é maior e a imagem também mais compacta e consistente.

As imagens seguintes apresentam amostras com resoluções diferentes, 200 dpi, 600 dpi, 1200 dpi e 2400 dpi, como se pode verificar o aumento de resolução traduz-se

numa imagem de maior tamanho mas também se visualizam melhor as nervuras mais pequenas e finas.



Figura 17 Recorte de imagem a 200 dpi

Verifica-se da imagem de 200 dpi para a imagem de 600 dpi uma melhor discriminação das nervuras mais finas e deixa-se adivinhar uma rede de nervuras mais pequenas que se distribuem por toda a área da folha, enquanto na imagem de 200 dpi essa rede parece ruído. Para abarcarmos quase a mesma área da imagem anterior tivemos de cortar uma área maior.



Figura 18 Recorte de imagem a 600 dpi

Da imagem anterior a 600 dpi, para a imagem seguinte, a 1200 dpi o detalhe é ainda maior como se pode observar na imagem seguinte e mais nítidas as nervuras mais pequenas que formam uma rede por toda a área da folha.



Figura 19 Recorte de imagem a 1200 dpi

Para a imagem seguinte a 2400 dpi o detalhe é ainda maior, mas, por outro lado esta imagem também é mais pesada para determinado tipo de processamento.



Figura 20 Recorte de imagem a 2400 dpi

A imagem a 2400 dpi não foi possível abrir no *paintbrush* conforme já se referiu. A forma de a conseguir representar foi através do *irfanview*, recortar uma área e copia-la para o *paintbrush*. Não se sabe se manteve as mesmas características de ampliação com esta operação, mas serviu apenas para visualizar.

Ótimo seria optar pelas imagens com o máximo de resolução possível que a máquina possa oferecer. Mas, condicionantes de outra ordem, tais como o tempo necessário para digitalizar a imagem, o tamanho do ficheiro dessas imagens levam-nos a utilizar um valor de resolução em que o compromisso tempo de digitalização/tamanho do ficheiro seja otimizado para o fim em vista.

A lista abaixo ilustra as diferenças em tamanho e tempo de aquisição de cada uma dessas imagens.

Imagem	DPI	Tamanho (MByte)	Tempo (min)
Dpi 200	200	1.3	1
Dpi 600	600	6.4	3
Dpi 1200	1200	39.1	5
Dpi 2400	2400	98	13
Dpi 4800	4800	307	30

Tabela 1 Comparação Resolução – tempo de digitalização e tamanho

Como se observa, quanto maior a resolução da imagem maior será o detalhe mas, também demorará mais tempo a digitalizar e mais pesado será o ficheiro gerado. Como as imagens a adquirir são estáticas e são poucas, o factor tempo não é muito preocupante. Já o tamanho da imagem não pesa muito em relação aos meios de armazenamento actuais, pesa mais no processamento que dela possa vir a ser necessário efectuar com as ferramentas que se dispõem para este estudo.

Verificou-se que as imagens mais pesadas, a partir de 2400 dpi não podiam ser abertas no *paintbrush*, embora se consiga abrir com outros softwares de imagem, tal como o *irfanview*. Por outro lado, abrir estas imagens com a versão de *matlab* 6.0, que se está a

utilizar para este estudo iria ser problemático no que concerne tempo de processamento e eventuais erros que poderiam ser gerados durante este.

Pela razão de o *matlab* e *paintbrush* serem ferramentas que serão utilizadas neste estudo, optou-se por utilizar uma resolução de 600 dpi a qual, serve a finalidade a que se destina.

A razão por que se irá utilizar o *paintbrush* em vez do *irfanview* que é um programa melhor para imagem, relaciona-se com dois aspectos. O primeiro tem a ver com a imagem apresentada no ecrã depois de aberta em cada um destes programas. O *irfanview* ajusta a imagem ao ecrã, o *paintbrush* não e neste caso pretende-se que a imagem abra no seu tamanho normal. O outro aspecto tem a ver com a possibilidade de podermos desenhar gráficos sobre a imagem, tais como segmentos de rectas, neste caso, podermos medir de uma forma prática e simples esses mesmos segmentos de recta.

Existe outro parâmetro que define as imagens que são armazenadas e que se relaciona com o formato do ficheiro de arquivo. Existem vários formatos para arquivo de imagens. Uns de maior qualidade e como é lógico ocupam maior espaço, outros com compressão de informação que ocupam menor espaço. Para este estudo convencionou-se utilizar o formato (PNG – *Portable Network Graphics*).

A razão de ampliação deste *scanner*, para a resolução de 600 dpi, que será utilizada nas imagens digitalizadas para este estudo foi definido da seguinte forma.

Digitalizou-se uma folha de papel milimétrico sujeita às mesmas condições daquela em que as imagens serão adquiridas e efectuaram-se medições, utilizando para isso o *paintbrush*. A figura 20 exemplifica as medições que se efectuaram sobre a folha de papel milimétrico.

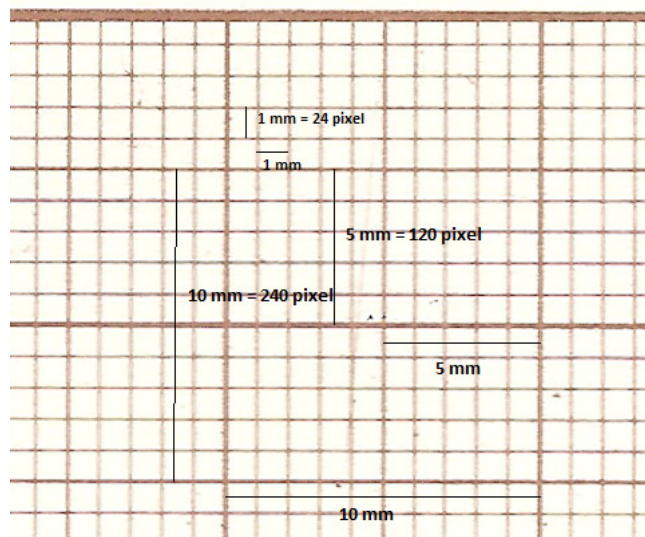


Figura 21 Factor de Ampliação

As medições efectuadas dão para a ampliação um factor de 1/24, ou seja:

$$X_{(mm)} = \frac{1}{24} p_{(pixel)}$$

Este factor foi verificado em algumas folhas e verificou-se estar bastante aproximado. Desta forma o *paintbrush* pode ser utilizado também nas medições que se tiver de efectuar sobre estas imagens.

3.3 Segmentação

Inicialmente pensou-se em encontrar um processo mais ou menos automático, recorrendo ao *matlab* para tentar gerar uma imagem derivada da original evidenciando as nervuras das folhas, pelo menos aquelas que se pretendiam utilizar na modelização dessa amostra.

Salvo raras excepções, as folhas vegetais são fundamentalmente verdes, a não ser quando chegam ao outono e ficam amarelcidas e caem para no ciclo seguinte dar origem a novas folhas.

Na imagem a seguir apresenta-se um exemplo de uma folha e o resultado da sua segmentação utilizando rotinas construídas em *Matlab*.

Imagem original

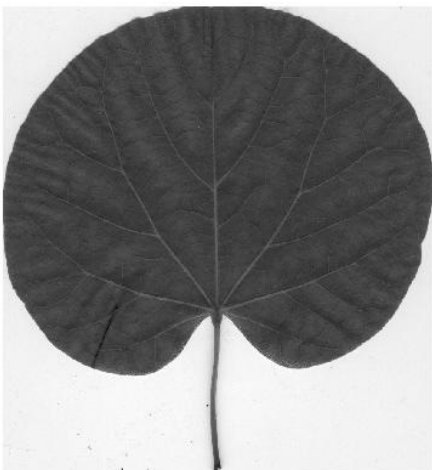


Imagem segmentada, primeira fase

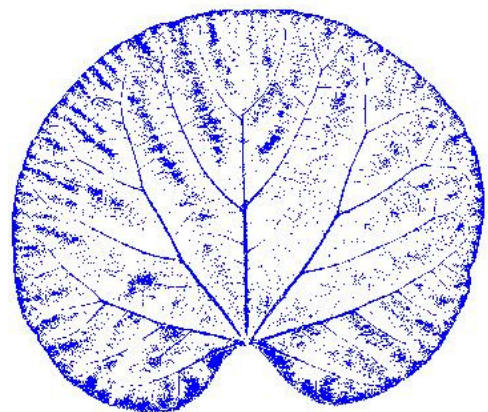


Figura 22 Separação das nervuras

Verifica-se que a folha tem praticamente em toda a sua superfície uma tonalidade verde, salientando-se as nervuras por uma tonalidade de verde diferente, mais claro ou mais escuro, conforme o tipo de folha. Verifica-se a existência de pigmentos cuja tonalidade é próxima daquela que é apresentada pelas nervuras. Estes pixéis estão dispersos por toda a superfície da folha, iludem no processo de segmentação e criam pixéis de ruído em toda a sua extensão. Esse efeito pode ser verificado na imagem segmentada apresentada acima.

Para implementar um processo de segmentação que funcione de forma autónoma, teria de se limpar todo o ruído envolvente e retirar o contorno da folha. Um dos processos de remoção desse ruído, passaria por apagar manualmente os pixéis indesejáveis. Embora sendo o mais simples, será também o mais trabalhoso. Se for necessário aplicar este

processo sistematicamente a vários tipos de folhas, verifica-se que se tornará fastidioso e pouco prático.

Para tentar resolver este problema, com vista a manter o processo autónomo, pensou-se em criar uma imagem que representasse a estrutura das nervuras através de linhas rectas. Para isso teríamos de manualmente fornecer as coordenadas de pontos de referência para traçar segmentos de recta.

Desta forma, pensou-se em agrupar as nervuras, tomando como referência a nervura principal. Aquela que normalmente divide a folha em duas partes, direita e esquerda, seguindo-se as restantes nervuras situadas à esquerda e à direita desta.

Cada uma dessas nervuras será subdividida em ramos mais pequenos, conforme a sua espessura. Para o caso das nervuras que apresentam curvaturas, estas são subdivididas em segmentos mais curtos de forma a acompanharem a curvatura mesmo que estes tenham a mesma espessura.

A ilustração seguinte apresenta abreviadamente o método descrito de forma a poder ser melhor compreendido.

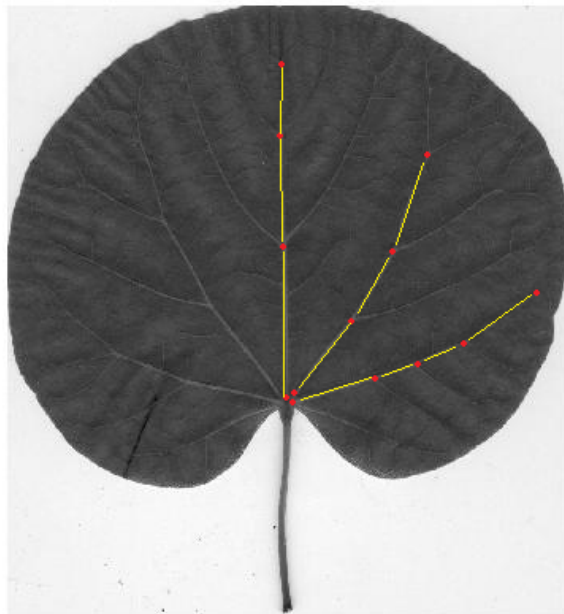


Figura 23 Marcação de pontos de referência na folha

Conforme se pode ver, podem-se classificar os pontos respectivamente em P_1 , P_2 , etc. Os respectivos segmentos de recta, S_1 , S_2 , etc. O algoritmo desenvolvido para efectuar este processo fornece dois vectores. Um vector contém o número de pontos de cada nervura. Por exemplo, a nervura central tem quatro pontos, correspondendo a três segmentos de recta, a este vector atribui-se a designação L . O segundo vector, contém todas as coordenadas dos pontos marcados na folha, o qual se identificou pela letra V . Estes vectores irão servir de apoio no processo ou função seguinte que irá executar uma segunda fase de processo de segmentação.

Desta forma, pensa-se conseguir um segundo nível de segmentação, rastreando ao longo dos segmentos de recta, numa área de menor dimensão, procurando obter deste modo as nervuras da folha, eliminando ruído envolvente e também o contorno da folha em análise.

Para isso, concebeu-se um algoritmo que irá rastrear a imagem resultante da primeira fase de segmentação numa janela de comprimento definido, que evoluirá segundo a

orientação de um segmento de recta definido para o ramo a ser analisado. Utilizando para esse efeito a informação obtida no processo anterior de marcação de pontos de referência. Ou seja, os vectores L , com informação do número de pontos de cada ramo e o vector V , com as coordenadas dos pontos de referência.

A execução deste processo fornece o resultado respeitante à ilustração que se apresenta na página seguinte, a qual se pode comparar com a imagem de segmentação anterior, resultante da primeira fase e verificar que é substancialmente melhor para esta amostra.

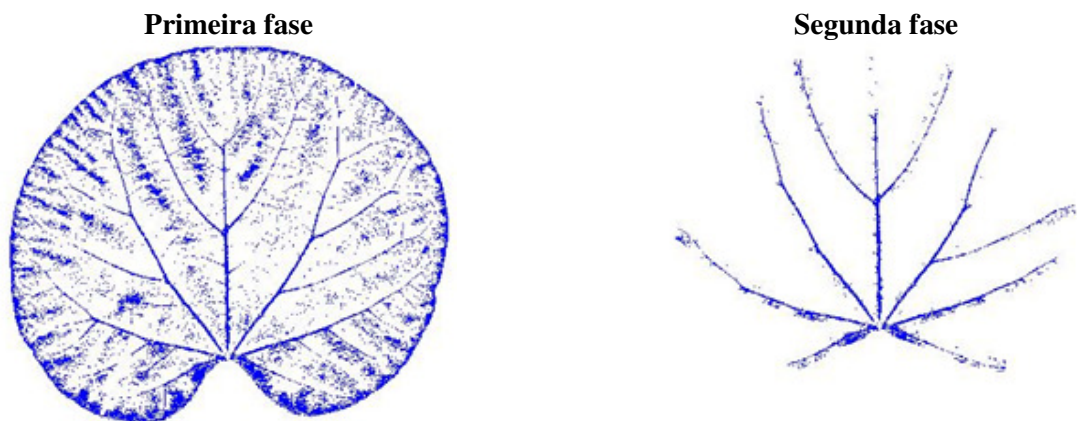


Figura 24 Comparação das duas fases de segmentação

Embora este processo tenha funcionado bem para este tipo de folha, verificaram-se os seguintes problemas:

A imagem segmentada, embora melhor que no primeiro caso pois já não tem o ruído envolvente que a anterior apresentava ainda apresenta algum ruído em volta dos ramos que contribuem para algum erro na medição dos diâmetros dos ramos. Por outro lado, são representados apenas os ramos mais notórios e se pretendêssemos obter ramos mais finos iríamos ter que acrescentar maior ruído ou ter mais trabalho em marcar segmentos de recta e suas respectivas coordenadas.

Após testes com outras folhas, verificou-se que este método não apresentava resultados constantes, não funcionando bem para outras folhas. Além também de a luminosidade e sombreamentos que podem ocorrer durante a digitalização se traduzir em más interpretações das nervuras.

Pensou-se noutra abordagem que pudesse conduzir a resultados mais satisfatórios, constantes e repetíveis. O processo seguinte opta pelo decalque das nervuras utilizando o *paintbrush*, sendo depois processada essa imagem recorrendo a novas rotinas criadas em *matlab* para daí extrair apenas as nervuras que se pretendiam considerar para o estudo. Fazendo com que o algoritmo coloque todos os pixéis fora da zona de decalque a branco e dentro da zona de decalque a preto.

Na imagem a seguinte apresenta-se a imagem original e os respectivos decalques que nela se efectuaram salientando as nervuras que se pretendem ser consideradas para o modelo. Aqui e para teste apenas se consideraram as nervuras mais evidentes, a figura da direita apresenta a imagem na sua totalidade onde é possível distinguir os contornos, embora com alguma dificuldade e a imagem da direita apresenta uma ampliação numa zona dessa mesma imagem onde se podem ver melhor os contornos efectuados.



Figura 25 Processo de contorno das nervuras

O resultado do algoritmo considerado neste teste é apresentado na imagem ilustrada na página seguinte, a qual apresenta uma silhueta bem definida da rede de nervuras da folha.

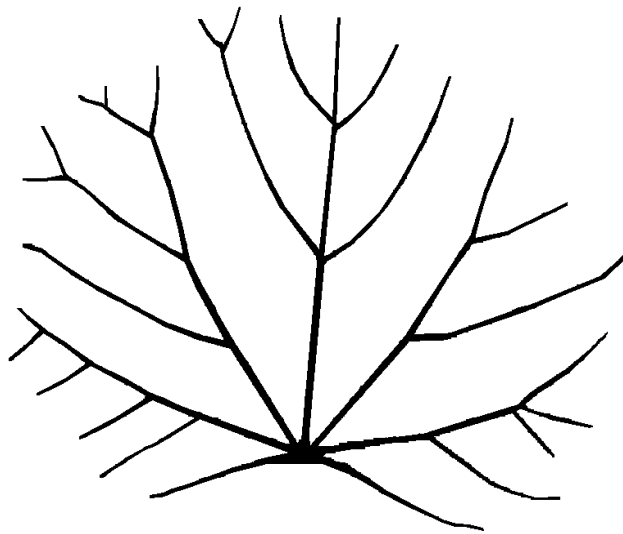


Figura 26 Resultado do processo de contorno

O resultado sob o ponto de vista de imagem é muito bom conforme se pode observar pela imagem ilustrada acima. O problema deste método é o facto de ser muito trabalhoso e demorar demasiado tempo. Tempo que aumenta se for pretendido discriminar nervuras mais pequenas que derivam de ramificações secundárias ou mais. Outro aspecto que torna este método pouco eficaz é o facto de na fase de contagem de pixéis, para medição dos comprimentos e diâmetros dos segmentos de recta considerados como secções, obrigaria a fazer recortes em pequenas porções de imagem, levando assim a criar uma grande quantidade de pequenas imagens para serem lidas através de uma outra rotina em *matlab* que tem como saída um valor de comprimento e diâmetro.

Na imagem seguinte é possível visualizar alguns exemplos de recortes resultantes do exemplo anterior



Figura 27 Exemplo de recorte de imagem

Por outro lado, embora este processo possa ser repetível, caso se pretendesse medir de novo um determinado ramo seria necessário criar uma listagem ou criar uma base de dados que fizesse corresponder os nomes destes recortes á zona da nervura em questão, o que não sendo impossível obriga a ter cuidado com mais ficheiro em anexo que seriam estes recortes de imagem que não poderiam ser perdidos.

Por fim chegou-se á conclusão que o primeiro processo seria pouco prático, o segundo processo, embora uma possibilidade mas também com tarefas de grande consumo de tempo não era também prático.

Começou a surgir uma ideia derivada deste último processo e que se tornou o método final para esta fase do estudo.

É para nós humanos, prático e imediato pegarmos numa imagem de uma folha com boa qualidade e na qual se distinguem bem as nervuras, mesmo as mais finas, recorrer a um lápis ou um marcador e marcar segmentos de recta sobre as nervuras que se pretendem considerar para posteriormente se efectuarem as respectivas medições. O processo é simples prático, apresenta constância e é repetível pois sempre que se pretender podemos medir o mesmo segmento de recta que está lá marcado e o valor será aproximadamente o mesmo desde que esses segmentos de recta estejam identificados o que também é um processo simples. Este método, embora também seja trabalhoso, conforme o tipo de folha ter mais ou menos ramificações, tem menos etapas, e a sua repetibilidade é de rápida rectificação, caso seja necessária é simples. A imagem seguinte ilustra a ideia expressa, onde se podem observar vários segmentos de recta de cores diferentes e a identificação desses mesmos segmentos de recta.



Figura 28 Marcação de segmentos

Este processo depois de testado em várias amostras mostrou ser mais prático constante e repetível do que os anteriores. Pelas razões expostas, foi o método adoptado para criar mapas para implementação dos modelos de estudo. Este método tem três fases:

- Mapeamento.
- Marcação de segmentos.
- Medição de segmentos.

3.4 Estruturação das amostras/Mapeamento

O mapeamento consiste na marcação de pontos de convergência de nervuras, aos quais se convencionou designar por nodos. Podem existir pontos de marcação intermédia entre nodos se a nervura nessa zona apresentar curvatura. Nesse caso, os pontos marcados tem o objectivo de tentar linearizar a curva. Cada folha tem uma nervura principal posicionada no centro da folha que distribui ramificando-se em canais secundários e estes noutros derivados destes e assim sucessivamente, de cada vez menor comprimento e diâmetro.

Convencionou-se classificar estas nervuras conforme o nível que ocupam na estrutura da rede estabelecendo que cada derivação será designada por camada e desta forma estabeleceu-se que a camada zero seria a nervura principal, a camada um seriam todas as nervuras derivadas da nervura principal, a camada dois seria composta pelas nervuras derivadas daquelas que pertencem á camada um e assim sucessivamente.

A marcação de segmentos é a etapa que se segue neste processo de mapeamento e consiste na marcação de segmentos de recta entre cada nodo, excepto no caso de uma nervura apresentar curvatura, nesse caso são marcados pontos intermédios para se poder uni-los de forma aproximada por segmentos de recta até ao nodo mais próximo. Para efectuar estas tarefas de marcação de pontos e segmentos de recta utilizou-se o *paintbrush* e as suas ferramentas disponíveis.

Cada segmento de recta, compreendido entre dois nodos será considerado um sector que corresponderá no sistema a modelizar a um elemento de impedância. Os sectores entre dois nodos que apresentam curvaturas e são representados por vários segmentos de recta. Serão considerados como uma impedância, embora a medição desses segmentos seja individual, o cálculo da respectiva impedância será calculado em função de um comprimento total e um diâmetro médio.

Cada impedância será identificada com $Z_{\#}$ em que (#) significa o número identificativo dessa impedância na folha.

Por questões de simplificação do modelo, como adiante se verificará, convencionou-se não ir além da camada dois e para este nível de camadas já se obtém modelos com centenas de elementos de impedância.



Figura 29 Exemplo de mapeamento

A imagem 27, ilustrada acima exemplifica as fases de mapeamento de uma folha, estando dividida em quatro partes. A imagem do primeiro quadrado respeita à camada zero, o segundo quadrado a camada 1, o terceiro quadrado a camada 2 e o quarto quadrado uma imagem composta com uma visão global de todas as camadas que foi processada através de uma rotina que se construiu em *matlab*, na qual fazemos detectar, além da imagem os segmentos de recta e *labels* que pretendemos apareçam nessa imagem composta.

3.5 Medição

A operação de medição dos segmentos de recta na imagem foi efectuada utilizando também o *paintbrush*. Este programa não tem nenhuma ferramenta que nos indique de forma directa o comprimento de um segmento, o que se fez foi utilizar a função de seleccionar e fazer a selecção sobre o segmento de recta que se pretende medir, obtendo-se as coordenadas x e y do rectangulo formado e através dessas coordenadas, com recurso ao teorema de Pitágoras obtém-se o respectivo comprimento desse segmento.

