

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**ESTUDO DO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO
FLUXO E ARMAZENAMENTO HÍDRICO EM
CAULES DE ANGIOSPERMAS**

LUIS PHILIPPE DE ARRUDA LIMA

ORIENTADOR: PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO

**Cuiabá, MT
Dezembro de 2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**ESTUDO DO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO
FLUXO E ARMAZENAMENTO HÍDRICO EM
CAULES DE ANGIOSPERAMAS**

LUIS PHILIPPE DE ARRUDA LIMA

*Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Física Ambiental
da Universidade Federal de Mato
Grosso, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Física
Ambiental.*

ORIENTADOR: PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO

**Cuiabá, MT
Dezembro de 2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L732e Lima, Luis Philippe de Arruda.
ESTUDO DO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO FLUXO E
ARMAZENAMENTO HÍDRICO EM CAULES DE ANGIOSPERMAS / Luis
Philippe de Arruda Lima. -- 2017
xix, 80 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Denilton Carlos Gaio.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de
Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2017.
Inclui bibliografia.

1. Dispositivo hídrico. 2. Resistência de caule. 3. Elementos de vaso. 4. Analogia
hídrico-elétrica. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

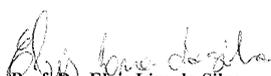
TÍTULO: ESTUDO DO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO FLUXO E
ARMAZENAMENTO HÍDRICO EM CAULES DE
ANGIOSPERMAS

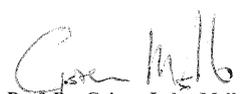
AUTOR: LUIS PHILIPPE DE ARRUDA LIMA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 18 de dezembro de 2017, pela
comissão julgadora:


Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio
Orientador
Instituto de Física - UFMT


Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo
Examinador Interno
Instituto de Física - UFMT


Prof. Dr. Elvis Lira da Silva
Examinador Interno
Instituto de Física - UFMT


Prof. Dr. Geison Jader Mello
Examinador Externo
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Mato Grosso - IFMT

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Suilena e Rogero, pelo amor, incentivo e ensinamento quanto ao valor da vida. À minha irmã Silvia, pela irmandade de coração. À minha companheira de todas as horas, de todos os momentos, Kamyla.

IN MEMORIAN

*Aos meus avós paternos, Seu Udo e Dona
Nininha, e ao Seu Pedro, avô materno.*

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por me possibilitar viver em meio a uma família maravilhosa que é o apoio fundamental em minha caminhada.
- Agradeço aos meus pais, Suilena e Rogero, pelo amor, incentivo, pelo dom à vida, companheirismo e ensinamento por todos os 22 anos da minha vida.
- Agradeço a minha irmã Silvia Patrícia pelo cuidado e pela irmandade de todos os dias e ao seu esposo Odiley pela amizade e incentivo.
- Agradeço a minha namorada Kamyla Gama pelo apoio diário, pelo carinho e amor. Pela ajuda em todo o trabalho, pelos conselhos e ensinamentos de cada dia.
- Agradeço aos meus familiares pelo apoio. Em especial, agradeço a minha vó Dona Maria pela torcida e lembranças de sempre. Agradeço também a Dona Conceição e família por todo o apoio.
- Agradeço ao amigo e orientador Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio que, durante esses 5 anos de trabalho, da graduação à pós-graduação, ensinou-me muito mais que técnicas e conceitos de física, ensinou-me como ser um excelente professor. Pelas conversas, pela ajuda em todo o trabalho. Valeu, maestro!
- Agradeço ao MSc. Lauro Leocadio pela sua amizade e apoio em todo o trabalho. Pelos artigos redigidos, pelas inúmeras conversas que eram de potencial hídrico à futebol. Valeu Laurão!
- Agradeço ao Prof. Dr. Serginho de Paulo pela participação na banca examinadora e pelas ótimas contribuições no trabalho. Agradeço também pelas ideias e aulas, que por sinal são ótimas!
- Agradeço ao Prof. Dr. Geison Mello pela participação na banca examinadora, pelas ótimas contribuições no trabalho, e pela atenção dada em todo o período.
- Agradeço ao Prof. Dr. Elvis Lira pela participação na banca examinadora, pelas contribuições, pelas inúmeras conversas e incentivos que se estendem desde a graduação.
- Agradeço a Profa. Dr^a Luciana Sanchez e ao departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMT por ceder um espaço na estação meteorológica Mestre Bombled para realização do experimento e pela assistência.
- Agradeço ao Prof. Dr. José Nogueira pela confiança e oportunidade de estar em um ótimo curso de pós-graduação, onde fiz amigos e parceiros de trabalho.
- Agradeço a Profa. Dr^a Marta Nogueira pelas conversas, simpatia em todos os momentos no PGFA e pelos ensinamentos.

- Agradeço ao Prof. Dr. Marcelo Biudes pela humildade de sempre conversar comigo desde meus primeiros dias de aula na graduação, dos corredores à sala de aula, e pelos ensinamentos.
- Agradeço ao professor Dr. Carlo de Musis pela disponibilidade, por ser sempre atencioso, e por mostrar à estatística com uma outra visão.
- Agradeço aos professores Dr. Francisco Lobo, Dr^a Carmen Ortiz, Dr. Campelo, Dr. Geraldo Neves, Dr^a. Iramaia de Paulo, Dr^a. Nadja Machado, Dr. Paulo Arruda e Dr. Leone Curado do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, que, com dedicação, compartilharam seus conhecimentos.
- Agradeço aos colegas da melhor turma de mestrado e doutorado do Brasil: Acabias, Dani, Érico, Elio, Helô, Ju Lotufo, Lucão, Luciene, Silvino, Antônio, Brunão, Ju Queiroz, Levi, Nelson, Tonny, Flávia, Keylayne, Plabinne, Antônio Corrêa!!
- Agradeço a Mariane dos Anjos (Holly Water) pela participação e contribuição no trabalho.
- Agradeço a Sirley por toda ajuda durante todo o experimento, principalmente no dia do ensaio destrutivo.
- Agradeço ao grande Cesário pela simpatia, pela assistência no PGFA e pelas inúmeras conversas. Valeu César!
- Agradeço a Soilce pela colaboração, simpatia, alegria e auxílio, mantidos em constâncias em todo os momentos no PGFA.
- Agradeço ao Senhor Valter da Área Verde-Prefeitura do Campus e ao Senhor Luisinho da Marcenaria por toda assistência e disponibilização de espaço e material em todo esse período de teste e experimento.
- Agradeço ao Edney Gomes e a Dona Zózima Silva pela doação das garrafas pets para realização do experimento, pela disposição em ajudar e simpatia