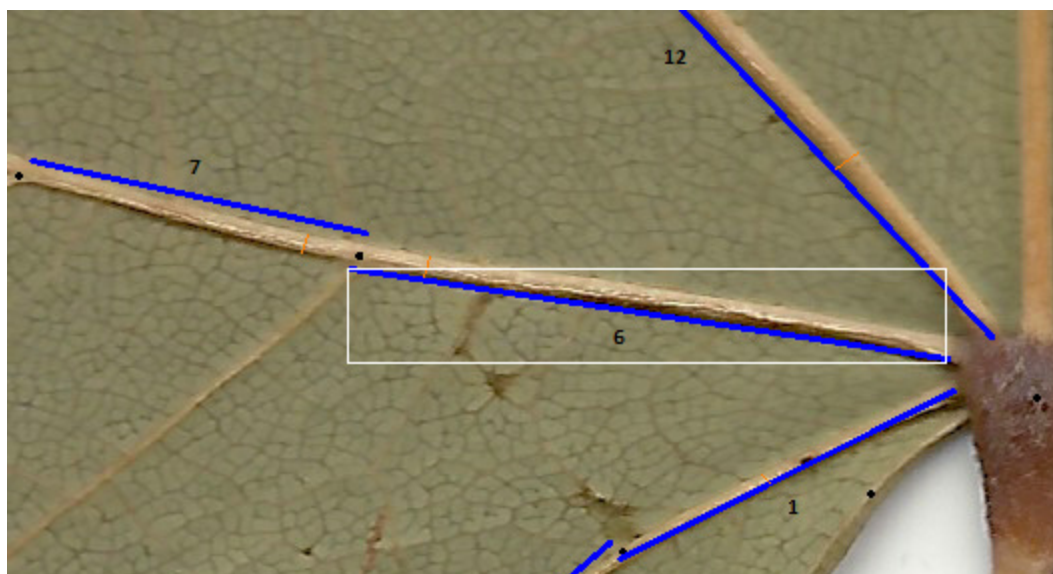


Figura 30 Medição de segmentos

A figura 28 ilustrada acima exemplifica o modo como foram efectuadas as medições dos segmentos sobre as imagens das folhas. Todas essas medidas tiveram de ser registadas manualmente, o que deu algum trabalho para todas as folhas do estudo. O registo foi efectuado numa folha de cálculo em *excel* na qual é simples obterem-se os cálculos dos comprimentos e diâmetros, sendo essa tabela também aproveitada para se obterem os valores dos elementos de impedância.

Capítulo 4

4 Modelização

Tendo completas e a funcionar de uma forma estável as fases anteriores deste estudo, que versaram a aquisição de imagem, a segmentação, conseqüente mapeamento e medições das secções que irão representar os elementos de impedância, tratar-se á neste capítulo da modelização das amostras.

4.1 Abordagem hidráulica – eléctrica

Cada sector da nervura, forma um tubo que apresenta um comprimento e um diâmetro que será modelizado por um elemento de impedância hidráulica, cujos componentes serão, respectivamente os seus equivalentes eléctricos de resistência hidráulica, inertância hidráulica, (Correspondente á indutância eléctrica), e capacidade/compliance hidráulica.

A folha vegetal pode ser analisada á luz destes destas vertentes e deste modo, criar-se um modelo eléctrico que representa o modelo hidráulico das nervuras consideradas. Uma das componentes deste elemento é a resistência, além dos outros já citados.

Para melhor compreensão destes componentes hidráulicos, efectua-se uma breve explicação de cada um desses elementos.

4.1.1 Resistência hidráulica

A resistência hidráulica é a resistência ao fluxo. Esta resulta da variação de fluxo de um fluído através de válvulas ou alterações de diâmetro através das tubagens, ou o fluxo através de um curto tubo que liga dois tanques, também se pode considerar verdadeiro.

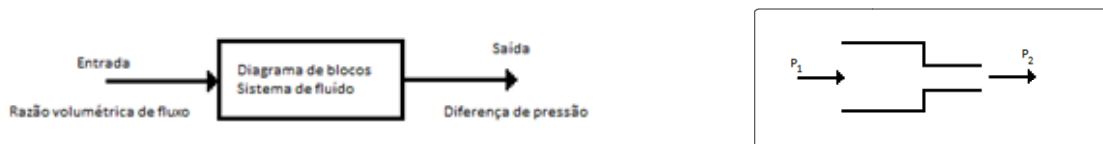


Figura 31 Resistência hidráulica

A equação 1, expressa a resistência hidráulica como o quociente da variação de pressão pelo fluxo

$$R = \frac{\Delta P}{q} \quad (1)$$

Em que a diferença de pressão se expressa pela equação abaixo.

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (2)$$

Os símbolos, q ou ϕ_v , representam a taxa de variação de fluxo, ou fluxo volumétrico ao longo da resistência.

O símbolo R representa a resistência.

Sendo R uma constante á qual chamamos resisténcia hidráulica. Esta expressão é análoga á Lei de Ohm para os circuitos eléctricos.

Resistências hidráulicas lineares ocorrem ordeiramente no fluxo através de capilares e substâncias porosas e resistências não lineares, ocorrem através de orifícios laterais ou em fluxos turbulentos.

A relação de Hagen-Poiseulle é uma boa aproximação ao fluxo estável através de microcanais, formados por tubos longos, rígidos e finos, para os quais os efeitos finais podem ser ignorados. Embora microdispositivos raramente tem canais circulares. As técnicas de fabricação, normalmente conduzem a formas rectangulares, trapezoidais ou semi-circulares. Assim, as aplicações em engenharia para análise de circuitos hidráulicos necessitam que se desenvolva um modelo mais geral para a resisténcia hidráulica em canais. Os microcanais podem muitas vezes ser compostos de materiais elásticos, não sendo por isso rígidos. Canais rígidos comportam-se muitas vezes como se não o fossem, devido a bolhas formadas no canal. Devido a estes factores, define-se resisténcia e “compliance” dos canais como forma de simplificação da análise destes sistemas.

A descrição acima para microcanais cujas formas não são perfeitamente circulares pode ser generalizada, (aproximada), substituindo o raio do tubo pelo raio hidráulico, (r_h). Este raio hidráulico é uma ferramenta para estimar a resisténcia ao fluxo do canal sem resolver exactamente as equações de fluído. A equação 3 expressa esse parâmetro.

$$r_h = \frac{2A}{P} \quad (3)$$

Nesta forma, o modelo unidimensional (1D), do microcanal tem uma resisténcia hidráulica R definida pela equação 4.

$$R \cong \frac{8\eta L}{r_h^2 A} \quad (4)$$

Em que :

R – representa a resisténcia hidráulica

η – representa a viscosidade do fluído

r_h – representa o raio hidráulico

L – representa o comprimento do canal

A – representa a área de corte do canal

P – representa o perímetro seccional

Se o canal for circular, r_h é igual ao raio do círculo.

A equação (3) é derivada da análise de conservação do momento num volume de controlo, devido á aproximação usada na sua derivação é exacta apenas para canais infinitamente longos e circulares. Para canais finitos, ou formas não circulares, usando o raio hidráulico para prever a resisténcia hidráulica é tipicamente uma boa aproximação. Com uma margem de 20% dentro do resultado provável.

4.1.2 Inertância hidráulica

Inertância hidráulica é o equivalente à indutância para os circuitos eléctricos ou para os sistemas mecânicos, Para acelerar um fluido e assim aumentar a sua velocidade é necessária uma força.

A equação 5 traduz a pressão exercida no líquido.

$$P = \frac{F}{A} \quad (5)$$

A equação 6 expressa a força em função da aceleração.

$$F = ma \quad (6)$$

Considere-se um bloco de massa líquida (m), representado pela figura 30.



Figura 32 Inertância hidráulica

A força actuante no líquido é definida pela equação 7.

$$F_1 - F_2 = p_1 A - p_2 A \Leftrightarrow F_1 - F_2 = (p_1 - p_2) A \quad (7)$$

Que pode tomar a forma da equação 8.

$$p_1 - p_2 e, \quad a = \frac{dv}{dt} \text{ logo } (p_1 - p_2) = m \frac{dv}{dt} \quad (8)$$

Sendo a diferença de forças entre dois pontos representada pela equação 9.

$$F_1 - F_2 = \Delta F \quad (9)$$

A diferença de pressões representada pela equação 10.

$$p_1 - p_2 = \Delta p \quad (10)$$

A equação 11 representa a força expressa numa diferença de pressões entre os dois pontos.

$$p_1 - p_2 = ma \quad (11)$$

A aceleração, representada na equação 12.

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

Logo, a equação 13 estabelece.

$$p_1 - p_2 = m \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

A massa pode ser expressa através da equação 14.

$$m = A\rho L \quad (14)$$

Conduzindo assim à equação 15.

$$p_1 - p_2 = A\rho L \frac{dv}{dt} \quad (15)$$

A massa de líquido em análise tem um volume.

$$V = AL \quad (16)$$

Sendo L o tamanho do bloco líquido, ou a distância entre pontos do líquido onde são medidas a pressão p_1 p_2 .

O líquido tem uma densidade ρ . Então a massa será.

$$m = AL\rho \quad (17)$$

Assim:

$$(p_1 - p_2) = A\rho L \frac{dv}{dt} \quad (18)$$

A taxa de volume líquido é.

$$q = Av \quad (17)$$

Assim, a equação 18 leva ao seguinte resultado

$$p_1 - p_2 = I \frac{dq}{dt} \text{ ou } p_1 - p_2 = L_h \frac{dq}{dt} \quad (18)$$

Definindo I ou L_h como a inércia hidráulica, será definida pela equação 19.

$$I = \frac{L\rho}{A} \text{ ou } L_h = \frac{L\rho}{A} \quad (19)$$

A inércia hidráulica está relacionada com massa e inércia do líquido no tubo. Simbolicamente representado pela figura 33.



Figura 33

A acumulação de momento no tubo sob influência da diferença de pressão é expressa pela equação de equilíbrio, equação 20

$$\frac{d}{dt} \tilde{A} = \Delta P \quad (20)$$

O momento armazenado pode ser referido ao volume de fluxo de um *buffer* característico. Neste caso, \tilde{A} representa o momento.

A equação 21 expressa a inércia hidráulica I ou L_h em função do momento.

$$\tilde{A} = I\phi \text{ ou } \tilde{A} = L_h\phi_v \quad (21)$$

A unidade que caracteriza a inércia hidráulica é (Ns^2m^{-5}).

A combinação da equação 21 conduz à equação 22.

$$\Delta P = L_h \frac{d}{dt} \phi_v \quad (22)$$

Finalizando, para um canal de comprimento L e área de corte A , a inércia será expressa pela equação 19, que se volta a ilustrar abaixo.

$$I = \frac{L\rho}{A} \text{ ou } L_h = \frac{L\rho}{A} \quad (19)$$

4.1.3 Capacidade/Compliance hidráulica

Até agora tem-se assumido que todas as superfícies eram infinitamente rígidas quando consideramos o fluxo do fluido.

Se é este o caso, então o volume de controlo que se usou para analisar o tubo é estacionário e a massa no tubo é constante no tempo.

Neste caso a relação de Hagen-Poiseulle é uma completa descrição da relação de fluxo de pressão em tubos longos e finos.

Contudo, se as paredes não forem rígidas, então o volume de controlo que se utilizou para analisar o tubo não tem mais fronteiras estacionárias e a pressão pode causar contracção ou expansão da área de corte de um microcanal. Assim, a massa ou o volume internos no tubo deixa de ser constante no tempo.

Se tivermos um tubo que não seja rígido, de pequeno diâmetro. Se for aplicada uma pequena pressão num dos extremos, o tubo não se expandirá para um diâmetro maior e a relação que governa esta baixa pressão para este tubo é a relação de Hagen-Poiseulle.

Mas se for aplicada temporariamente uma variação de pressão que torne o diâmetro do tubo maior a lei de Hagen-Poiseulle é insuficiente para descrever a relação de baixa pressão nesse tubo porque o volume varia no tempo. Considere-se a relação de conservação de massa para o volume de controlo, definido pela equação 23

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = - \int_S (\rho \vec{u}) \cdot \hat{n} dA \quad (23)$$

Para um fluxo incompressível e unidireccional, pode-se desenhar um controlo simples.

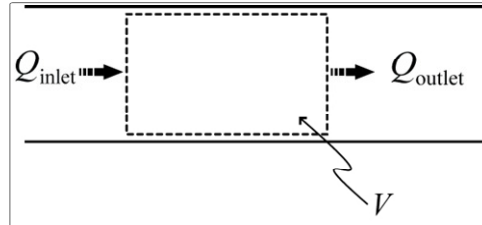


Figura 34 Capacidade Hidráulica

A equação 24 traduz a relação de pressão entre a entrada e a saída.

$$\frac{\partial y}{\partial x} v = Q_{inlet} - Q_{outlet} \quad (24)$$

E simplificar esta relação para a equação de volume.

As diferenças entre os fluxos de entrada e de saída devem conduzir á expansão do volume de controlo pela expansão da área de corte do canal.

Se o volume de um tubo varia, a alteração do volume no tempo é igual á diferença entre a entrada e as saídas dos fluxos volumétricos. Para um tubo rígido é:

$$V = 0 \text{ então } Q_{entrada} = Q_{saída} \quad (25)$$

Descreve-se a tendência do volume do líquido contido no canal para contrair sobre a pressão como a "Compliance ou Capacidade hidráulica C_h [m^3/Pa]".

A "compliance" de um sistema é dado pelo decréscimo no volume do sistema pela variação em pressão, como se pode verificar na equação 26.

$$C_h = - \frac{dV}{dt} \quad (26)$$

E a taxa de fluxo volumétrico armazenada por um sistema "compliant" é dada pela equação 27. Aqui o sistema refere-se ao fluido de trabalho.

$$Q = -C_h \frac{dV}{dt} \quad (27)$$

Tipicamente numa solução aquosa a "compliance" mede a compressibilidade do sistema. Substituindo na definição de "compliance" pode-se ver esta relação na equação 28.

$$Q = -C_h \frac{dp}{dt} \Leftrightarrow Q = \frac{dV}{dp} \frac{dp}{dt} \Leftrightarrow Q = \frac{dV}{dt} \quad (28)$$

Que recapitula a conservação de massa na equação 23 aqui reescrita de novo.

(23)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = - \int_S (\rho \vec{u}) \cdot \hat{n} dA$$

A “compliance” é relacionada com a rigidez física do líquido e rigidez física do material que o envolve.

Dois efeitos são importantes. Primeiro a maioria dos materiais são reduzidos no volume quando a pressão aumenta. Isto conduz a uma contribuição positiva da “compliance”.

Segundo, um aumento de pressão empurra o material que está a condicionar o fluido e assim o volume disponível para o líquido aumenta. Este segundo factor conduz a uma contribuição negativa da “compliance”.

Nos sistemas de microfluidos com água como fluido de trabalho, a compressão da água é usualmente ignorada com segurança. Contudo a flexibilidade do material que contém o fluido é largamente variável, dependendo do material do dispositivo.

Água forma um canal infinitamente rígido, tem baixa “compliance” positiva, porque a água é difícil de comprimir e o canal é impossível de expandir.

Se o fluido de trabalho fosse ar num canal infinitamente rígido, teria uma compliance altamente positiva, porque o ar é fácil de comprimir.

Água dentro de um canal constituído por material flexível tem uma “compliance” largamente negativa, porque o canal inflete como um balão quando a pressão é aumentada. Assim, o volume tirado pela água expande quando a pressão é aumentada.

Se um sistema tiver bolhas, estas tomam um papel de um encapsulamento flexível e sob o ponto de vista de fluxo de água, um microdispositivo com bolhas tem uma “compliance” negativa.

Sistemas fluidos incompressíveis, tais como sistemas aquosos, geralmente tem “compliance” zero ou negativa. O volume do fluido expande quando a pressão aumenta.

Como mencionado, a maior componente de “compliance” num microdispositivo são usualmente quaisquer bolhas que acidentalmente aparecem no sistema.

Sistemas fluidos incompressíveis, tais como sistemas aquosos, geralmente tem “compliance” zero ou negativa. O volume do fluido expande quando a pressão aumenta.

Como mencionado, a maior componente de “compliance” num microdispositivo são usualmente quaisquer bolhas que acidentalmente aparecem no sistema.

A representação analítica de pressões e fluxos sinusoidais, as relações entre pressão e fluxos conduzem a expressões de integração e derivação de funções harmónicas, (senos e cossenos), são também relacionadas com exponenciais complexas. Devido a isto utiliza-se a representação analítica ou complexa de quantidades reais como a pressão e fluxo discutidos em detalhe.

Para finalmente se estabelecer uma expressão para a capacidade/compliance hidráulica, a equação 29 será a que se utilizará nos sistemas a modelizar.

(29)

$$C_h = \frac{\partial}{\partial p} B \Leftrightarrow C_h = \beta \pi r^2 L$$

Resumindo do exposto, para o cálculo dos componentes hidráulicos utilizados na modelização das amostras das folhas vegetais, serão utilizadas as seguintes expressões:

A resistência hidráulica é expressa pela equação 4, rescrita de novo.

$$R_h = \frac{8\eta L}{\pi r^4} n \quad (4)$$

A inércia hidráulica vem expressa pela equação 19, também aqui reescrita de novo.

$$L_h = \frac{L\rho}{\pi r^2} \quad (19)$$

E a capacidade/compliance hidráulica pela equação 29, repetida de novo abaixo.

$$C_h = \beta\pi r^2 L \quad (29)$$

As constantes utilizadas, $\eta = 0.0015 \text{ Kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ para a viscosidade, $\rho = 1027 \text{ kgm}^{-3}$ para a densidade, foram as da água salgada. Admitindo-se que a seiva é basicamente composta por este fluido.

Para a termo-compressibilidade, $\beta = 4.93 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}^{-1}$, verifica-se que o factor dominante é a deformação sofrida pelos tubos. O valor utilizado foi obtido por aproximação. Admitindo que esse valor seria n vezes bastante maior do que o da água. Ou seja, as paredes das nervuras são muito mais compressíveis do que a água. Assim, o valor n atribuído foi da ordem de 10^6 .

A figura 30 seguinte representa o circuito equivalente eléctrico de um elemento de impedância, sem fugas, constituído apenas pela resistência hidráulica e a inércia hidráulica em série.

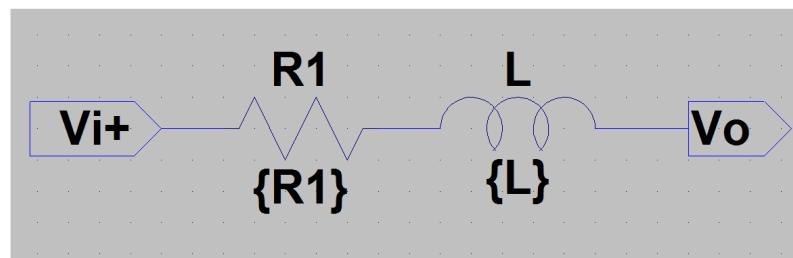


Figura 35 Modelo do equivalente eléctrico sem fugas

A figura 35 representa o circuito equivalente eléctrico de um elemento de impedância com fugas. Além dos elementos citados anteriormente, ligados em série, aparece uma malha composta de um paralelo constituído por uma resistência hidráulica de fugas e uma capacidade hidráulica de fugas ligado na saída do circuito.

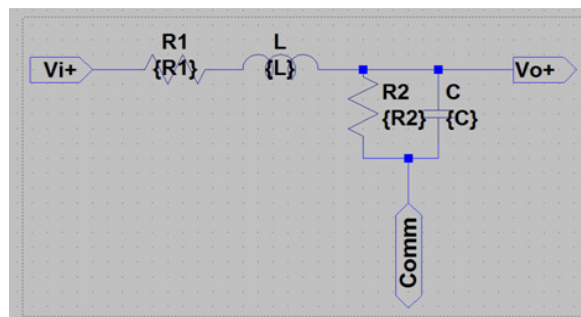


Figura 36 Modelo do equivalente eléctrico com fugas

Estes módulos integrarão os modelos das folhas vegetais, respectivamente para a versão sem fugas e a versão onde as fugas são contempladas.

4.1.4 Modelização das amostras em estudo

Foram selecionadas três amostras de folhas vegetais para este estudo e procurou-se usar amostras diferentes entre si para se poder obter maior diversidade.

As amostras selecionadas foram a folha de laranjeira que tem por nome científico, “Citrus Sinensis”. A segunda amostra, é uma folha de olaia com o nome científico, “Cersis Silliquestrum”. Achei interessante a forma e a distribuição das nervuras desta folha que apresentam uma côr diferente da folha em si. A terceira amostra é uma folha de figueira, cujo nome científico é “Ficus Carica”. Esta folha também se mostrou interessante tanto pela sua forma como pela distribuição das nervuras.

Baseados na abordagem das breves noções de botânica exposta no primeiro capítulo deste estudo, vai-se caracterizar cada uma das folhas.

Para a folha Citrus Sinensis, “Folha de laranjeira”, a tabela 10, abaixo representada descreve as suas características e a Figura 37, ilustra a amostra em questão.

Morfologia	Incompleta
Contorno foliar	Folha séssil
Base foliar	Lanceolada
Ápice foliar	Simétrica
Margem foliar	Agudo
Subdivisão do limbo	Lobada
Nervação	Peninérvea
Coloração	Bicolor

Tabela 2 Características da folha Citrus Sinensis (Folha de Laranjeira)



Figura 37 Folha Citrus Sinensis (Folha de Laranjeira)

Para a folha *Cersis Silliquestrum*, “Folha de Olaia”, a tabela 11, abaixo representada descreve as suas características e a Figura 38, ilustra a amostra em questão.

Morfologia	Completa, peciolada
Contorno foliar	Reniforme
Base foliar	Reentrante
Ápice foliar	Mucronado
Margem foliar	Inteira
Subdivisão do limbo	Lobada
Nervação	Palminérvea
Coloração	Bicolor

Tabela 3 Características da folha *Cersis Silliquestrum* (Folha de Olaia)



Figura 38 Folha *Cersis Silliquestrum* (Folha de Olaia)

Para a folha *Ficus Carica*, “Folha de Figueira”, a tabela 12, abaixo representada descreve as suas características e a Figura 39, ilustra a amostra em referida.

Morfologia	Incompleta, peciolada
Contorno foliar	Orbicular
Base foliar	Reentrante
Ápice foliar	Acuminado
Margem foliar	Dissecada
Subdivisão do limbo	Multipartida
Nervação	Palminérvea
Coloração	Bicolor

Tabela 4 Características da folha *Ficus Carica* (Folha de Figueira)

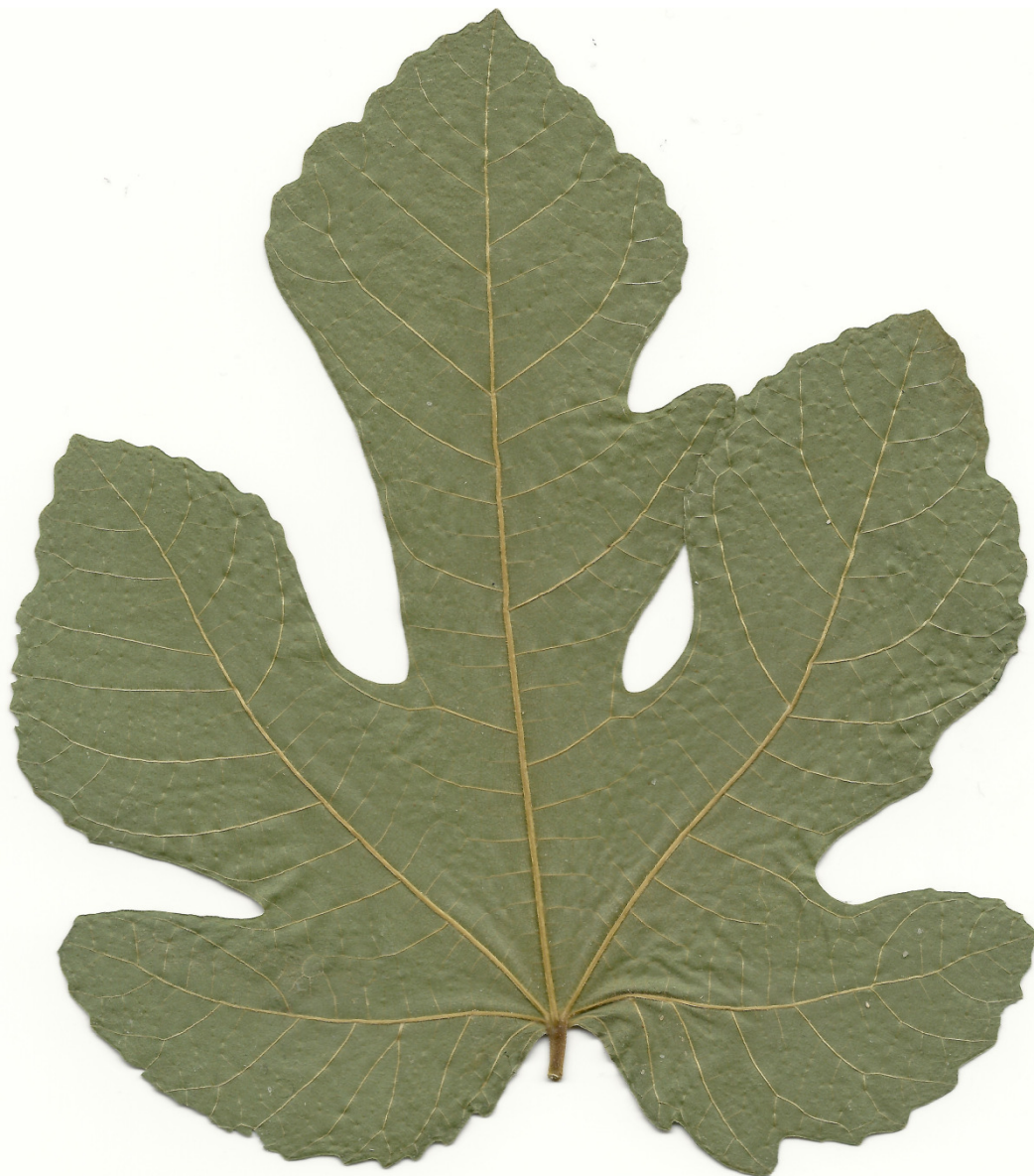


Figura 39 Folha Ficus Carica (Folha de Figueira)

De todas as características citadas, aquela que mais importância tem para este estudo é a nervação, são ramificações que formam os canais transportadores de seiva, importantes no processo de respiração, transpiração, alimentação da planta é responsável pelo processo de fotossíntese.

Será a partir das nervuras que se vai modelizar a folha, equiparando essa rede a um circuito eléctrico composto por vários elementos de impedância.

Conforme se pode verificar, a nervação das três amostras é diferente, embora as amostras *Cersis Siliquastrum*, (Olaia), e a de *Ficus Carica*, (Figueira), tenham a mesma classificação, (Palminérvea). Comparadas entre si existem diferenças porque a última tem uma subdivisão do limbo do tipo multipartida, enquanto a outra tem uma subdivisão do limbo do tipo lobada.

A nervação de cada uma destas folhas terá influência importante nos circuitos modelo que delas derivam, pois não são iguais entre si nas malhas que os formam. Na

implementação dos modelos não se foi á exaustão considerando a totalidade de todas as nervuras pois o seu número seria demasiado elevado, tornando o modelo demasiado trabalhoso e pesado de implementar. Assim, por razões de simplificação, reduziu-se o número de elementos, considerando-se a rede até um nível de camada aceitável de elementos. Por esta razão talvez algumas das particularidades da cada uma das folhas possam ser menos evidenciadas. Mas pensa-se que a partir de um determinado número de elementos, a diferença em variação de impedância possa ser pouco notória. De seguida, apresentam-se os modelos de cada uma das amostras sujeitas a este estudo. Como se pode prever os modelos vão ser compostos de grande número de elementos. Considera-se um elemento de impedância, como já se referiu atrás, um circuito série RL, formado por uma resistência, equiparada ao seu equivalente de resistência hidráulico e uma indutância, equiparada ao seu equivalente de inércia hidráulica, no caso de se tratar de um modelo sem fugas. Já para o caso de um modelo em que as fugas são consideradas aparece mais uma resistência de fugas e uma capacidade de fugas cujos seus equivalentes hidráulicos são representados por uma resistência hidráulica e por uma capacidade hidráulica. Para tornar mais simples os modelos de cada uma das folhas, cada um desses elementos é representado por um bloco equivalente ao seu congénere sem fugas ou com fugas. A Figura 40 representada abaixo, ilustra a simplificação acabada de explicar.

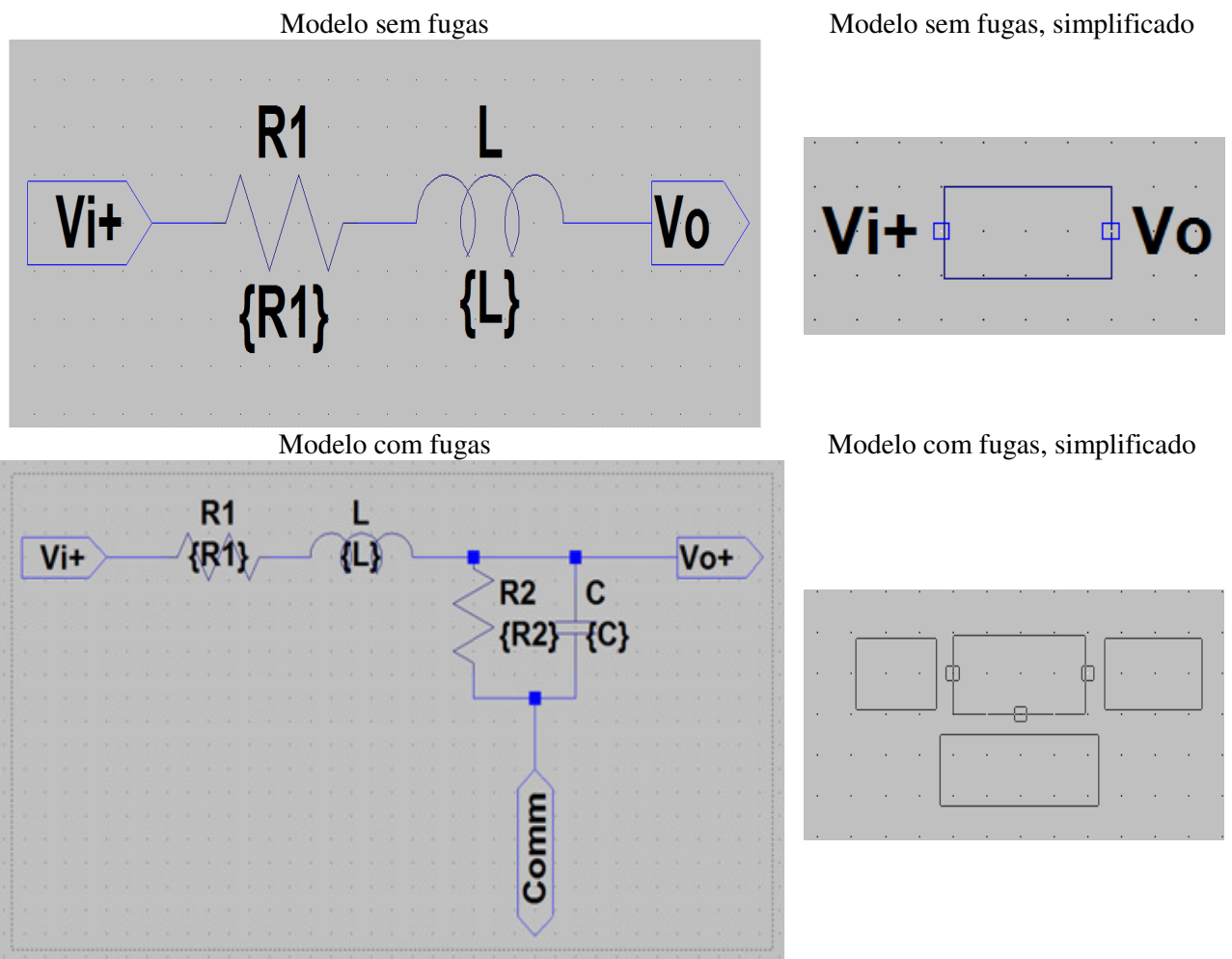


Figura 40 Elementos de Impedância

A Figura 41 representa o mapeamento das impedâncias na folha *Citrus Sinensis* (Folha de Laranjeira). Os segmentos de recta a vermelho correspondem à camada de nível zero. Os segmentos a azul correspondem á camada de nível 1e os segmentos de recta a roxo correspondem ao nível dois. Com uma estrutura até este nível obteve-se um circuito com 257 elementos de impedância e esta não é das folhas mais complexas no que concerne a rede de nervuras.

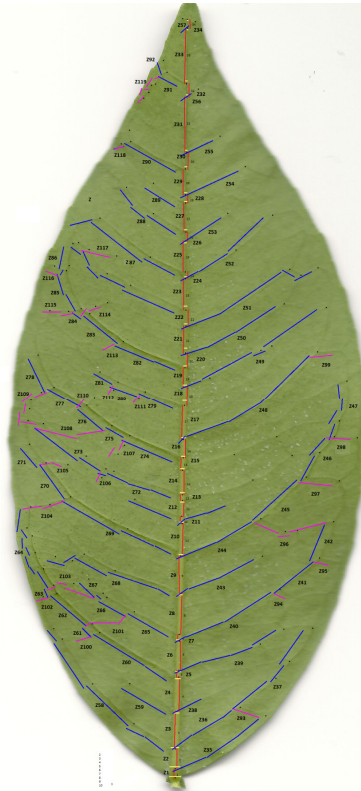


Figura 41 Mapeamento da rede de impedâncias da folha *Citrus Sinensis* (Folha de Laranjeira)

Esta amostra, com uma nervação do tipo peninérvea, apresenta uma nervura central, comum na maior parte das folhas, existem derivações, distribuídas ao longo desta nervura principal que se distribuem para a direita e para a esquerda. Estas nervuras derivadas e de menor diâmetro também se vão ramificando em canais mais pequenos e mais finos. Como já se referiu, consideraram-se para o modelo desta folha as nervuras até à camada dois, ou seja, aquelas que derivam a partir dos canais de derivação secundária, ilustrado na Figura 42, representada a seguir.

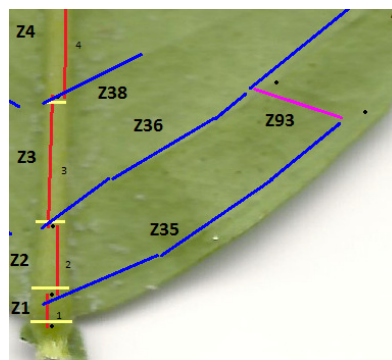


Figura 42 Identificação de camadas *Citrus Sinensis*)

Esta configuração de estrutura nerval, origina o circuito constituído por um tronco principal de impedâncias em série, ao longo do qual derivam malhas à direita e à esquerda desse ramo que formam malhas mais ou menos complexas conforme o nível que se obteve para cada um desses nós. A figura 43 representa uma das modelizações. Como os elementos de impedância nos circuitos são representados por blocos e como atrás se referiu não se necessita de representar uma figura para o circuito sem fugas e outra para o circuito com fugas, pois o *layout* é idêntico.

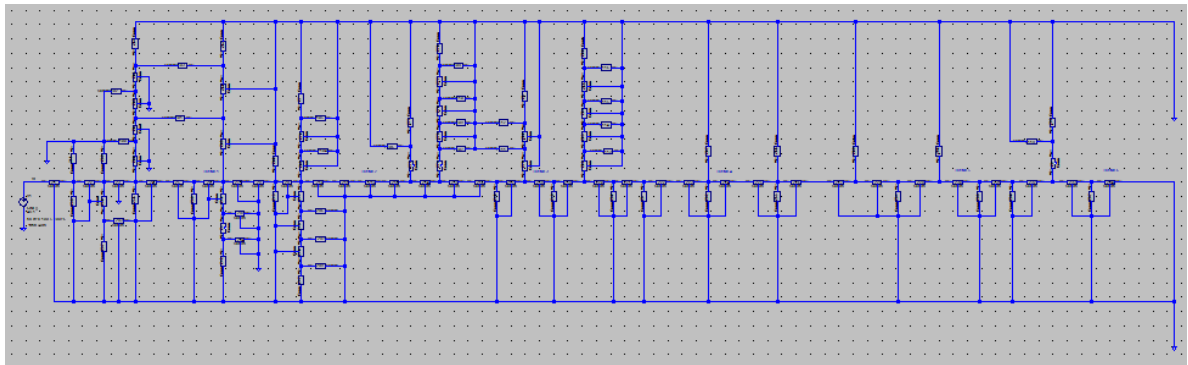


Figura 43 Modelização da folha Citrus Sinensis (Folha de Laranjeira) com fugas

A Figura 40 representa o mapeamento efectuado á folha Cersis Silliquestrum, (Olaia), pode-se verificar que nesta folha também se foi até á camada de nível dois.

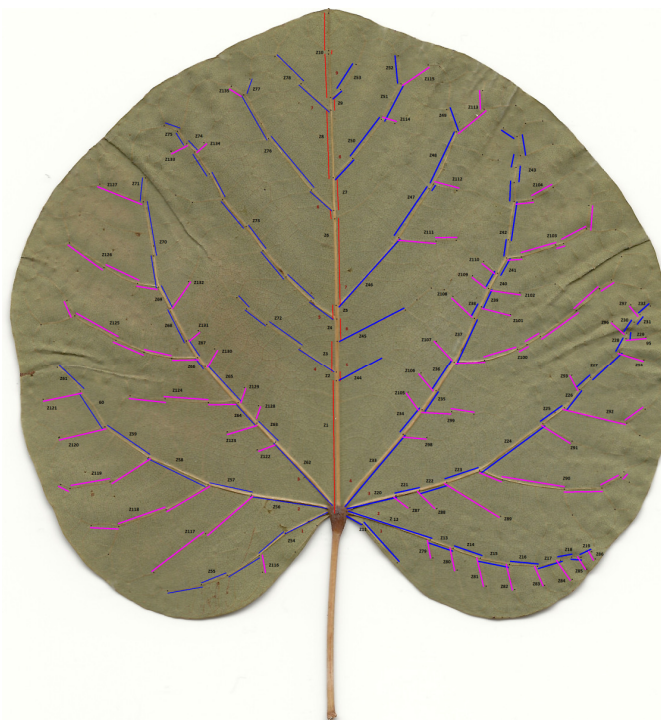


Figura 44 Mapeamento da rede de impedâncias da folha Cersis Silliquestrum (Folha de Olaia)

Esta amostra, com uma estrutura nerval do tipo palminérvea, onde da nervura central partem várias ramificações ao longo desta nervura, até á sua extremidade. Tem uma característica diferente da amostra anterior, porque na sua base foliar apresenta uma

ramificação com uma concentração de ramificações, de diâmetro não muito reduzido, que se distribuem para os extremos da folha, para a direita e para a esquerda, desde a base foliar em direcção ao ápice. Como se pode observar na Figura 44, ilustrada atrás.

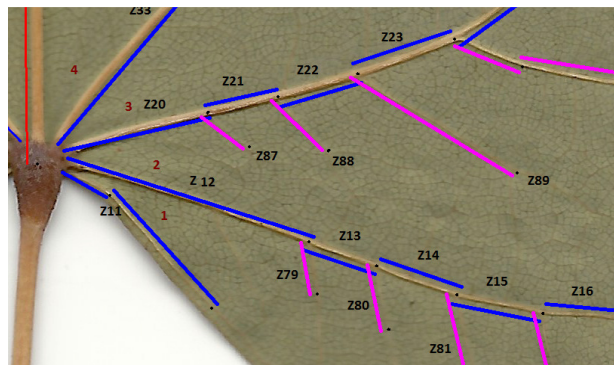


Figura 45 Identificação de camadas Citrus Sinensis)

A Figura 45 ilustra como foram seleccionadas as diferentes camadas. Cada cor representa um nível diferente, este mapeamento resulta em 135 elementos de impedância.

Esta configuração neural dá origem a um circuito diferente daquele que se obteve com a amostra anterior. Existe também um tronco principal constituído por vários elementos de impedâncias em série, ao longo do qual derivam ramificações distribuídas para a direita e para a esquerda desse tronco principal. Porém com uma diferença relativamente ao caso anterior, neste caso, verifica-se que no início da linha existe uma grande concentração de malhas, três a quatro malhas que partem do primeiro nodo e de grande concentração de elementos. Verificando-se que essa concentração vai diminuindo em direcção ao ápice ao longo do tronco. A Figura 46 representa o modelo para esta amostra e pelas mesmas razões atrás citadas apenas se representa um dos circuitos, por serem idênticos no seu *layout*.

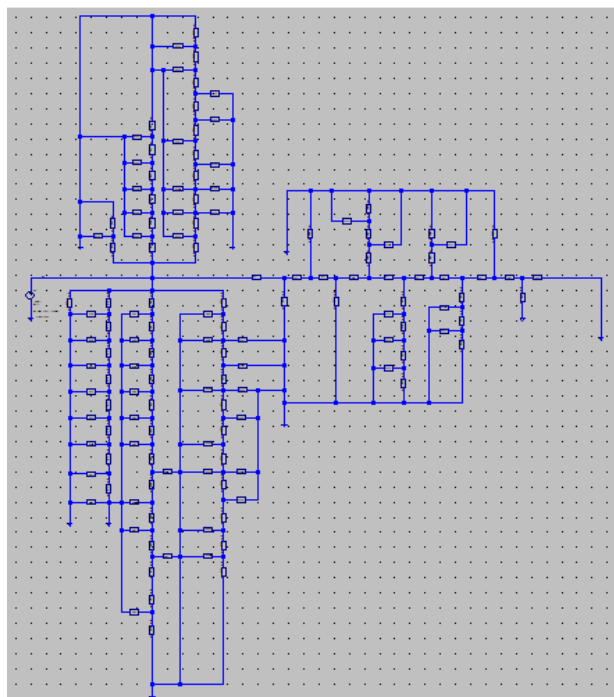


Figura 46 Modelização da folha Cersis Silliquestrum (Folha de Olaia) sem fugas

Na Figura 47 visualiza-se o mapeamento efectuado á folha *Ficus Carica*, (Olaia). Nesta amostra pretendia-se ir até à camada de nível três, mas por razões de complexidade no modelo resultante, pois este iria chegar seguramente a mais de 400 elementos de impedância, optou-se por se ficar também pela camada dois.

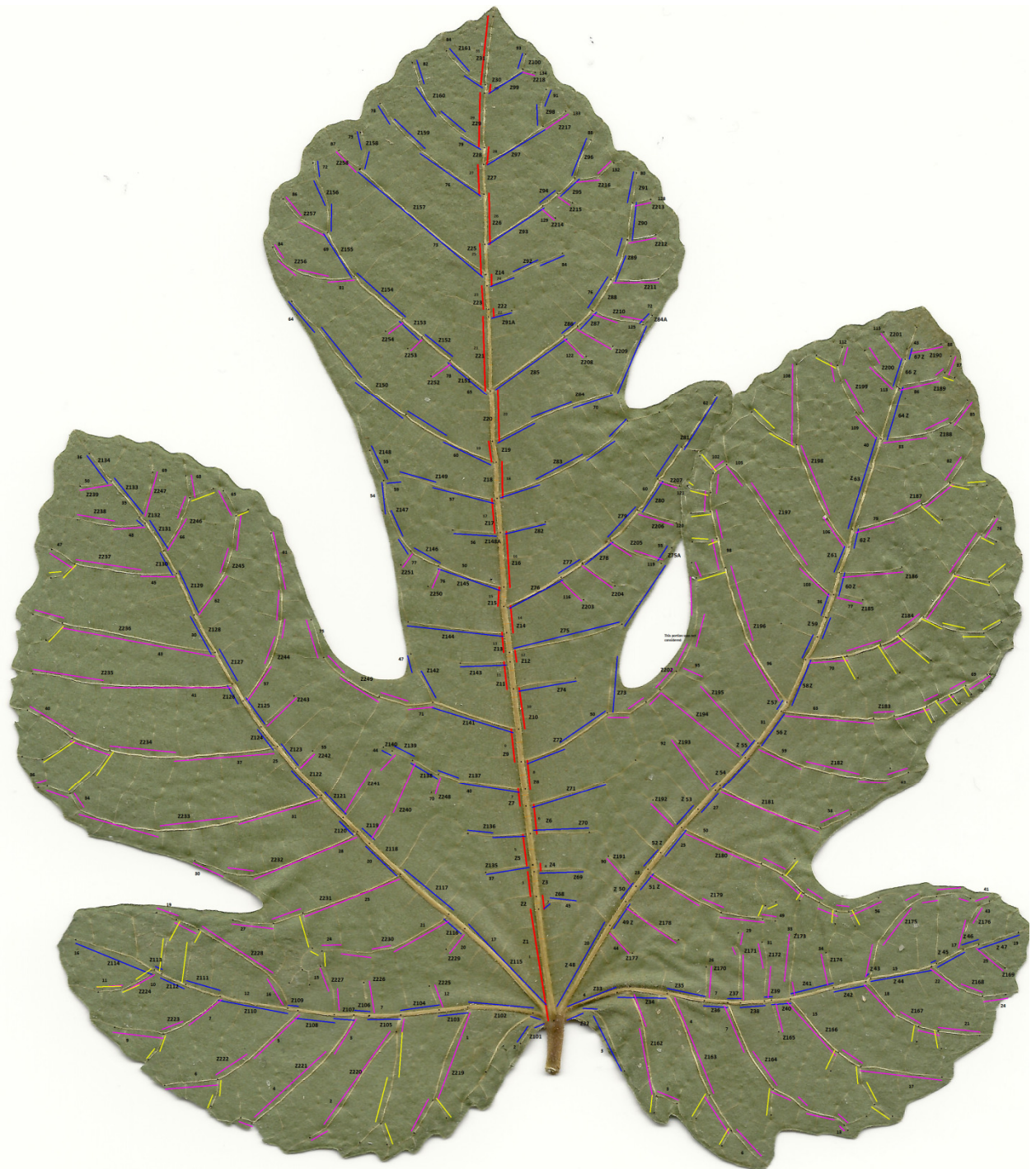


Figura 47 Mapeamento da rede de impedâncias da folha *Ficus Carica* (Folha de Figueira)

Esta amostra, apresentando também uma estrutura nerval do tipo palminérvea, tem também uma subdivisão limbar multipartida introduzindo características diferentes a esta amostra. Nesta amostra verifica-se quase como se tratasse de várias folhas unidas

entre si. Nesta folha, a partir da nervura principal e do nodo inicial saem várias ramificações principais para cada uma destas facetas da folha.

A Figura 48 ilustra como foram seleccionadas as diferentes camadas para esta amostra. Cada côr, como habitual neste estudo, representa um nível diferente. Este mapeamento resulta em 151 elementos de impedância considerando apenas até à camada de nível dois.

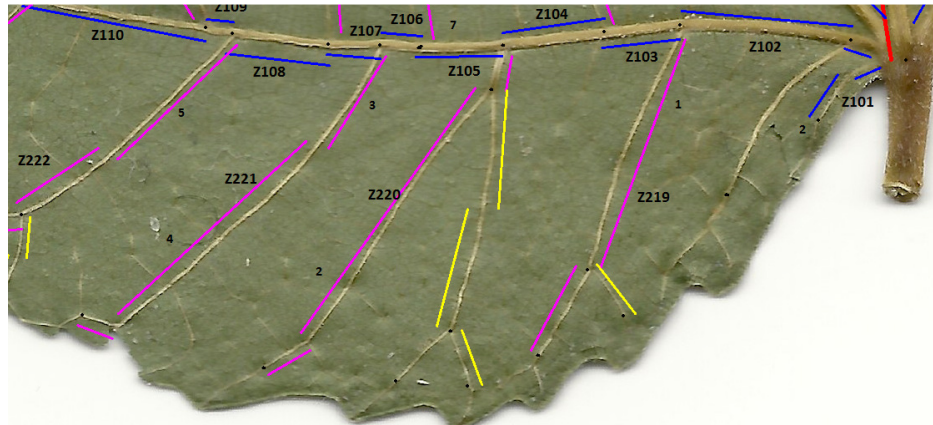


Figura 48 Idêntificação de camadas *Ficus Carica*)

Esta configuração nerval dá origem a um circuito análogo ao anterior, dada a sua configuração nerval ser idêntica. Existe também um tronco principal constituído por vários elementos de impedâncias em série, ao longo do qual derivam ramificações distribuídas para a direita e para a esquerda desse tronco principal. A partir das ramificações principais, diga-se assim, existem outras que derivam destas, para a direita e para a esquerda das mesmas. Como no caso da amostra anterior, vai-se verificar uma maior concentração na zona da base foliar, onde as malhas formadas são mais densas, tornando-se menos densas em direcção ao ápice. A figura 49 representa o modelo para esta amostra e, como nos casos anteriores apenas se representa um dos circuitos.

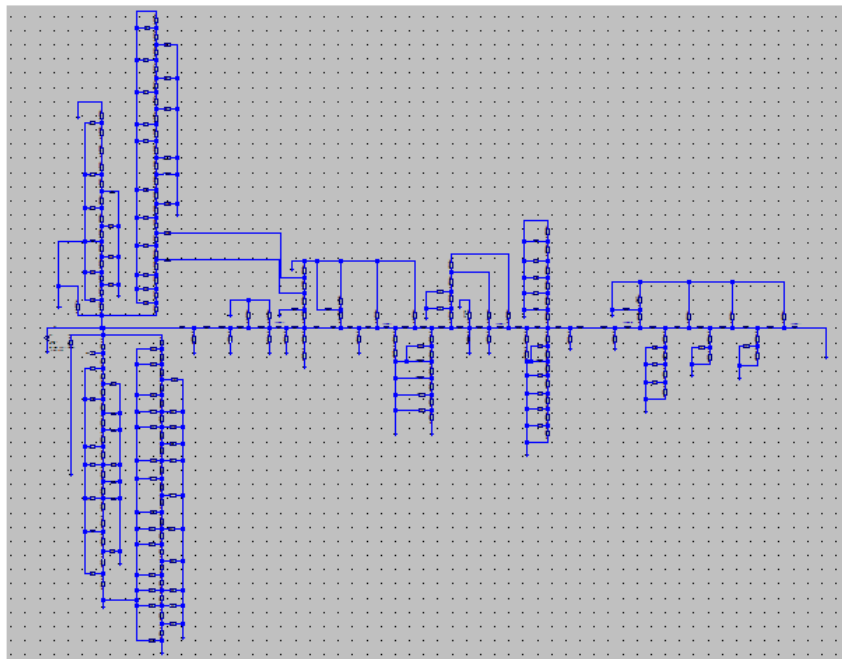


Figura 49 Modelização da folha *Ficus Carica* (Folha de Figueira) sem fugas

Capítulo 5

5 Simulação e análise.

Para estudar o comportamento dos modelos obtidos a impulsos eléctricos recorreu-se a *software* de simulação e análise de circuitos.

5.1 Tipos de *software* de simulação disponíveis e sua selecção.

Pretende-se com os modelos a implementar, estudar a curva, U/I em função da frequência, sendo para o efeito necessário utilizar algum *software* de simulação de circuitos, capaz de lidar com malhas de alguma complexidade. Existem vários *softwares* capazes de efectuar esta tarefa com maior ou menor potencialidade e utilização mais ou menos acessível. Entre os quais, salienta-se o 20Sim, o Simulink do Matlab e o LTSpice. Este último vocacionado especialmente para circuitos eléctricos e electrónicos que executa as tarefas pretendidas.

Assim, de entre eles, optou-se pelo LTSpice por se verificar ser de actualização bastante intuitiva e depois de compreender as suas particularidades, simples de utilizar e simular. A implementação dos circuitos funciona como se tratasse de uma montagem em “*Breadboard*”, a apresentação de resultados no que respeita às curvas resultantes é configurável e a exportação de valores para um ficheiro de texto é simples, útil e possibilita impressões tanto das curvas como dos circuitos.

5.2 Organização dos modelos para análise.

Optou-se por simular os modelos a analisar subdividindo os seus circuitos para desta forma se poder analisar como a variação da impedância de entrada com a frequência, $U/I_{(f)}$ evolui com a complexidade do modelo.

Para a amostra da folha de Citrus Sinensis, (Folha de laranja), tomou-se o ramo principal e dividiu-se em seis partes, cada uma com os seguintes elementos, ilustrados pelo quadro abaixo representado.

Sector	Subdivisão	Nº de ramos	Gama
1	1/6	6	1...6
2	2/6	6	7...12
3	3/6	6	13...18
4	4/6	6	19...24
5	5/6	6	25...30
6	6/6	4	31...34

Tabela 5 Divisão do circuito Citrus Sinensis

Para esta amostra, efectuaram-se as seguintes simulações cujos circuitos se apresentam a seguir. Para tornar esta exposição menos pesada, serão representados apenas os circuitos sem fugas. O seu correspondente com fugas é análogo, contendo apenas mais duas variáveis, a resistência hidráulica de fugas e a capacidade hidráulica de fugas. Mas como são representadas por um bloco, a sua configuração é idêntica.

Por uma questão de simplicidade, não se representarão todos os circuitos correspondentes a cada uma das fases considerada, mas assim os passos mais significativos.

A figura 50 representa a fase inicial, ou seja o tronco de nervura principal, composto como se pode verificar pelas impedâncias em série ilustradas no circuito.

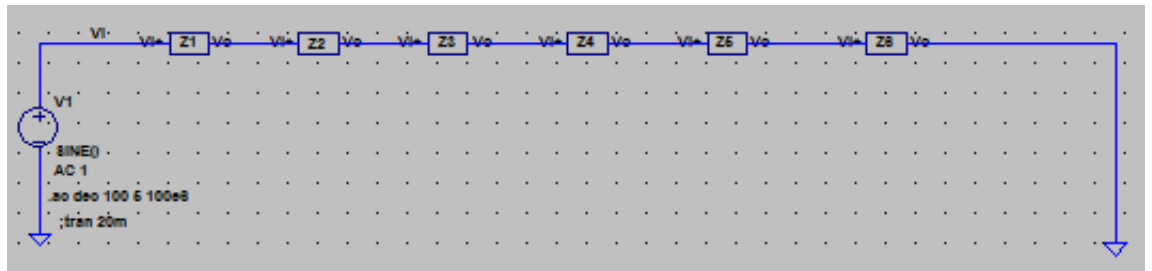


Figura 50 Citrus Sinensis Sector 1A

A figura 51 correspondente á fase 2A ilustra a anexação de algumas malhas em paralelo com o ramo principal, trazendo um nível maior de complexidade no modelo.

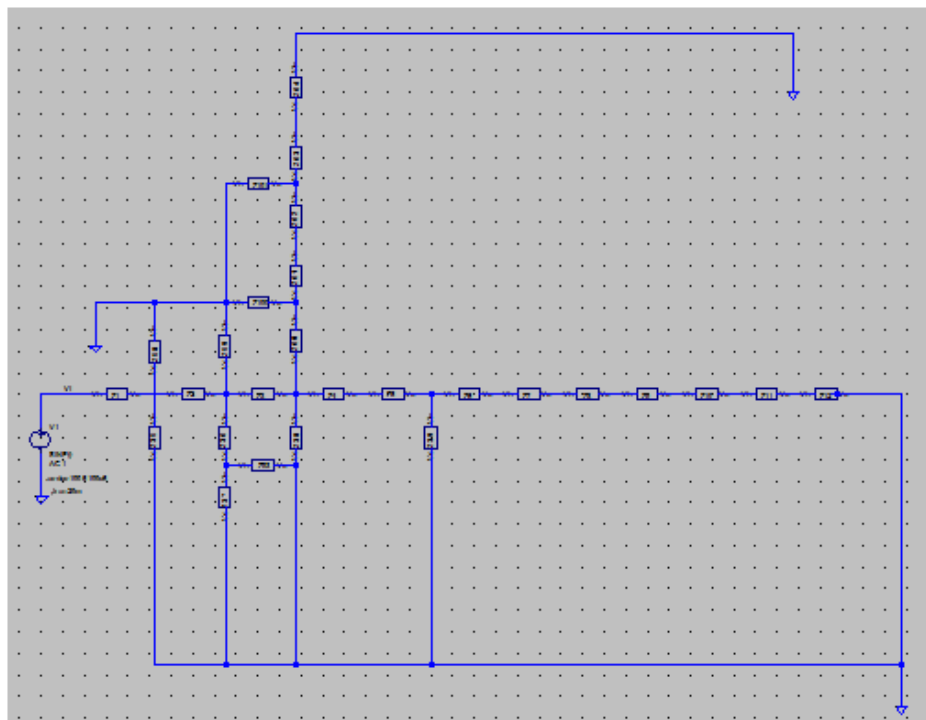


Figura 51 Citrus Sinensis Sector 2A

A figura 52 representa a fase 3A que corresponde ao nível seguinte de complexidade, com mais algumas malhas inseridas em paralelo, aumentando ainda mais o grau de complexidade do modelo.

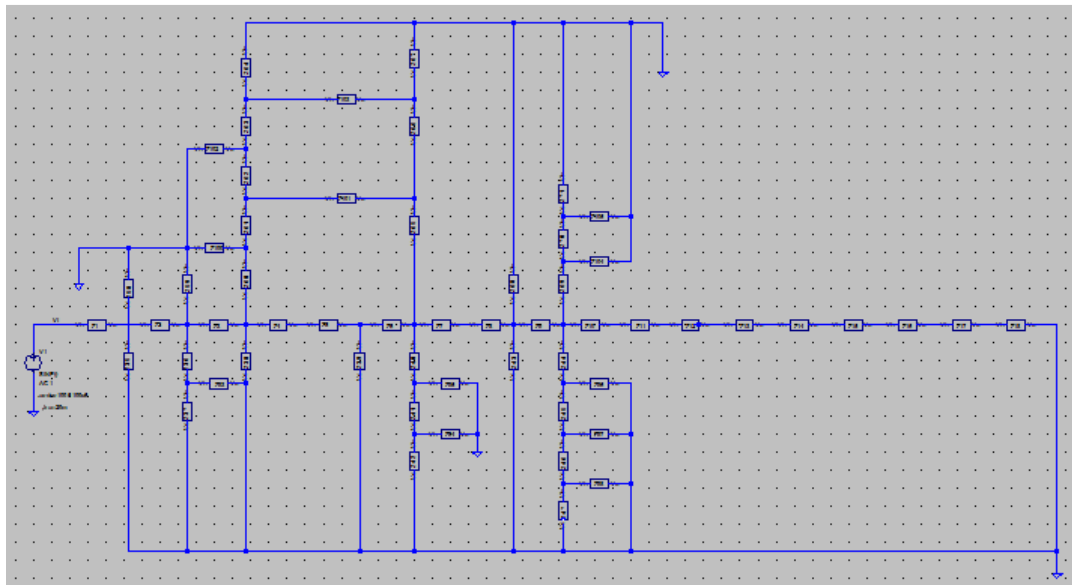


Figura 52 Citrus Sinensis Sector 3A

A figura 53 corresponde á fase 4A na qual como se pode verificar são introduzidas mais malhas em paralelo no modelo.

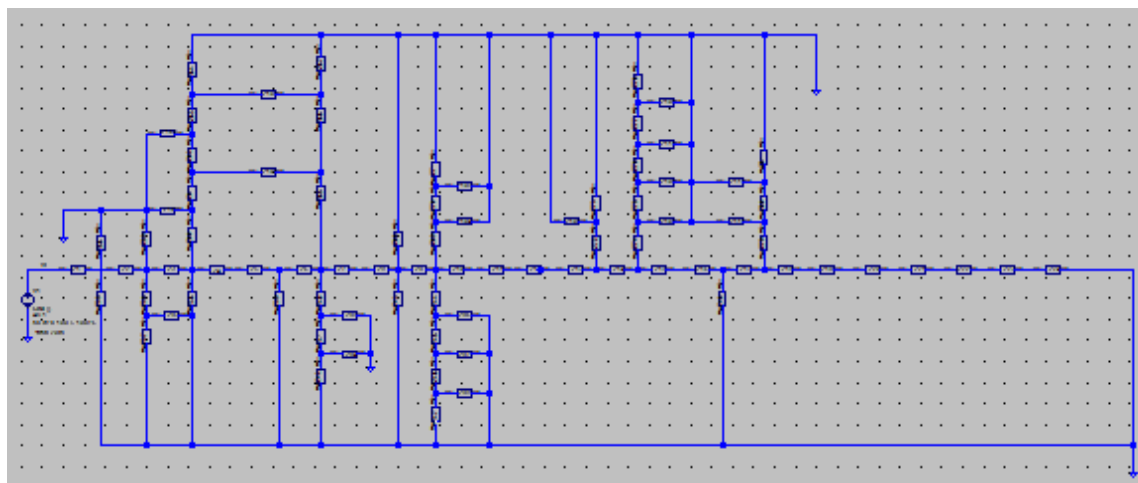


Figura 53 Citrus Sinensis Sector 4A

A figura 54 representa a última fase, ou seja, o modelo completo com todas as suas nervuras que tenham sido consideradas para incorporar este modelo.

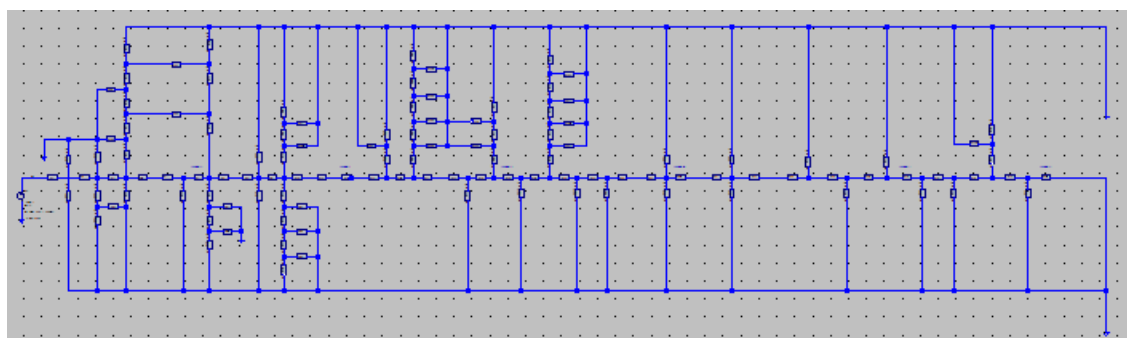


Figura 54 Citrus Sinensis Sector 6C

Para o modelo Cersis Silliquestrum, (Folha de olaia), o ramo principal foi subdividido em três partes, consideraram-se assim as seguintes divisões.

Sector	Subdivisão	Nº de ramos	Gama
1	1/3	4	1...4
2	2/3	4	5...8
3	3/3	2	9...10

Tabela 6 Divisão do circuito Cersis Silliquestrum

Os circuitos respeitantes a cada uma das simulações foram os seguintes. Pelas mesmas razões citadas acima, são representados os circuitos sem fugas. A figura 55 representa a primeira fase que corresponde ao ramo principal.

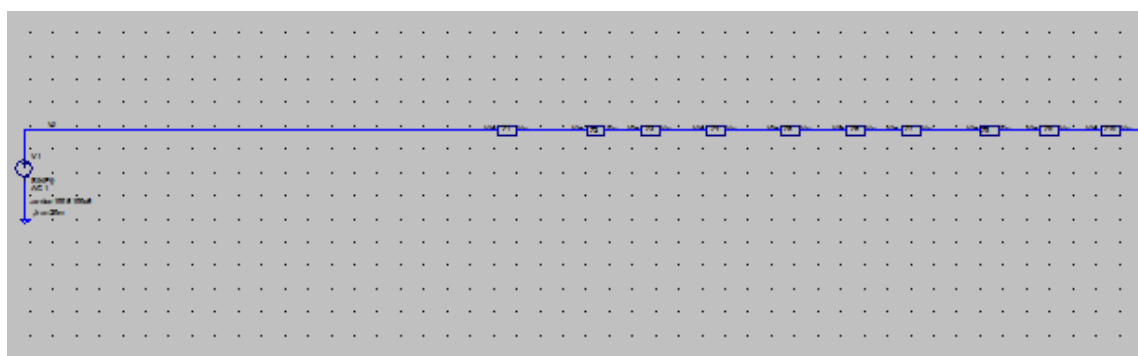


Figura 55 Cersis Silliquestrum Sector 1A

A figura 56 representada abaixo ilustra o sector 2, que corresponde á introdução de várias malhas no modelo, constituindo um circuito de maior complexidade.

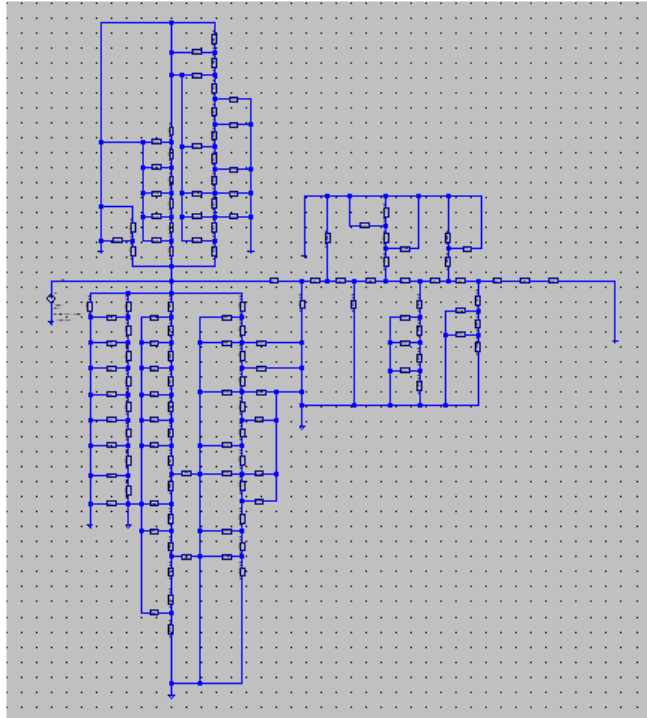


Figura 56 Cersis Silliquestrum Sector 2

A figura 57 representa o estágio final do modelo, ou seja, o circuito completo representando todas as nervuras que foram consideradas para esta amostra.

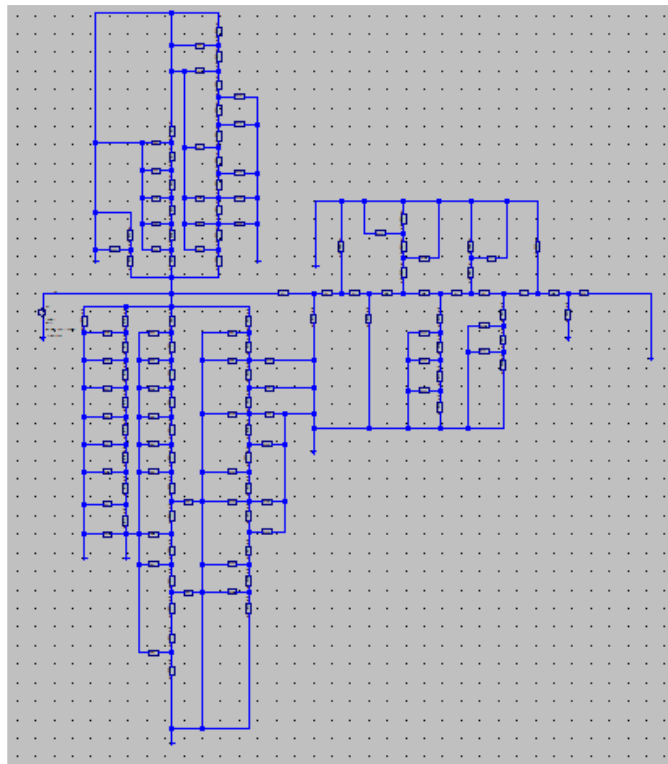


Figura 57 Cersis Silliquestrum Sector 3

Para o modelo da folha Ficus Carica, (Folha de figueira), consideraram-se as seguintes subdivisões representadas na tabela abaixo.

Sector	Subdivisão	Nº de ramos	Gama
1	1/3	4	1...4
2	2/3	4	5...8
3	3/3	2	9...10

Tabela 7 Divisão do circuito Ficus Carica

Os circuitos respeitantes a cada uma das simulações, para esta amostra foram os seguintes. Pelas mesmas razões citadas anteriormente são representados os circuitos sem fugas. A figura 58 representa as impedâncias consideradas apenas pelo ramo principal.

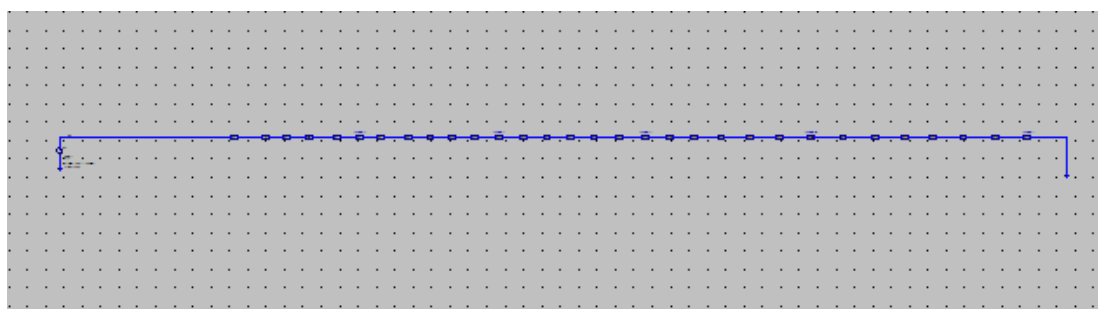


Figura 58 Ficus Carica Sector 1A

A figura 59 representa a fase considerada pelo sector 3, para o qual são incluídas malhas em paralelo, aumentando assim a complexidade do modelo.

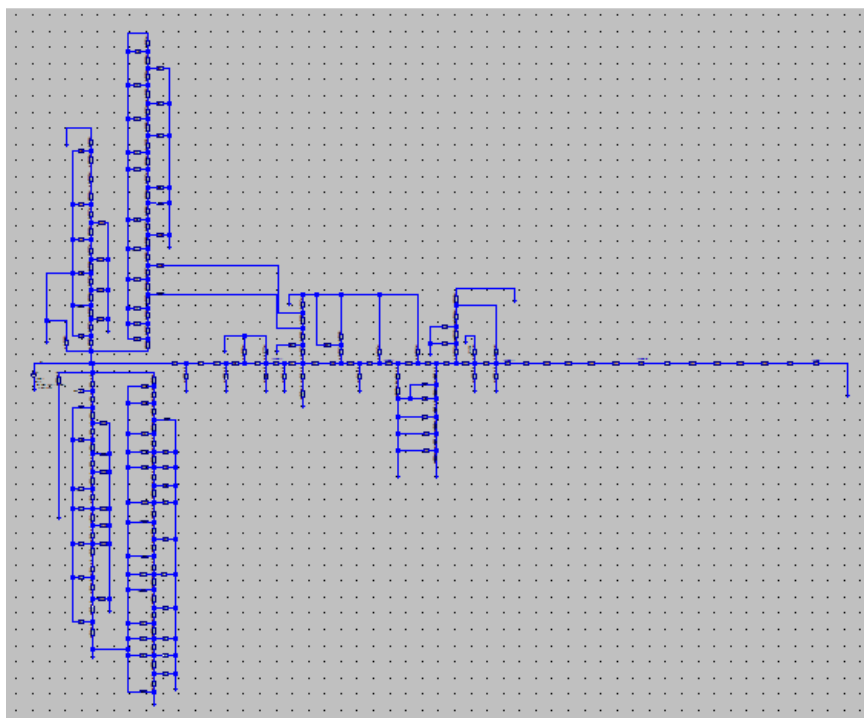


Figura 59 Ficus Carica Sector 3

A figura 60 representa a fase final, no qual são representadas todas as impedâncias consideradas para esta amostra.

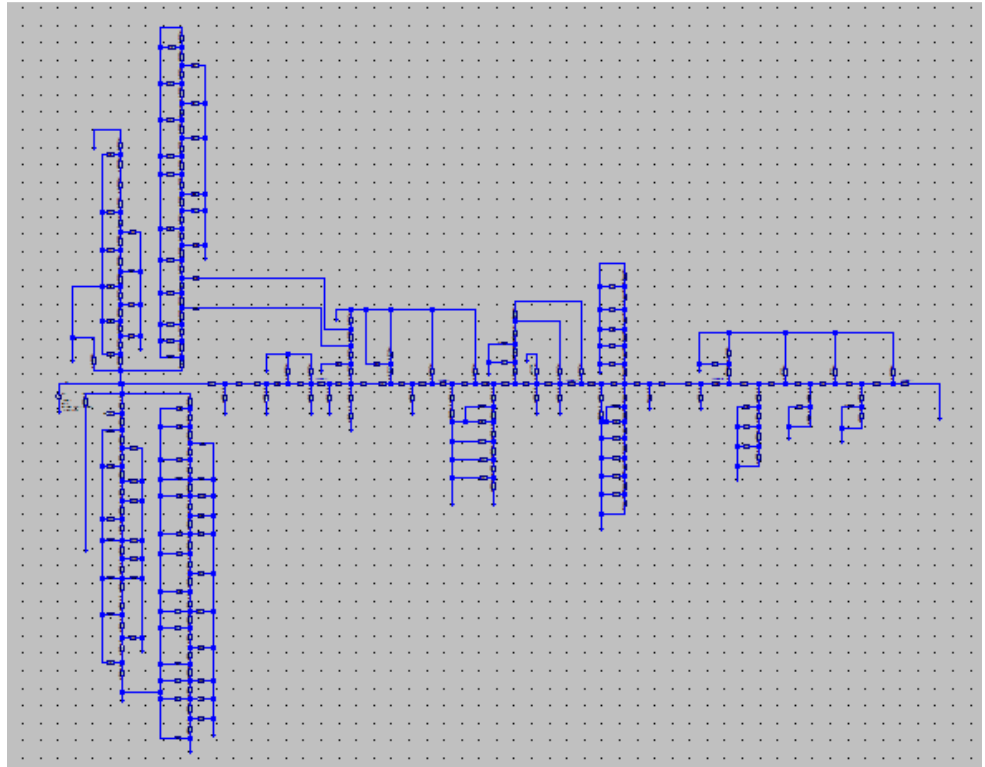
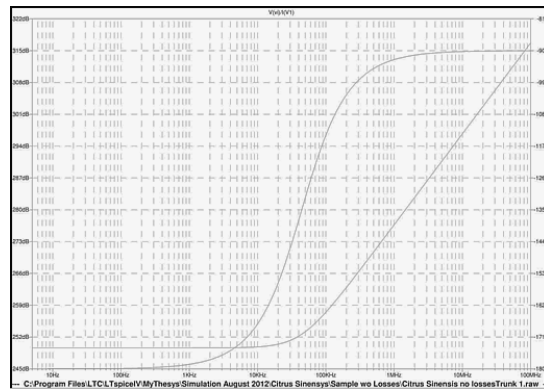


Figura 60 Ficus Carica Sector 5

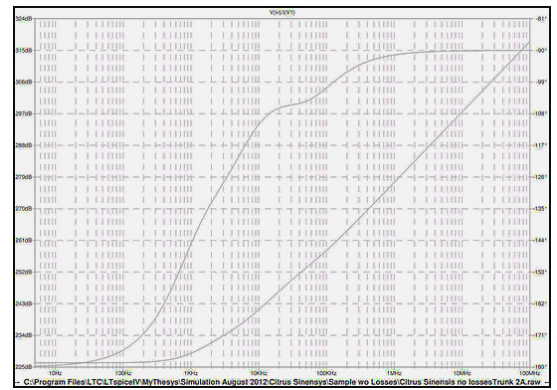
5.3 Curvas obtidas por simulação.

A seguir apresentam-se algumas das curvas resultantes da simulação dos modelos para os modelos implementados sem fugas e com fugas. Não serão representadas todas as curvas, mas aquelas em que se considera ter ocorrido uma variação relativamente á curva anterior.

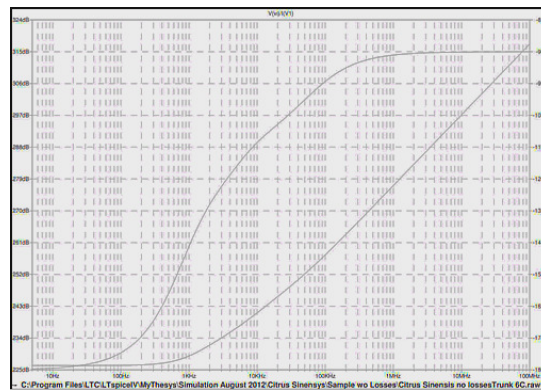
A figura 61 ilustra algumas das curvas obtidas pela simulação dos modelos implementados para os circuitos sem fugas.



Curva 1 Citrus Sinensis Sector 1A



Curva 2 Citrus Sinensis Sector 2A



Curva 3 Citrus Sinensis Sector 6C

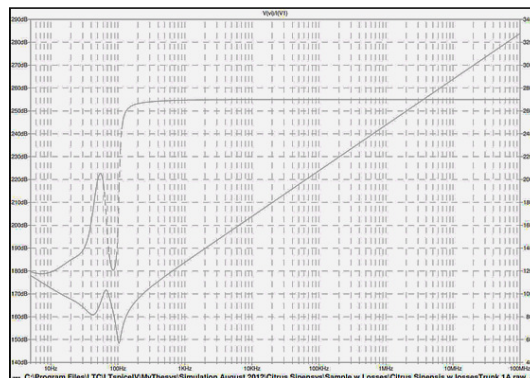
Figura 61 Curvas de circuitos sem fugas (Citrus Sinensis)

Na tabela 16, representada abaixo estão listadas as frequências de corte e respectivas impedâncias das curvas representadas.

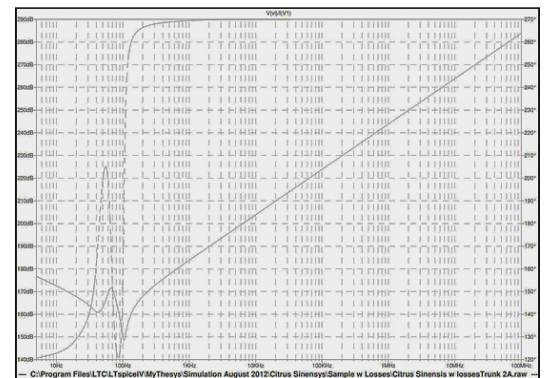
Sector	Freq. de corte (KHz)	Impedância (Ohm)
1A	76.6	5.99e12, -120°
1B	1.82	4.34e11, -135°
2A	2.13	4.08 e11 -132°
6C	2.11	4.06e11, -132°

Tabela 8 Observação de resultados Citrus Sinensis (sem fugas)

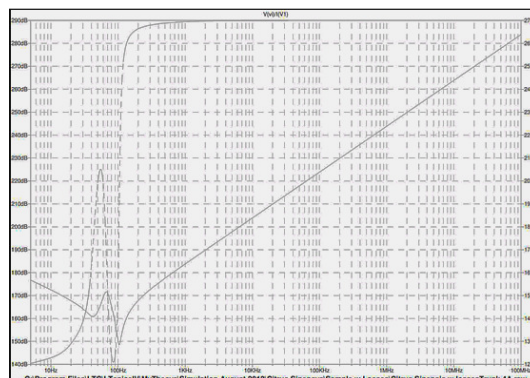
Para o caso dos modelos com fugas, as curvas mais significativas são ilustradas na figura 62 para alguns dos circuitos.



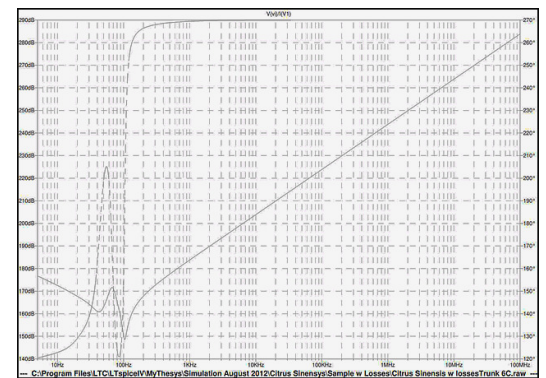
Curva 5 Curva Citrus Sinensis Sector 1A



Curva 6 Curva Citrus Sinensis Sector 2A



Curva 7 Curva Citrus Sinensis Sector 4A



Curva 8 Curva Citrus Sinensis Sector 6C

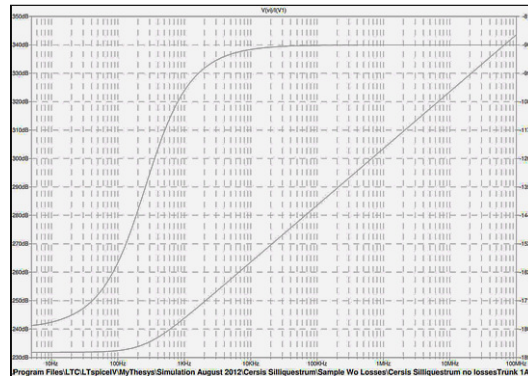
Figura 62 Curvas de circuitos com fugas (Citrus Sinensis)

Na tabela 17, representada abaixo estão listadas as frequências de corte e respectivas impedâncias das curvas representadas.

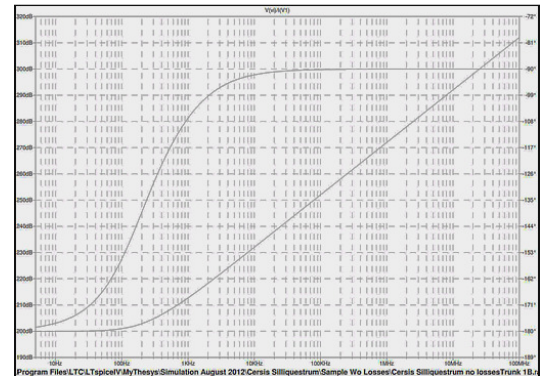
Sector	Z (F = 6Hz)	Ponto A (Hz)	Ponto B (Hz)	Ponto C (Hz)
1A	6.73e8, 118°	43.48	67.36	104.36
2A	6.04e8, 121°	42.9	67.36	104.36
4A	6.04e8, 121°	42.9	67.36	104.36
6A	6.04e8, 121°	42.9	67.36	104.36
Freq Corte (Hz)			154.00	

Tabela 9 Observação de resultados Citrus Sinensis com fugas

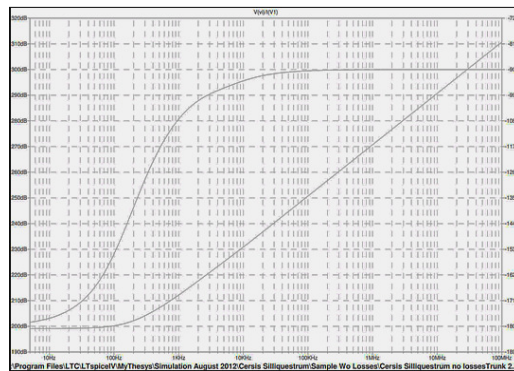
Das amostras da folha *Cersis Silliquestrum* obtiveram-se as seguintes curvas, cujas mais significativas são representadas abaixo na figura 63



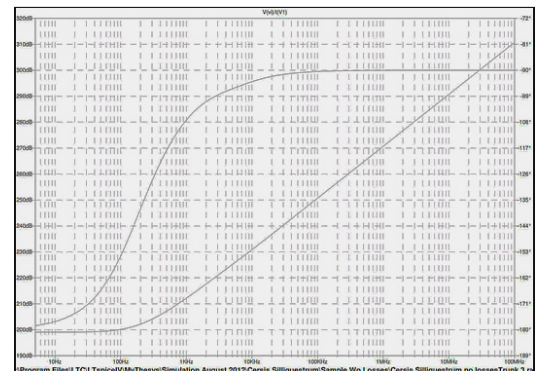
Curva 9 Curva Cersis Silliquestrum 1A



Curva 10 Curva Cersis Silliquestrum 1B



Curva 11 Curva Cersis Silliquestrum 2



Curva 12 Curva Cersis Silliquestrum 3

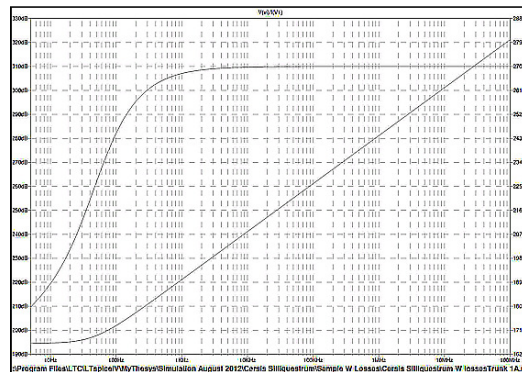
Figura 63 Curvas de circuitos sem fugas (*Cersis Silliquestrum*)

Na tabela 18, representada abaixo estão listadas as frequências de corte e respectivas impedâncias das curvas representadas.

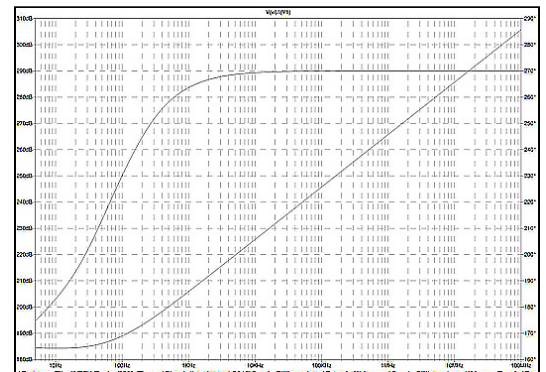
Sector	Freq. de corte (KHz)	Impedância (Ohm)
1A	449.62	7.76e11, -120°
1B	378.18	2e10, -124°
2	363.38	1.8e10, -124
3	358.57	1.78e10, -124

Tabela 10 Observação de resultados *Cersis Silliquestrum* (sem fugas)

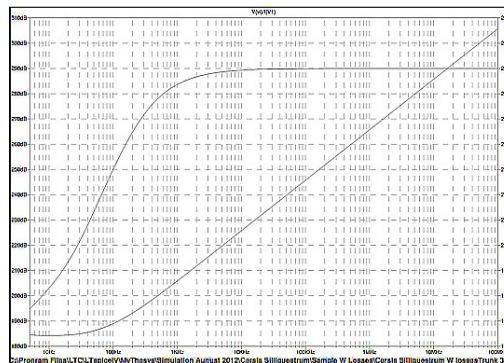
Para as amostras da folha *Cersis Silliquestrum*, respectivamente ao modelo com fugas, obtiveram-se as seguintes curvas, cujas mais significativas são representadas abaixo na figura 64.



Curva 9 Curva Cersis Silliquestrum 1A



Curva 10 Curva Cersis Silliquestrum 1B



Curva 11 Curva Cersis Silliquestrum 3

Figura 64 Curvas de circuitos com fugas (Cersis Silliquestrum)

Na tabela 19, representada abaixo estão listadas as frequências de corte e respectivas impedâncias das curvas representadas.

Sector	Freq. de corte (KHz)	Impedância (Ohm)
1A	449.63	5.09e10, -96°
1B	378.18	7.83e9, -105°
3	363.37	7.51e9, -105°

Tabela 11 Observação de resultados Cersis Silliquestrum (com fugas)

Para as amostras de Ficus Carica foram obtidas as seguintes curvas que a seguir se apresentam para os modelos sem fugas e com fugas. Na figura 65, representada a seguir, ilustram-se os resultados obtidos.

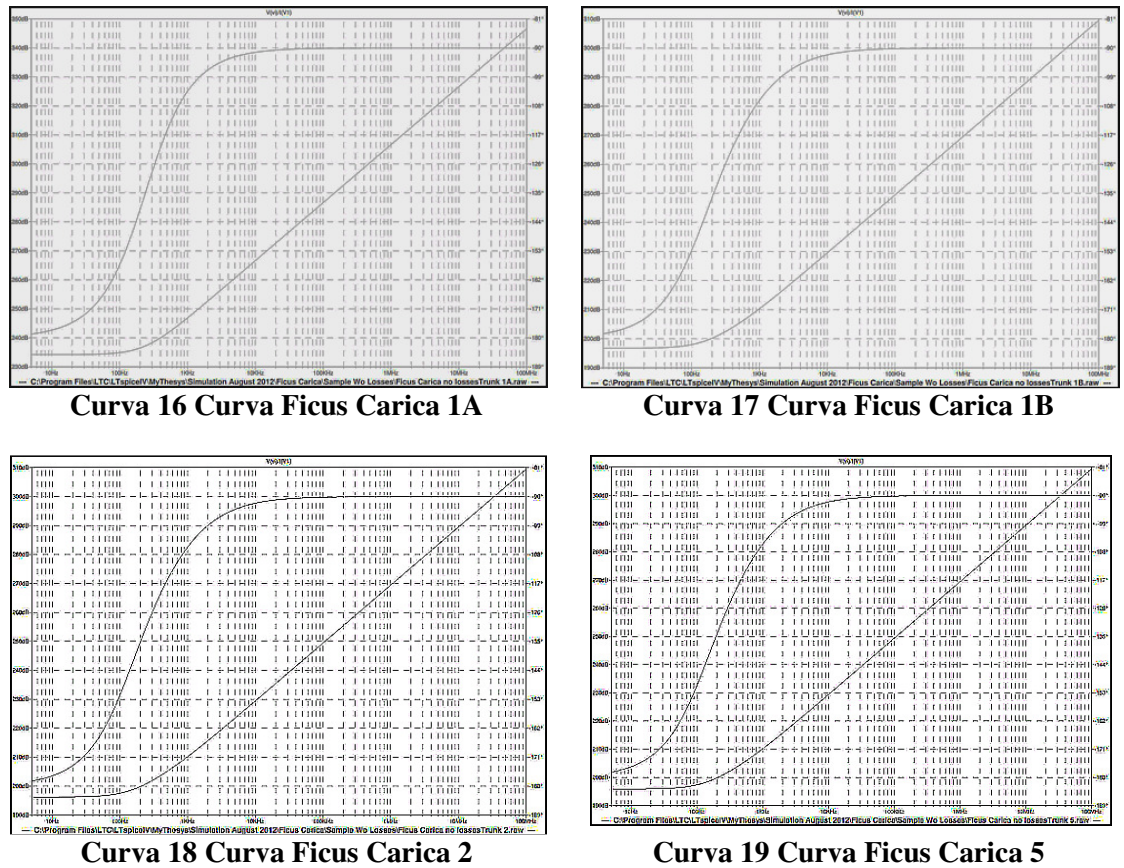


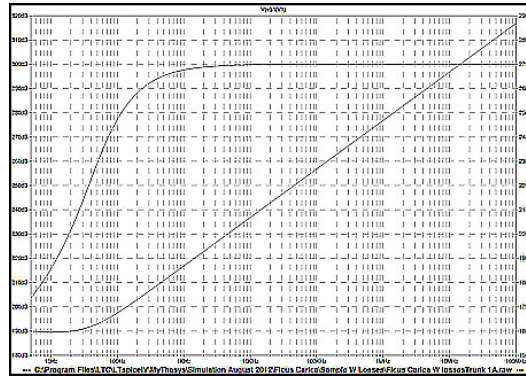
Figura 65 Curvas de circuitos sem fugas (Ficus Carica)

Na tabela 20, representada abaixo estão listadas as frequências de corte e respectivas impedâncias das curvas representadas.

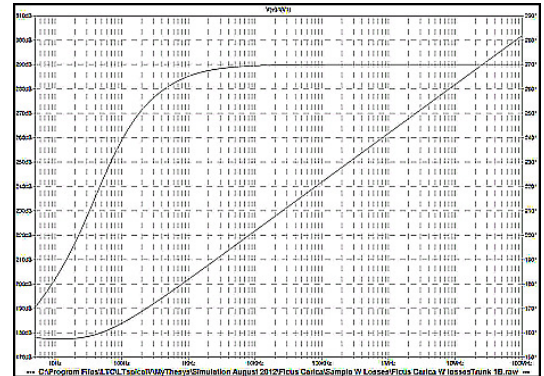
Sector	Freq. de corte (KHz)	Impedância (Ohm)
1A	405.11	1.00e12, -121°
1B	331.05	1.37e10, -124°
2	322.35	1.29e10, -124
5	305.64	1.27e10, -124

Tabela 12 Observação de resultados Ficus Carica (sem fugas)

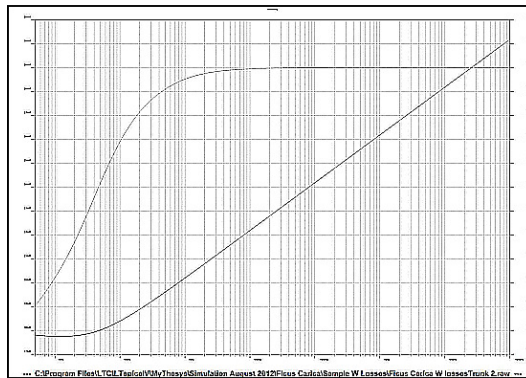
Para as amostras de Ficus Carica, relativamente aos circuitos com fugas, as curvas obtidas são representadas na figura 66.



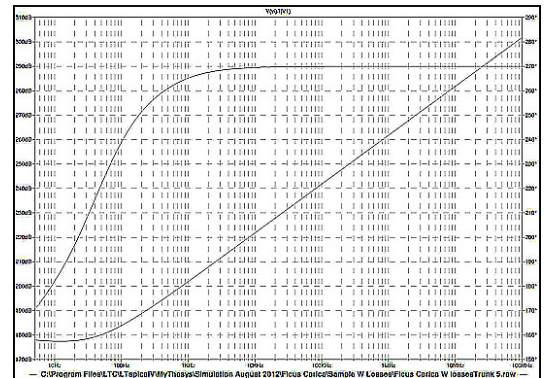
Curva 20 Curva Ficus Carica 1A



Curva 21 Curva Ficus Carica 1B



Curva 22 Curva Ficus Carica 2



Curva 23 Curva Ficus Carica 5

Figura 66 Curvas de circuitos com fugas (Ficus Carica)

Na tabela 21, representada abaixo estão listadas as frequências de corte e respectivas impedâncias das curvas representadas.

Sector	Freq. de corte (KHz)	Impedância (Ohm)
1A	76.92	5.29e9, -120
1B	93.85	1.48e9, -123
5	93.85	1.48e9, -122

Tabela 13 Observação de resultados Ficus Carica (com fugas)

Capítulo 6

6 Análises

Foram efectuadas análises aos resultados obtidos com vista a estudar o comportamento dos modelos sujeitos a este estudo. A primeira teve como objectivo a observação na zona do joelho das curvas geradas. A outra teve como objectivo analisar como evolui a impedância do modelo com o aumento da complexidade do mesmo.

6.1 Comportamento dos modelos na zona do joelho da curva

Efectuou-se uma análise de linha de tendência na zona do joelho da curva aos modelos simulados. Os dados foram obtidos do LTSpice, em ficheiro de texto e importados em folha de cálculo em excel, a partir da qual e com alguma manipulação dos dados, se obteve o curva $U/I_{(f)}$,

Foi efectuada uma análise de linha de tendência do tipo potência, $y = ax^b$. Para esta análise limitaram-se os valores á zona do joelho da curva de forma a se analisar o comportamento do modelo nesta zona.

De seguida, vão-se apresentar as análises de tendência que foram efectuadas para cada um dos modelos e sub-modelos de cada uma das amostras, para os modelos em que se não consideram as fugas e aqueles em que estas são consideradas. No final de cada grupo apresenta-se um quadro resumo com os resultados das análises.

Para a amostra da folha Citrus Sinensis, (folha de laranjeira), os resultados são os seguintes para as diferentes fases de simulação até ao modelo completo.

Na Figura 67 e seguintes, ilustram-se os resultados obtidos da análise de tendência para os diversos modelos implementados.

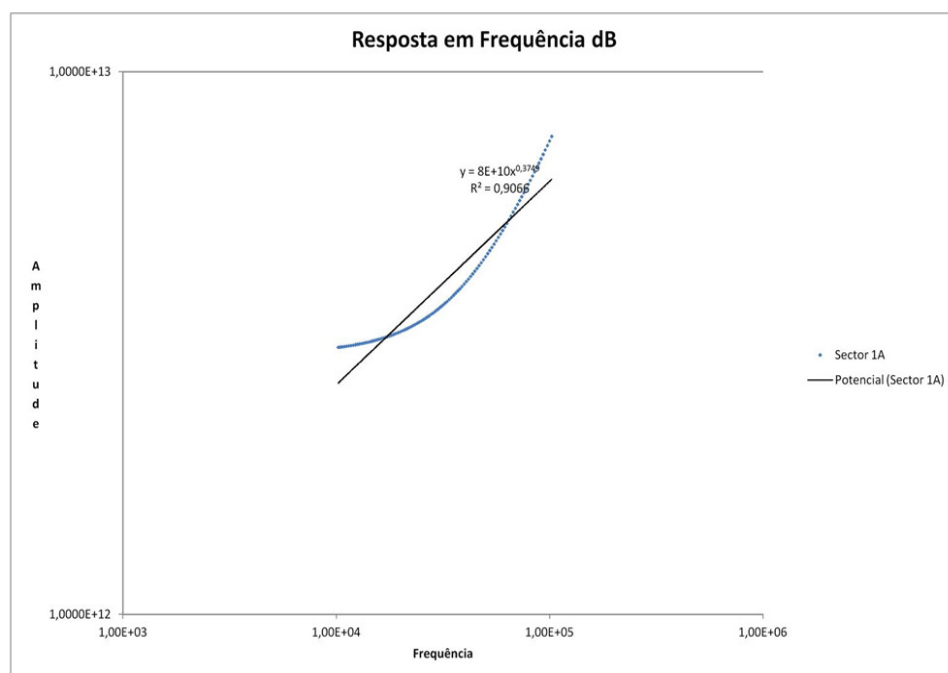


Figura 67 Análise de tendência Citrus Sinensis 1A (sem fugas)

Por motivos de simplicidade de apresentação não são apresentadas todas as curvas, mas sim algumas delas, apresentando-se os resultados na tabela 22. A figura 68 ilustra o resultado da análise de tendência efectuada ao modelo 2C.

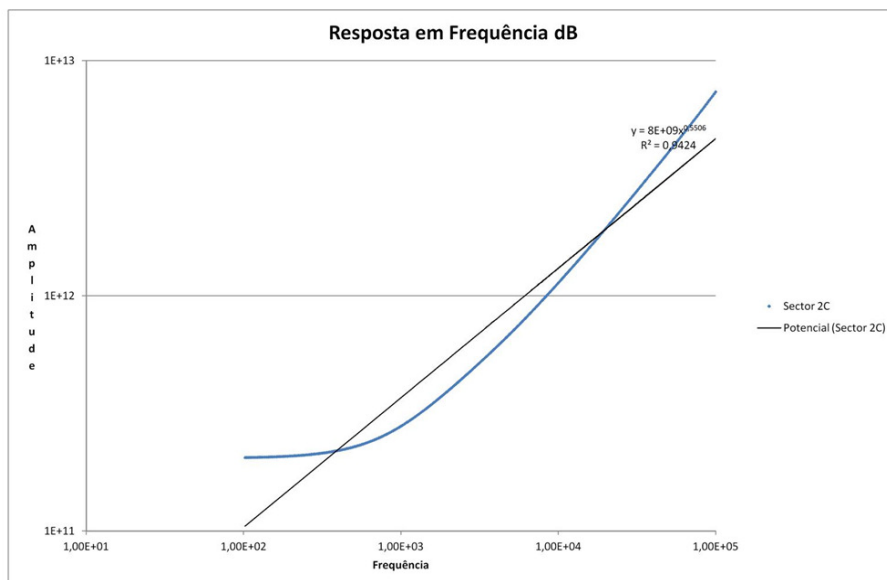


Figura 68 Análise de Tendência Citrus Sinensis 2C (sem fugas)

Seguidamente, a figura 69 apresentada a seguir são ilustradas as fases mais avançadas da simulação, correspondendo aos modelos com maior número de malhas inseridas.

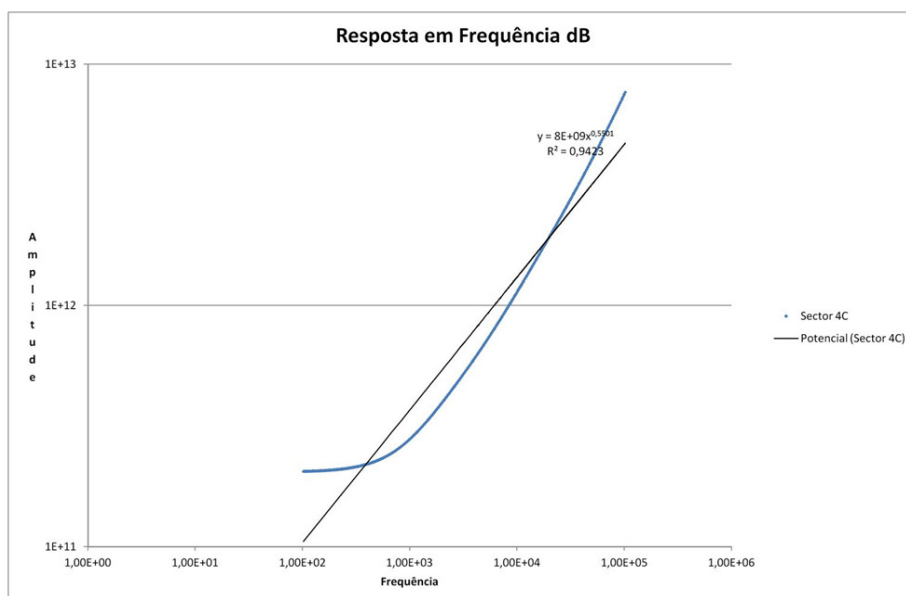


Figura 69 Análise de Tendência Citrus Sinensis 4C (sem fugas)

A figura 70, ilustrada a seguir, apresenta a análise de tendência referente à camada mais complexa do modelo, correspondendo ao modelo completo, com todos os elementos de impedância que foram considerados para este modelo.

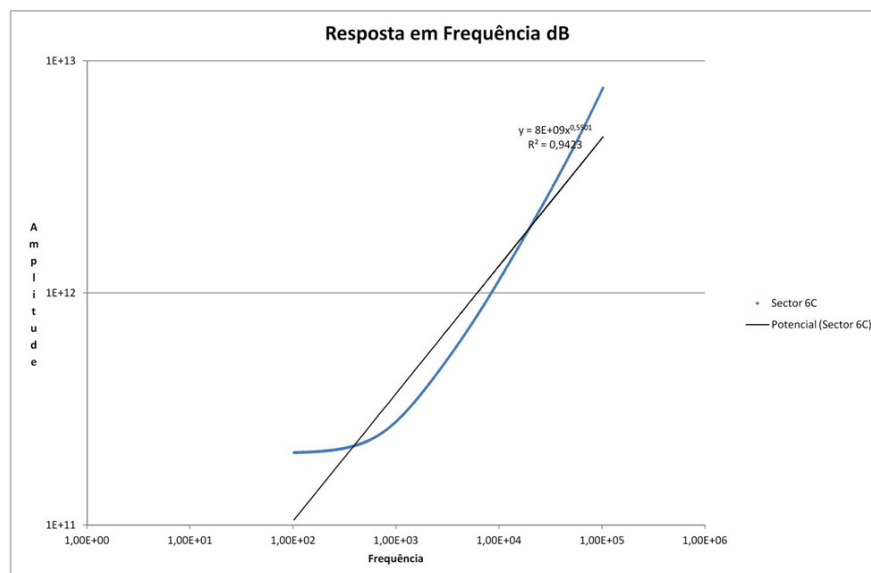


Figura 70 Análise de Tendência Citrus Sinensis 6C (sem fugas)

Na tabela 22, representada abaixo visualiza-se os resultados da análise de tendência para os estágios considerados para este modelo o qual, neste caso, não contempla as fugas.

Sector	Lim A (KHz)	Lim B (KHz)	Coef a	Coef b	R ²
1A	10	100	8e10	0.7213	0.9541
1B	0.1	100	2e10	0.3749	0.9006
1C	0.1	10	2e10	0.421	0.8945
2C	0.1	10	8e9	0.3912	0.9454
3C	0.1	10	8e9	0.5506	0.9422
4C	0.1	10	8e9	0.5503	0.9423
5C	0.1	10	8e9	0.5501	0.9423
6C	0.1	10	8e9	0.5501	0.9423

Tabela 14 Resultados da análise de tendência Citrus Sinensis (sem fugas)

A seguir, apresenta-se a mesma análise para o modelo da folha Citrus Sinensis, (folha de laranjeira), e seus respectivos estágios, neste caso considerando as fugas. Começando pela figura 71 que representa a fase mais simples do modelo.

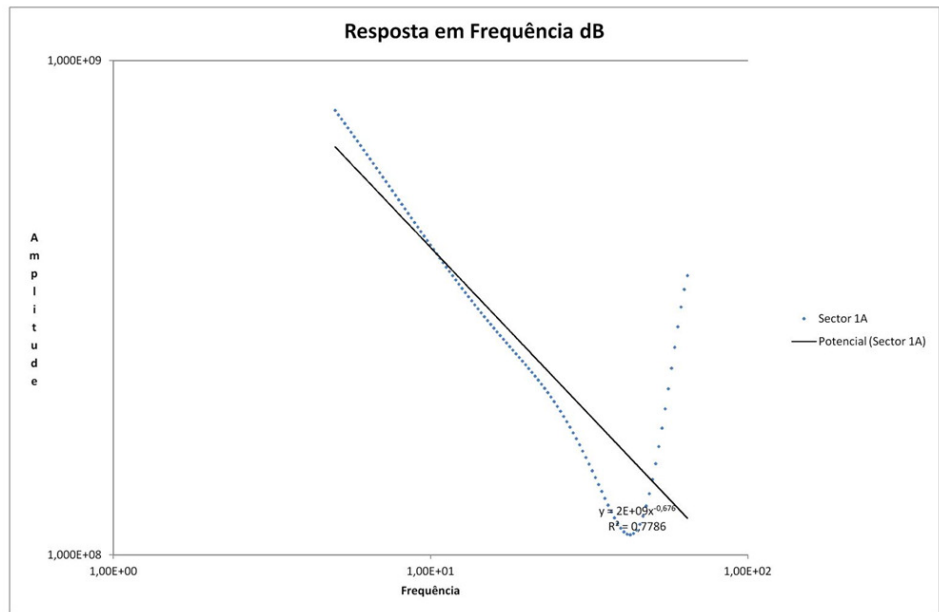


Figura 71 Análise de Tendência Citrus Sinensis 1A (com fugas)

A figura 72 ilustra a fase de complexidade seguinte, representando a camada 2C

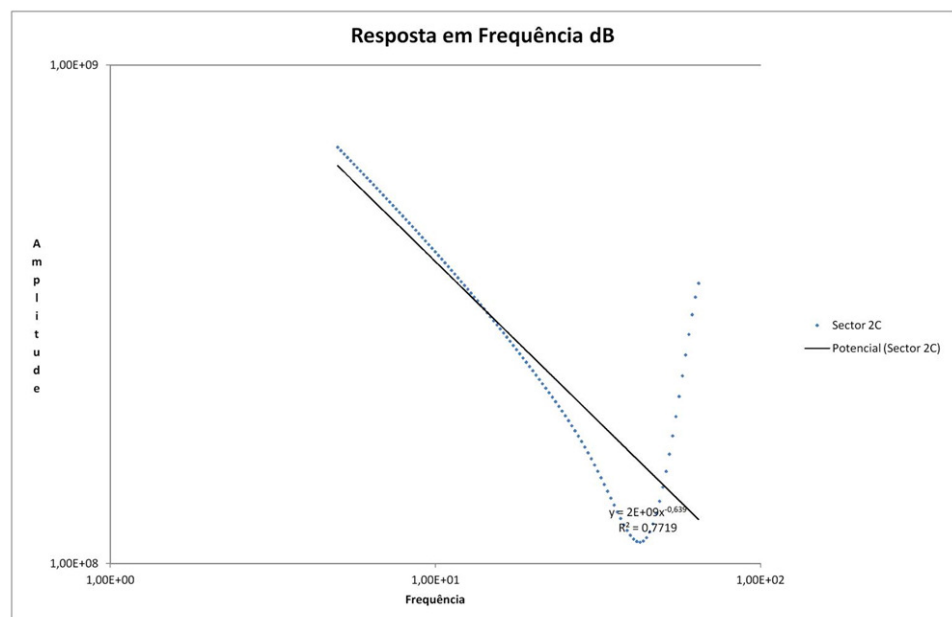


Figura 72 Análise de Tendência Citrus Sinensis 2C (com fugas)

Na figura 73 é ilustrada a fase mais avançada da simulação, correspondendo como anteriormente aos modelos com maior número de malhas inseridas, mas neste caso para o sistema com fugas.

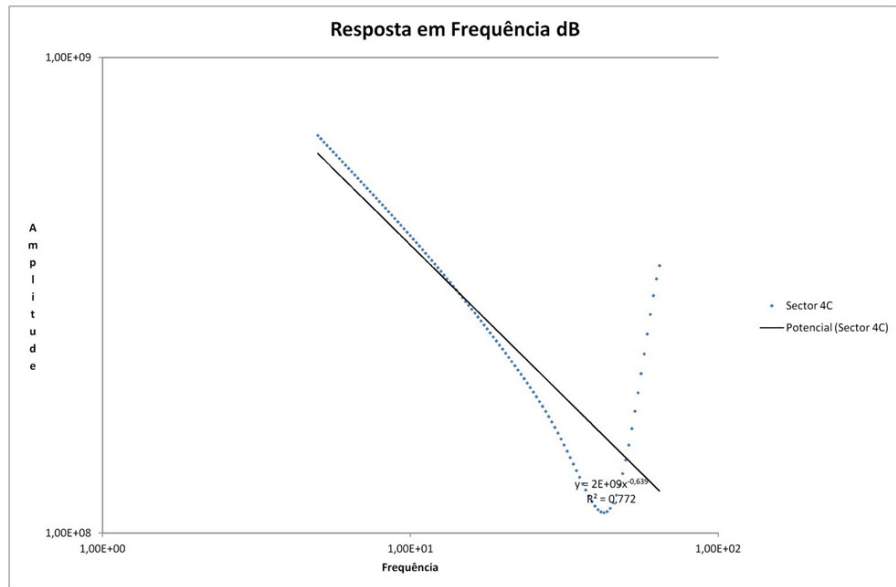


Figura 73 Análise de Tendência Citrus Sinensis 4C (com fugas)

A figura 74, ilustrada a seguir, apresenta a análise de tendência referente à camada mais complexa do modelo, correspondendo ao modelo completo, com todos os elementos de impedância que foram considerados para este modelo.

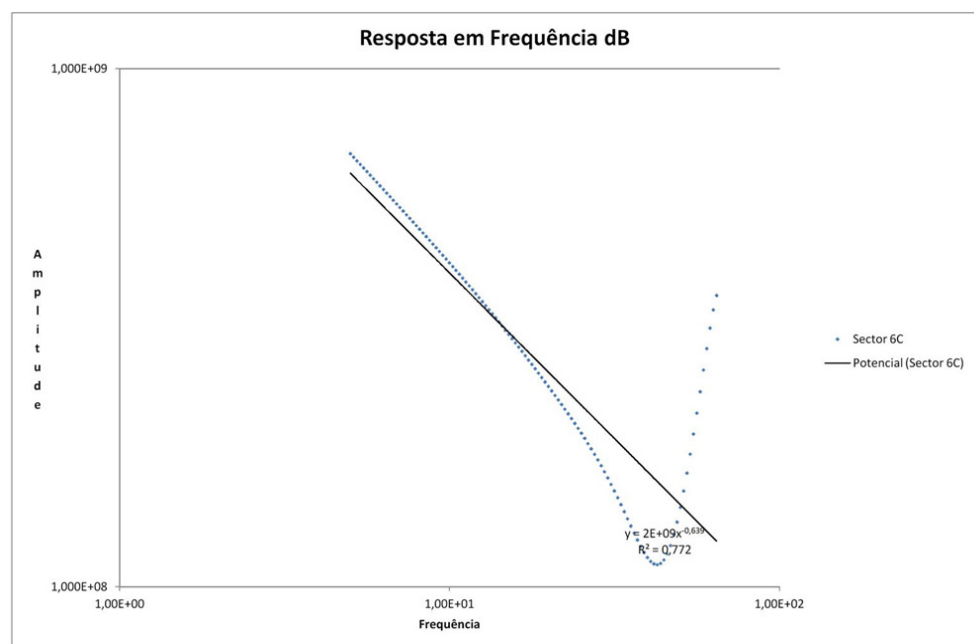


Figura 74 Análise de Tendência Citrus Sinensis 6C (com fugas)

Para os estágios de simulação desta amostra considerando as fugas. Os resultados da análise de linha de tendência estão representados na tabela abaixo.

Sector	Lim A (Hz)	Lim B (Hz)	Coef a	Coef b	R ²
1A	10	64	2e9	-0.676	0.7786
1B	10	64	2e9	-0.673	0.7802
1C	10	64	2e9	-0.673	0.7802
2C	10	64	2e9	-0.639	0.7719
3C	10	64	2e9	-0.639	0.7719
4C	10	64	2e9	-0.639	0.772
5C	10	64	2e9	-0.639	0.772
6C	10	64	2e9	-0.639	0.772

Tabela 15 Resultados da análise de tendência Citrus Sinensis (com fugas)

Para a amostra da folha de *Cersis Siliquastrum*, (folha de olaia), relativamente aos estágios de simulação considerados. Neste caso para o modelo sem fugas, os resultados são apresentados a seguir. Representando-se na figura 75 a fase inicial.

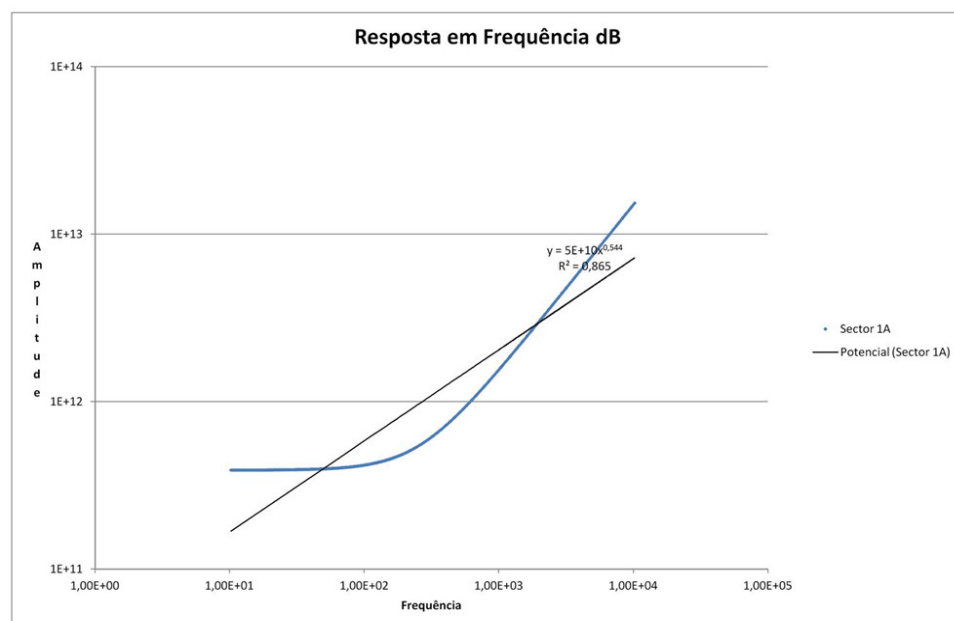


Figura 75 Análise de Tendência Cersis Siliquastrum 1A (sem fugas)

Na figura 76 é ilustrada a fase do processo correspondente à camada mais complexa ou seja, aquela que contém todos os elementos de impedância considerados para este modelo.

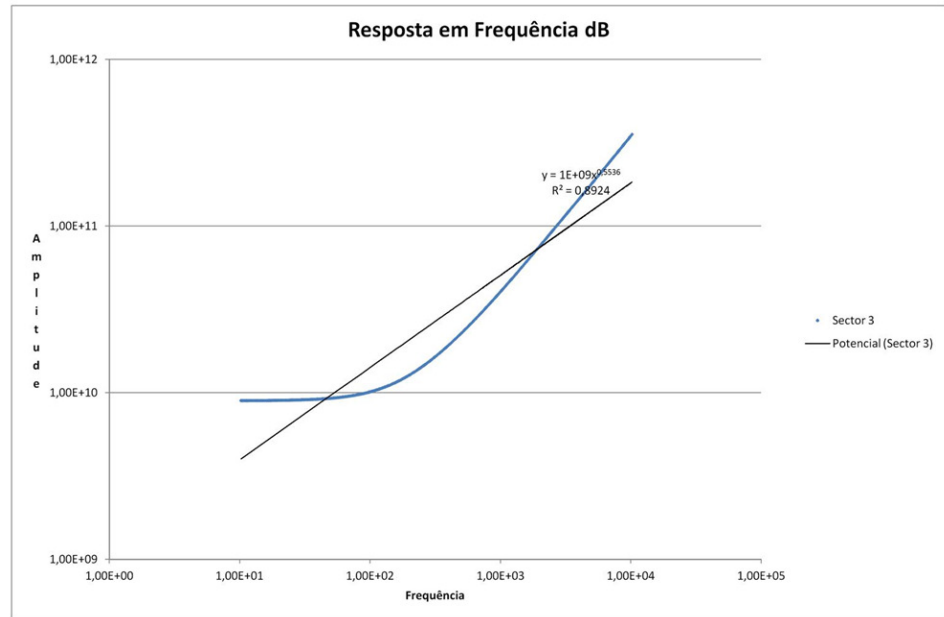


Figura 76 Análise de Tendência Cersis Silliquestrum 3 (sem fugas)

Para o caso do modelo sem fugas, a tabela abaixo apresenta os valores obtidos da análise de linha de tendência.

Sector	Lim A (KHz)	Lim B (KHz)	Coef a	Coef b	R ²
1A	0.01	10	5e10	0.544	0.865
1B	0.01	10	1e9	0.552	0.8855
2	0.01	10	1e9	0.5517	0.8913
3	0.01	10	1e9	0.5536	0.8924

Tabela 16 Resultados da análise de tendência Cersis Silliquestrum (sem fugas)

De seguida, apresentam-se as curvas de análise de linha de tendência efectuadas ao mesmo modelo, folha Cersis Silliquestrum, (folha de olaia), considerando agora as fugas.

A figura 77, representada a seguir, ilustra a camada mais simples dos modelos implementados para este estudo.

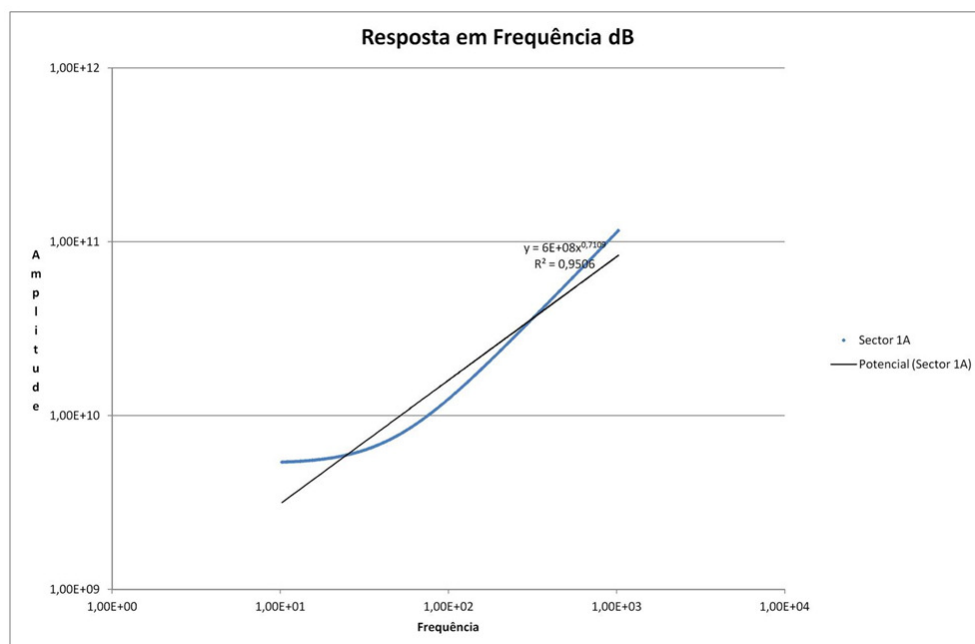


Figura 77 Análise de Tendência Cersis Silliquestrum 1A (com fugas)

A figura 78 ilustra a fase correspondente à camada de maior complexidade, na qual são considerados todos os elementos de impedância considerados para o modelo.

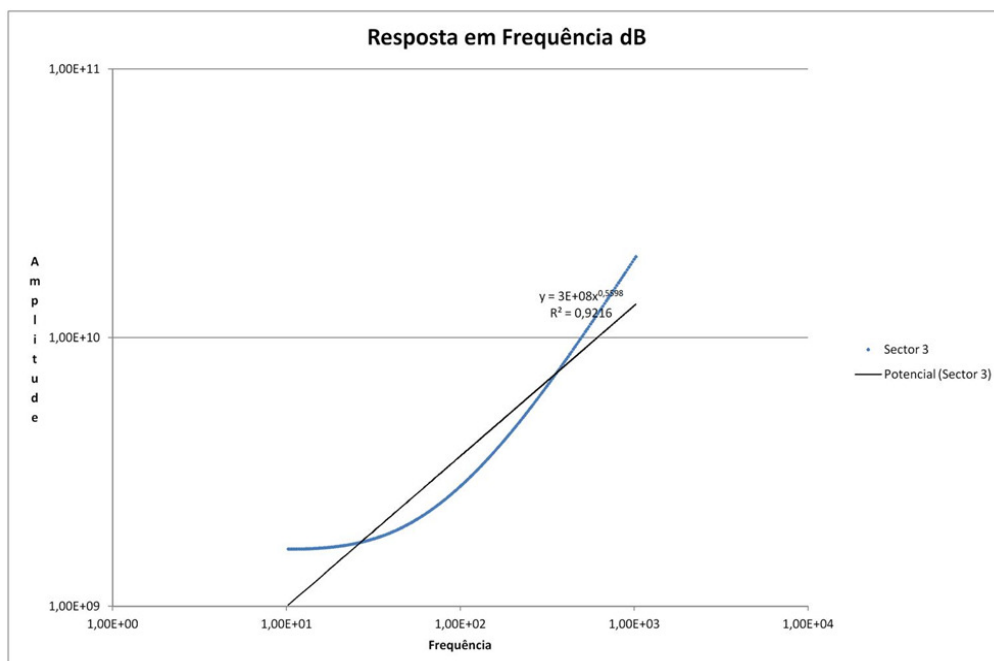


Figura 78 Análise de Tendência Cersis Silliquestrum 3 (com fugas)

Os respectivos valores resultantes da referida análise estão representados na tabela que abaixo se apresenta.

Sector	Lim A (KHz)	Lim B (KHz)	Coef a	Coef b	R ²
1A	0.01	1	6e8	0.7109	0.9506
1B	0.01	1	3e8	0.5598	0.9216
2	0.01	1	3e8	0.5598	0.9216
3	0.01	1	3e8	0.5598	0.9216

Tabela 17 Resultados da análise de tendência Citrus Sinensis (com fugas)

O grupo seguinte apresenta a mesma operação, análise de linha de tendência aos estágios do modelo da folha Ficus Carica, (folha de figueira), numa primeira fase são apresentadas as curvas para o modelo sem fugas, como se pode visualizar na figura 79 para a camada de menor complexidade.

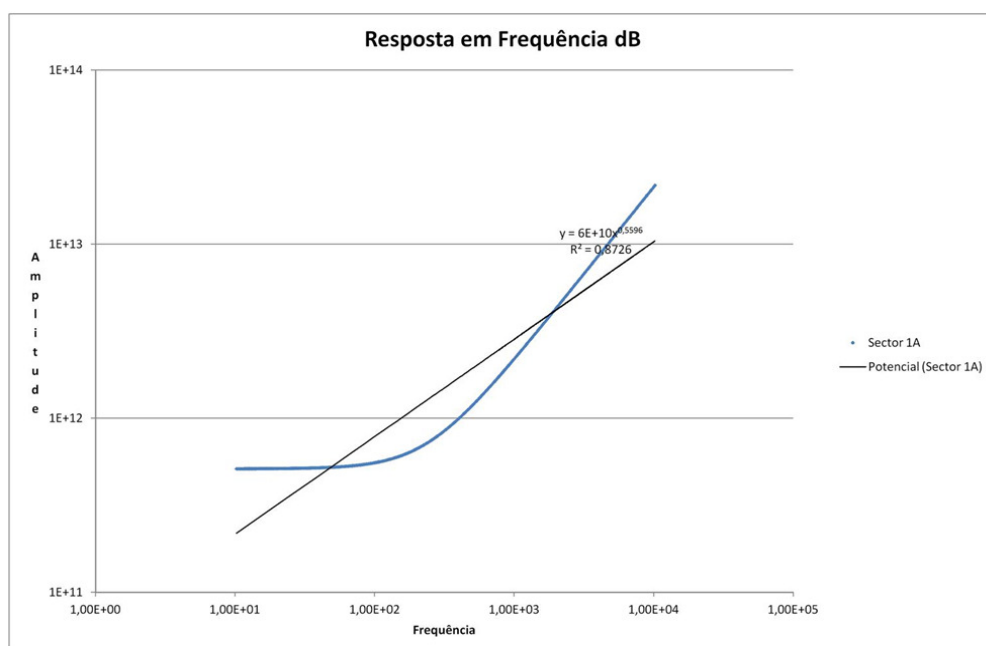


Figura 79 Análise de Tendência Ficus Carica 1A (sem fugas)

E Na figura 80 para o modelo de maior complexidade, onde são considerados todos os elementos de impedância que compõem este modelo.

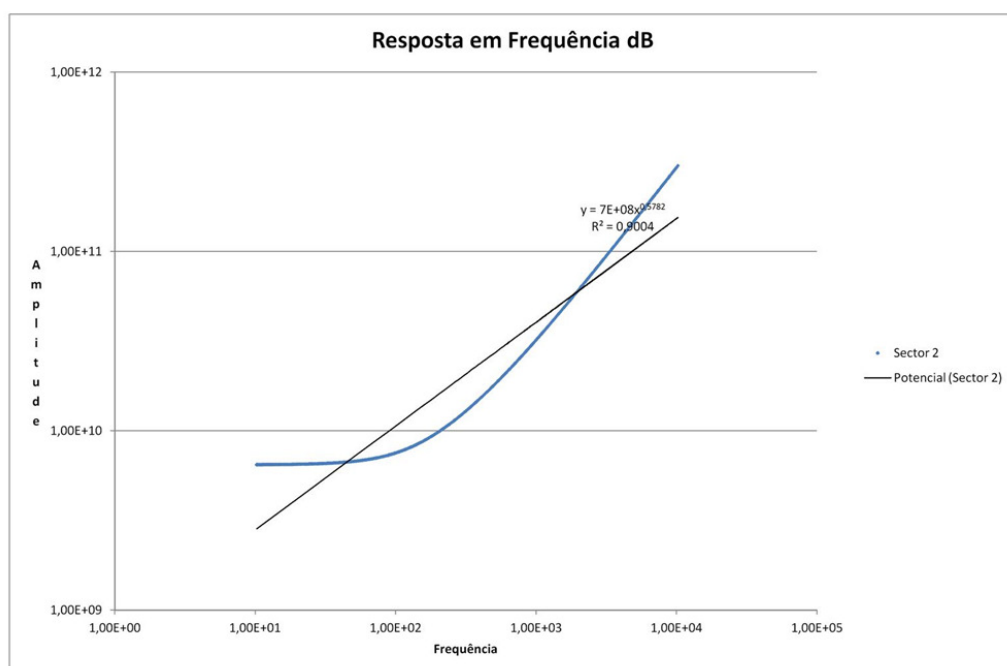


Figura 80 Análise de Tendência Ficus Carica 2 (sem fugas)

Os resultados da análise de linha de tendência efectuada para os estágios considerados para este modelo são apresentados na tabela abaixo.

Sector	Lim A (KHz)	Lim B (KHz)	Coef a	Coef b	R ²
1A	0.01	10	6e10	0.5596	0.8726
1B	0.01	10	8e10	0.5695	0.8965
2	0.01	10	7e10	0.5782	0.9004
3	0.01	10	7e10	0.5824	0.9032
4	0.01	10	7e10	0.5835	0.9041
5	0.01	10	7e10	0.5837	0.9143

Tabela 18 Resultados da análise de tendência Ficus Carica (sem fugas)

Em seguida apresentam-se os resultados para a análise de linha de tendência dos mesmos modelos, folha Ficus Carica considerando as fugas que compõem o modelo. A figura 81 ilustra a camada inicial, que corresponde ao modelo de menor complexidade.

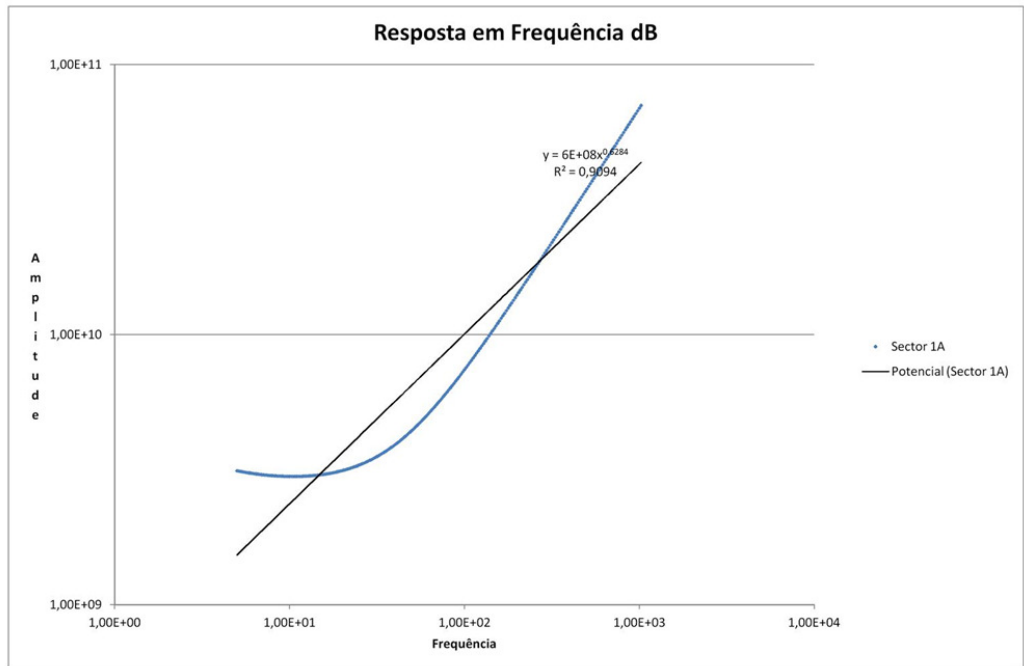


Figura 81 Análise de Tendência Ficus Carica 1A (Com fugas)

A figura 82, representada a seguir ilustra a camada de complexidade de maior nível, na qual são considerados todos os elementos de impedância que compõem o modelo.

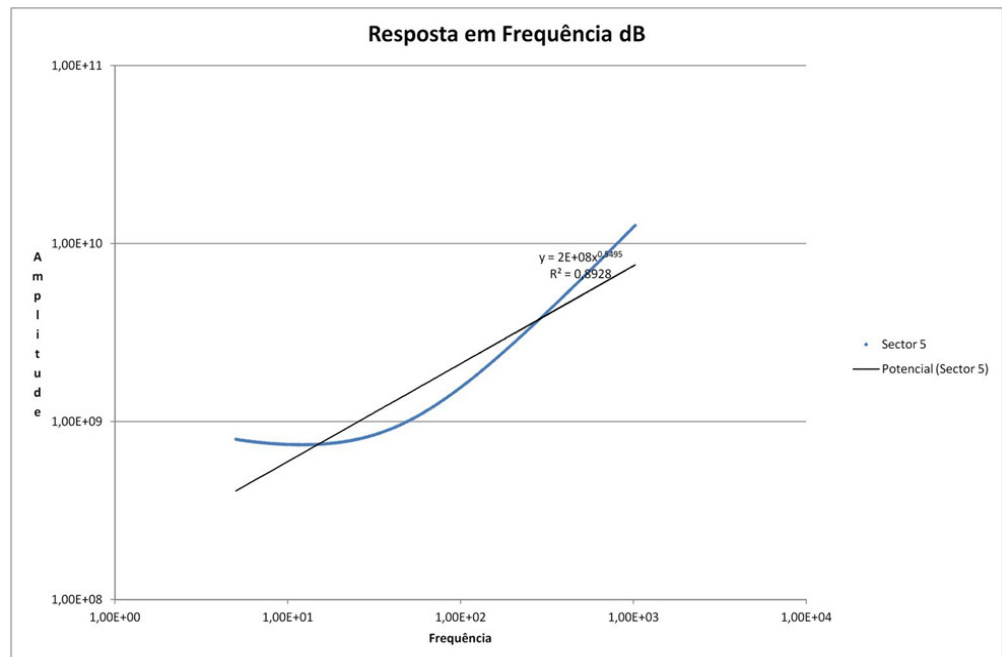


Figura 82 Análise de Tendência Ficus Carica 5 (com fugas)

A respectiva tabela com os resultados da análise efectuada a este modelo, está representada abaixo.

Sector	Lim A (KHz)	Lim B (KHz)	Coef a	Coef b	R²
1A	0.005	1	6e8	0.6284	0.9094
1B	0.005	1	2e8	0.5495	0.8928
2	0.005	1	2e8	0.5495	0.8928
3	0.005	1	2e8	0.5495	0.8928
4	0.005	1	2e8	0.5495	0.8928
5	0.005	1	2e8	0.5495	0.8928

Tabela 19 Resultados da análise de tendência Ficus Carica (com fugas)

6.2 Visão global da evolução com a complexidade

Os gráficos seguintes ilustram como evolui a impedância á medida que a complexidade do sistema aumenta. Ou seja, á medida que são acrescentadas mais malhas ao modelo. Para cada uma das amostras em estudo, ilustra-se com dois gráficos. Um possibilitando uma visualização em todo o espectro de frequências analisado e outro com uma visualização mais sobre o joelho da curva.

Estes gráficos são o resultado da sobreposição das curvas individuais que se obtiveram em cada um dos estágios com os respectivos sub-modelos. Por uma questão de escala aparecem bastante juntos ou até sobrepostos.

Os resultados destas curvas enquadram-se com as análises obtidas para a linha de tendência, no que respeita á estabilização da impedância num determinado valor a partir de um certo nível de complexidade do sistema, o que se traduz pela sobreposição das curvas.

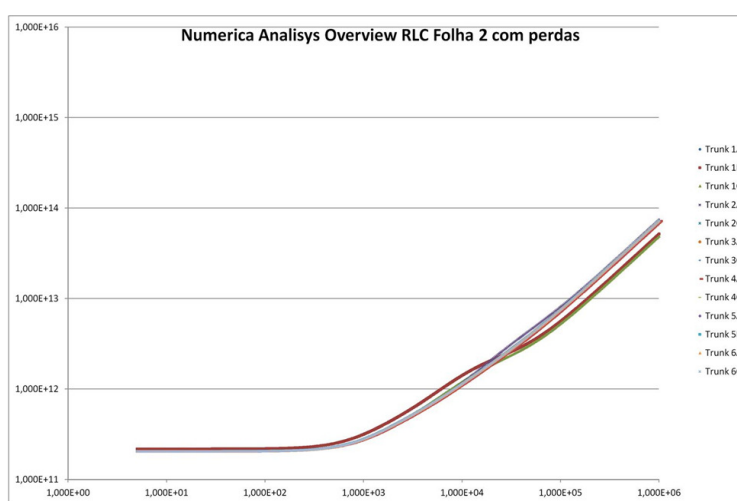


Figura 83 Evolução Citrus Sinensis (sem fugas)

A figura 84, representada abaixo representa uma ampliação á zona do joelho da curva para se ter uma melhor percepção de como está a variar a impedância com a complexidade do modelo.

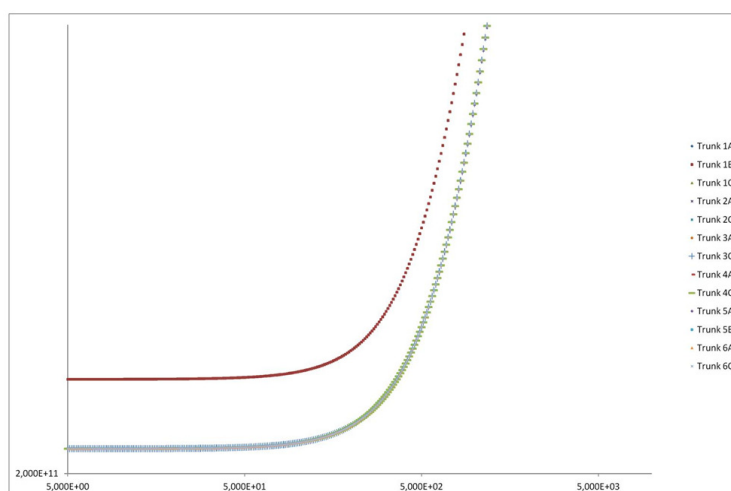


Figura 84 Evolução Citrus Sinensis (sem fugas) Vista em pormenor

Para a folha Cersis Sinensis a variação ocorreu conforme se ilustra na curva representada abaixo. Verifica-se um decréscimo notório de impedância da primeira fase para as fases subsequentes, sendo depois essa variação pouco significativa á medida que são acrescentados mais ramos.

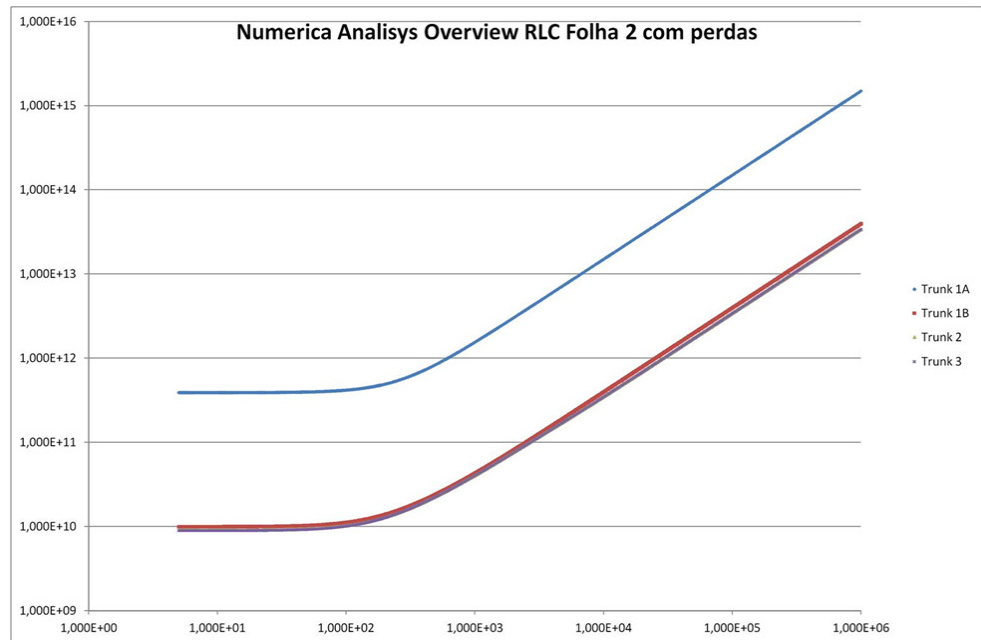


Figura 85 Evolução Cersis Silliquestrum (sem fugas)

A figura 86, representada abaixo apresenta uma ampliação sobre a zona do joelho, evidenciando a variação de impedância no sentido de decréscimo, como se esperava.

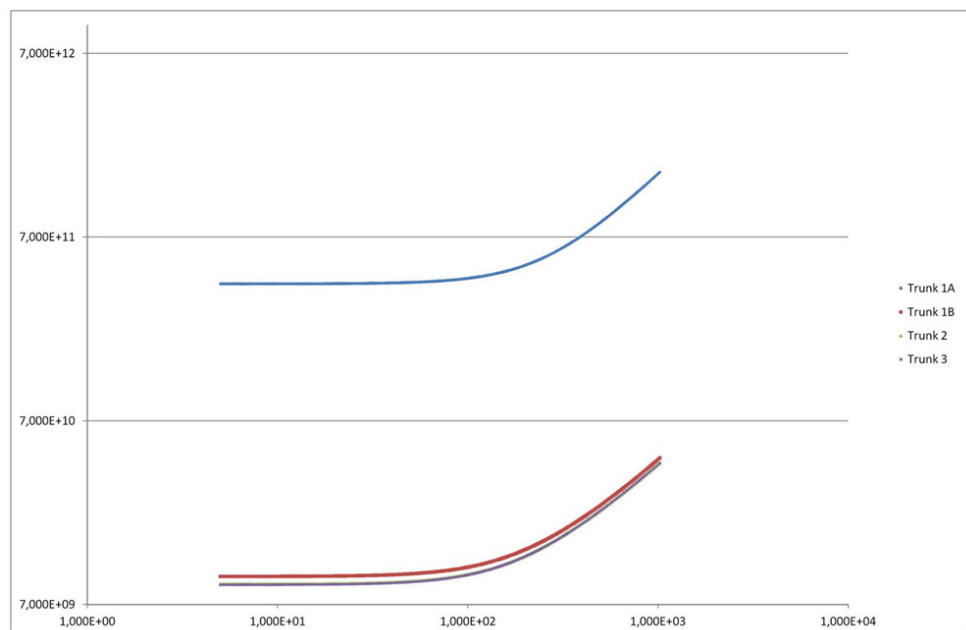


Figura 86 Evolução Cersis Silliquestrum (sem fugas) Vista em pormenor

Para a folha Ficus Carica a variação ocorreu conforme se ilustra na curva representada abaixo. Verifica-se um decréscimo notório de impedância da primeira fase para as fases subsequentes, sendo depois essa variação pouco significativa á medida que são acrescentados mais ramos. Tendência verificada em todas as amostras apresentadas.

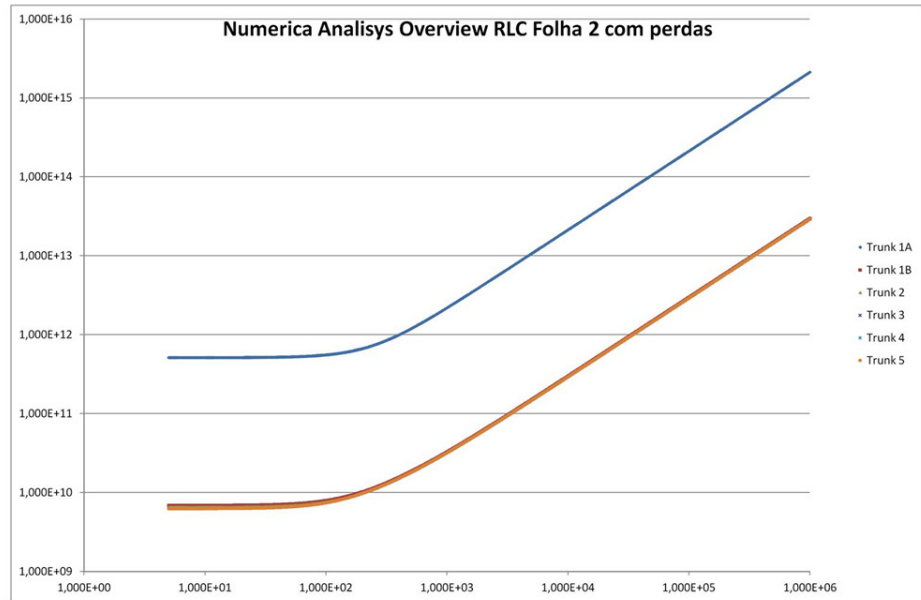


Figura 87 Evolução Ficus Carica (sem fugas)

A figura 88, representada abaixo mostra, como nos casos anteriores, uma ampliação na zona do joelho de forma a se poder ter uma melhor percepção da variação como varia a impedância nesta zona. Nas curvas correspondentes aos modelos de maior complexidade, ou seja, com mais ramos, verifica-se que a partir do joelho o andamento é praticamente coincidente e isto é comum às três amostras.

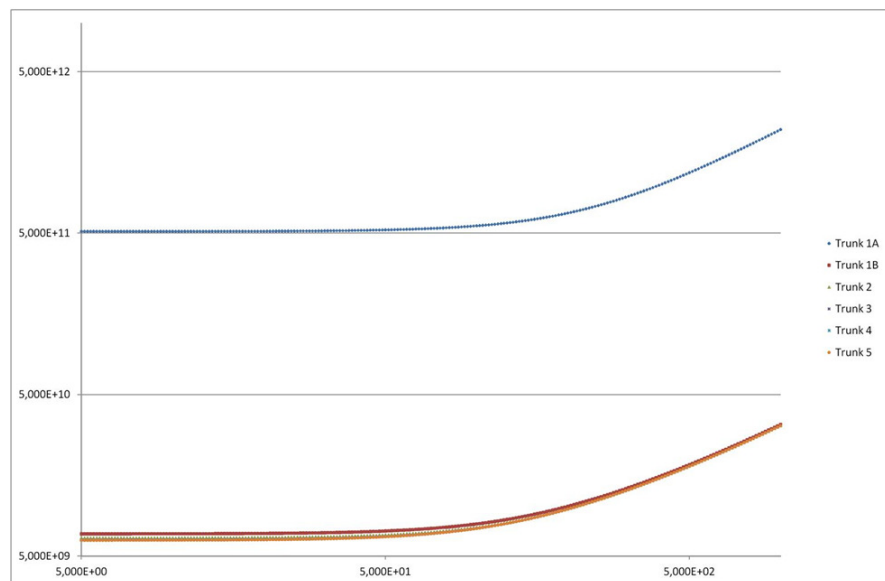


Figura 88 Evolução Ficus Carica (sem fugas) Vista em pormenor

As curvas seguintes apresentam a variação ocorrida para os modelos com fugas para as três amostras estudadas.

A figura 89, apresentada abaixo, ilustra a variação ocorrida na amostra Citrus Sinensis. Pode-se verificar que estas parecem ser coincidentes, excepto na fase inicial.

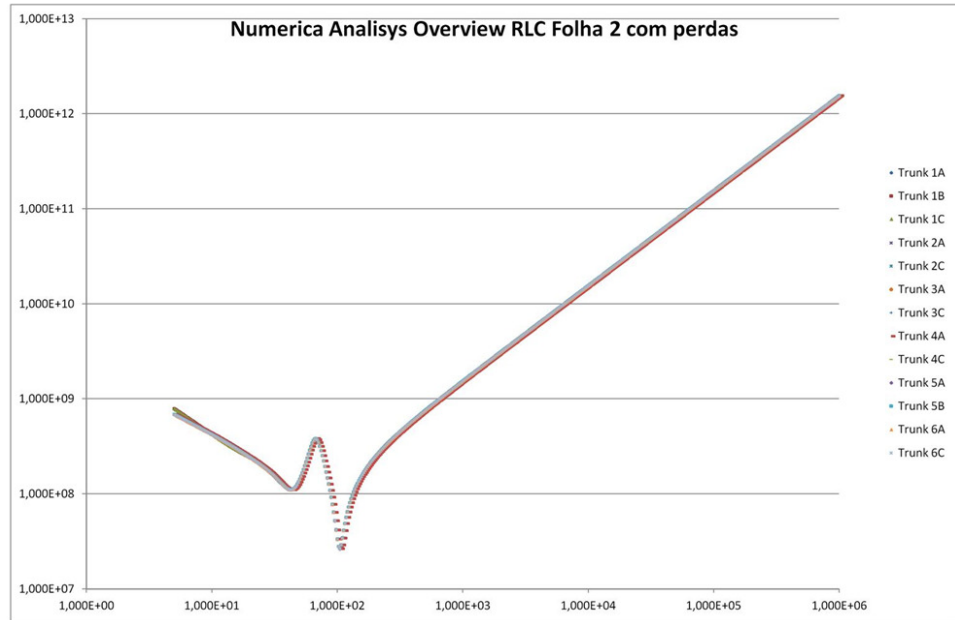


Figura 89 Evolução Citrus Sinensis (com fugas)

A figura 90, representada abaixo, apresenta uma ampliação sobre a zona do Joelho de forma a poder permitir visualizar como varia a impedância. Neste caso varia muito pouco e apenas no início da escala, passando a ser quase coincidente. Verifica-se uma perturbação na zona de corte provocada pela ocorrência de zeros e polos nessa zona.

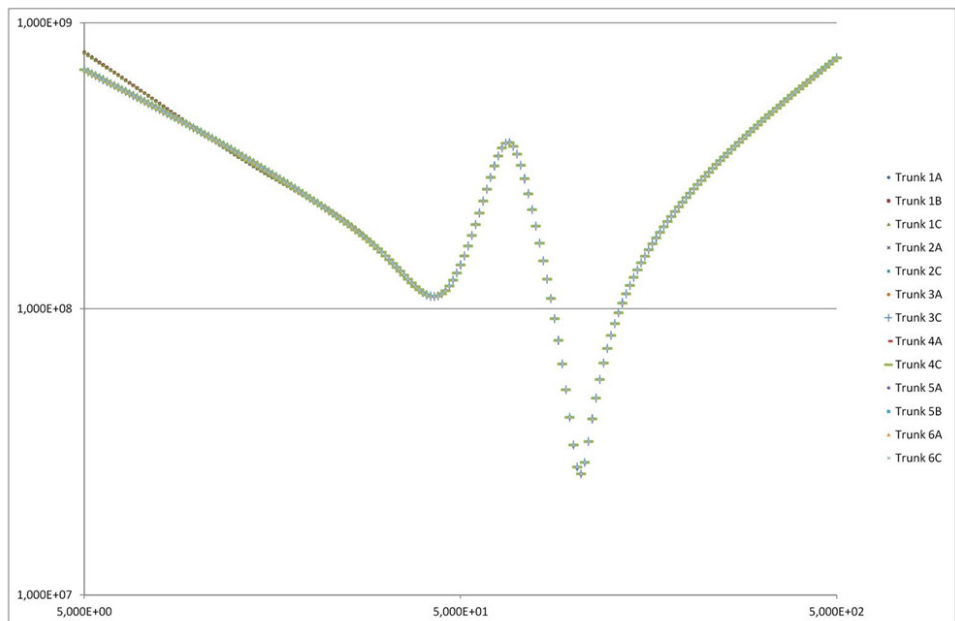


Figura 90 Evolução Citrus Sinensis (com fugas) Vista em pormenor

Para o modelo com fugas da folha *Cersis Sinensis*, a figura 91 ilustra a variação de impedância com o aumento da complexidade do modelo. Verifica-se um decréscimo significativo de impedância da primeira fase para as fases seguintes, onde essa variação se torna pouco significativa.

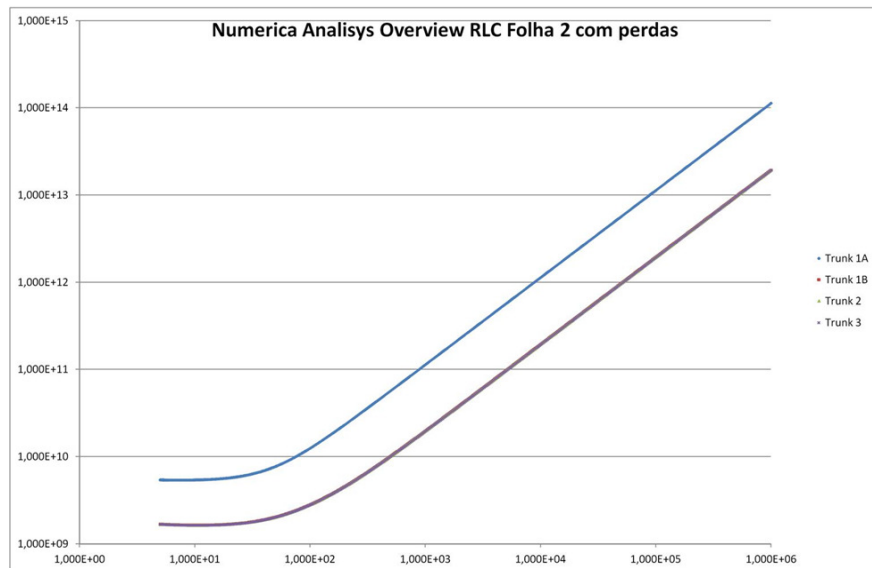


Figura 91 Evolução Cersis Silliquestrum (com fugas)

A exemplo dos casos anteriores, a figura 92 apresenta uma ampliação sobre a zona do joelho. Esta variação é parecida com a dos modelos sem fugas dos casos da folha *Cersis Silliquestrum* e *Ficus Carica*. Embora, se note neste caso que há maior coincidência nas curvas respeitantes às fases de maior complexidade, ou seja, a estabilização ocorre mais cedo.

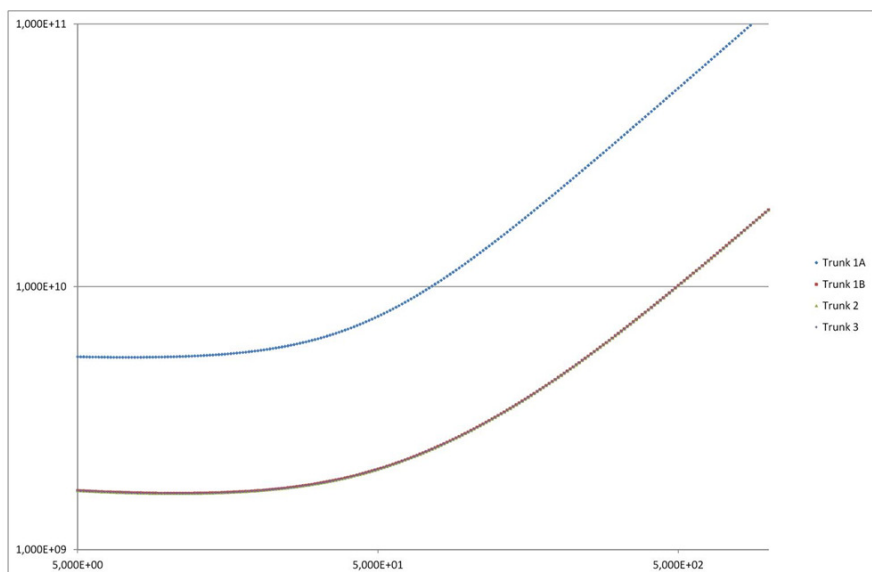


Figura 92 Evolução Cersis Silliquestrum (com fugas) Vista em pormenor

Para o modelo com fugas da folha *Ficus Carica* a figura 93 ilustra a variação de impedância com o aumento da complexidade do modelo. Tal como no caso anterior,

verifica-se um decréscimo significativo de impedância da primeira fase para as fases seguintes, onde essa variação se torna pouco significativa.

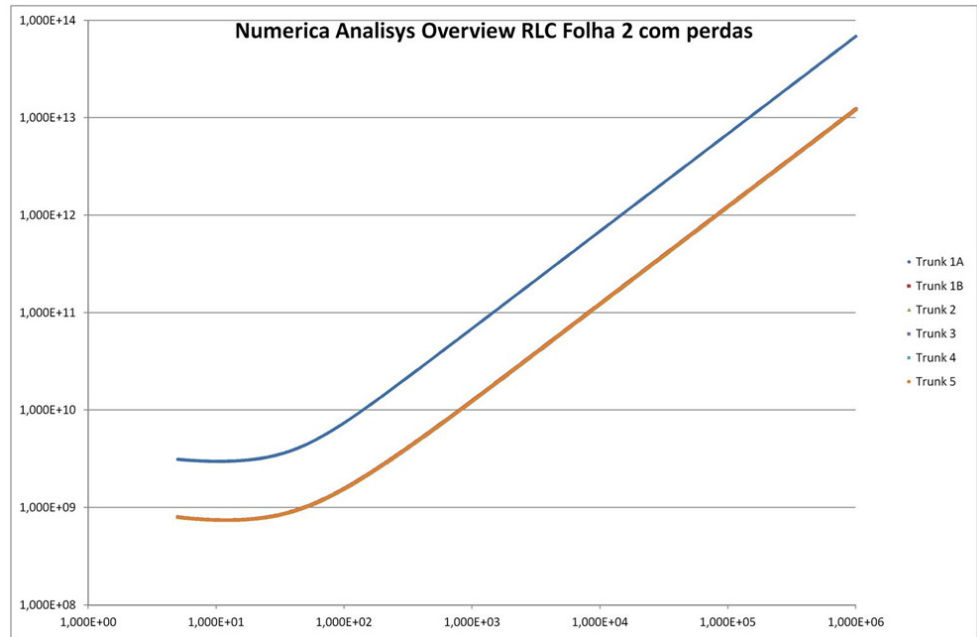


Figura 93 Evolução Ficus Carica (com fugas)

A figura 94, como nos casos anteriores, apresenta uma ampliação sobre a zona do joelho. Esta variação é parecida com a dos modelos sem fugas dos casos da folha *Cersis Silliquestrum* e *Ficus Carica*. Embora, se note neste caso que há maior coincidência nas curvas respeitantes às fases de maior complexidade. A tendência de a estabilização ocorrer mais cedo é notória.

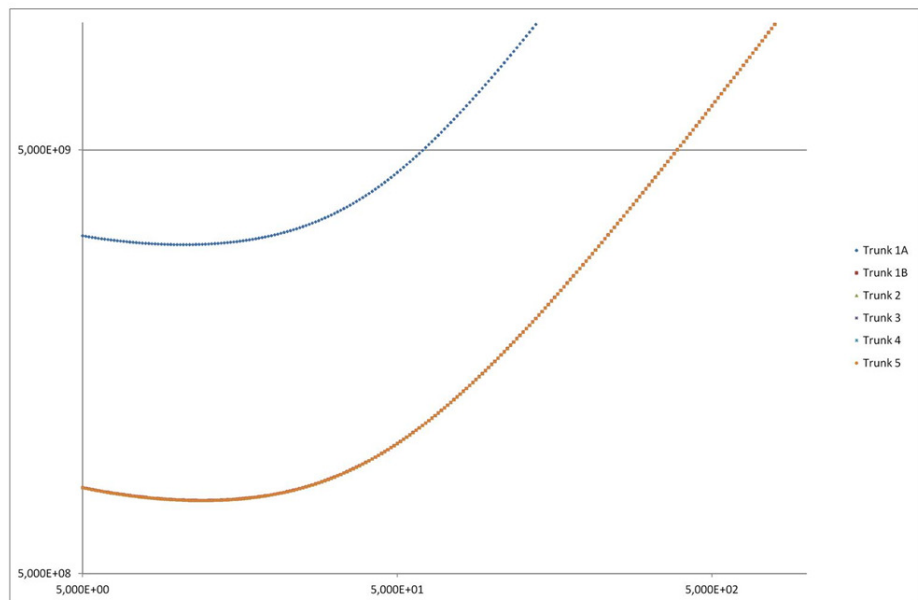


Figura 94 Evolução Ficus Carica (com fugas) Vista em pormenor

Capítulo 7

7 Conclusão

Para os modelos sem fugas resultantes da análise de análise de tendência ilustrados nas tabelas 16 á 2 tiram-se as seguintes observações:

Para a folha Citrus Sinensis, (folha de laranjeira), verifica-se que o coeficiente a, decresce ao longo das diversas simulações. Inicia com um valor de 8^{10} e estabiliza num valor de 8^9 . Essa estabilização ocorre a partir do estágio 2C. O nível de complexidade aumenta, mais malhas são acrescentadas. Conclui-se que a partir de um determinado nível de complexidade a variação de impedância é cada vez menor.

O coeficiente b é neste caso maior do que 0 e menor do que 1, mais concretamente compreendido entre 0.3 e 0.5.

Procurou-se nestas análises obter um valor de coeficiente de correlação, R^2 o mais possível próximo de 1 significa que quanto mais próximo de 1 este valor estiver, menor será o erro associado na correlação. Para este caso o valor obtido anda em torno de 0.9 que é um valor ótimo.

Para a folha Cersis Silliquestrum, (folha de olaia), verifica-se também que o coeficiente a, diminui com o aumento da complexidade do modelo, iniciando com um valor de 5^{10} e estabilizando com o valor de 1^9 . O coeficiente b, que traduz a ordem do sistema, é como no caso anterior maior do que 0 e menor do que 1, situando-se neste caso em torno de 0.5.

Também para este caso, procurou-se um valor do coeficiente de correlação R^2 próximo de 1 e o valor obtido para esta série foi de 0.88 que é um valor aceitável.

Para a folha Ficus Carica, (folha de figueira), como nos casos anteriores o coeficiente “a”, diminui com a complexidade do modelo, iniciando com o valor de 6^{10} e estabilizando com o valor de 7^8 . De forma análoga aos casos anteriores o coeficiente “b”, é maior do que 0 e menor do que 1, situando-se em torno de 0.5. Também como nos casos anteriores, o coeficiente de correlação R^2 anda próximo de 1, com um valor em torno de 0.9.

Analisando-se agora o que se passa com os modelos em que são contempladas as fugas, obtém-se as seguintes observações.

Para a folha Citrus Sinensis, verificou-se que o coeficiente a, foi para esta amostra igual em todos os estágios, com o valor de 2^9 . Em relação ao coeficiente b, neste caso assumiu valores negativos, pelo facto de a inclinação da recta ser diferente dos casos anteriores. Mas, em módulo é maior do que 0 e inferior a 1, andando em torno de 0.6. Para o coeficiente de correlação R^2 , o valor obtido foi de 0.7. Um pouco mais baixo do que nos casos anteriores mas ainda aceitável para este caso.

Para a folha Cersis Silliquestrum foi verificado um padrão análogo ao dos modelos sem fugas, embora o coeficiente a, neste caso estabilize muito mais rapidamente do que nos modelos sem fugas. De início, o coeficiente a, tinha um valor de 6^8 e estabilizou com um valor de 3^8 . A estabilização deu-se logo no segundo estágio de complexidade, (1B). O coeficiente “b”, tomou o mesmo padrão, maior do que 0 e menor do que 1, oscilando entre 0.7 e 0.5. Relativamente ao coeficiente de correlação R^2 , este tomou um valor superior a 0.9 o que é ótimo.

Para a folha Ficus Carica, (folha de figueira), o coeficiente a inicia com o valor de 6^8 e estabiliza com um valor de 2^8 . Estabilizando no estágio (2C). O coeficiente “b”, segue o mesmo padrão dos casos anteriores, maior do que 0 e menor do que 1, oscilando em torno de 0.5 e 0.6. Quanto ao coeficiente de correlação R^2 , oscila entre 0.8 e 0.9, valores aceitáveis que significam um baixo erro.

Das observações verificadas e expostas acima, tiram-se as seguintes conclusões.

Para todos os modelos verificou-se os seguintes padrões:

O coeficiente a , que se relaciona com a impedância do modelo diminui em todos eles com a ordem de complexidade do sistema. Isto é, à medida que são incluídas mais malhas no modelo, até se obter o circuito total. Contudo, verifica-se a ocorrência de duas tendências. Uma para o caso dos modelos sem fugas e outra para o caso dos modelos com fugas.

Nos modelos com fugas o decréscimo de impedância e a estabilização desse valor ocorre mais cedo do que nos modelos sem fugas. Pensa-se que a capacidade de fugas contribui significativamente para esse efeito. Essa capacidade tem um efeito significativo nas frequências mais elevadas.

Para o coeficiente b , relacionado com a ordem do sistema, verificou-se que em todos os modelos foi sempre maior do que 0 e menor do que 1 em módulo, significando que se pode considerar este sistema de ordem fraccionária.

O coeficiente de correlação R^2 foi em todas as análises compreendido entre 0.7 e 0.95, com maior incidência para este último valor. Traduzindo um erro baixo para esta análise, dando consistência aos resultados obtidos.

Neste estudo, abordou-se a modelização de uma pequena parte da planta e mesmo assim, essa não foi levada até ao limite. Haveria aqui espaço para outras abordagens no que respeita a possíveis trabalhos futuros.

Assim, para citar alguns. Poder-se-ia alargar a gama de amostra de folhas a outros tipos de nervação mais diferenciados.

Uma outra abordagem de grande interesse passaria por estender o modelo ao caule da planta. Seria interessante investigar a relação com diferentes tipos de caules e a respectiva relação destes com as folhas que lhes estão associadas e sua respectiva nervação.

Seria implícito numa fase posterior estender esse estudo à raiz da planta e também, a análise dos vários tipos de raízes com a planta. No final, seria talvez uma meta a modelização da planta no seu todo.

Haverá por certo outras abordagens que possam aproveitar os conceitos deste estudo e estende-lo a outras áreas, tais como, o sistema vascular, ou o sistema respiratório.

Como a ciência é composta de pequenos passos e de vez em quando algum ocasional salto quântico. Este estudo pretendeu ser tão só e apenas um pequeno e modesto passo para a contribuição de conhecimento acumulado. Dando lugar a possíveis e eventuais desenvolvimentos posteriores.

Capítulo 8

8 Referências

1. Ionescu, Clara; J. Tenreiro Machado : Mechanical Properties and impedance for the branching network of the sapping system in leaf of Hydrasngea Macrophylla.
2. Rita Serrano (FFUL) : Estudo Macroscópico dos órgãos vegetais.
3. L. Bessonov : Electricidade Aplicada para Engenheiros.
4. Sears; Zemansky; Young : Mecânica dos Fluídos.
5. Lencastre, Armando : Manual de Hidráulica Geral – Edição de 1957
6. Tipler : Física.
7. Kirby, J. Brian : Hydraulic circuit equivalents for fluid flow in microchannels - hydraulic circuits.
8. Xia, Qinglan : The formation of a tree leaf.
9. Katifori, Eleni; Szollosi, Gergely; Magnasco, Marcelo O : Damage and fluctuations induce loops I optimal transport networks.
10. Machado, J. Tenreiro; Jesus, Isabel : Fracctional Calculus & Applied Analisys
11. Widdmann, Martin; Shar, Christoph : A Principal componente and long-term analisys of daily precipitations in Switzerland.
12. O. Ksenzheck; S. Petrova; M. Kolodyazhny : Electrical Properties of Plant Tissues. Resistance of a Maize Leaf.
13. Ionescu, Clara Michaela; Tenreiro-Machado, J. A. De Keyser, Robin; Abrudean, Mihail : A Theoretical Stusy on Modeling the Respiratory Tract with Ladder Networks by Means of Intrinsic Fractal Geometry.
14. Jesus, Isabel S. Tenreiro Machado, J. A. Cunha, Boaventure : Fractional Electrical Impedances in Botanical Elements – Journal of Vibration and Control.
15. Jesus, Isabel S. Tenreiro Machado, J. A. Development of fractional order capacitors bases on electrolyte processes.
16. Gonzalez, Rafael C. Woods, Richard E. Digital Image Processing

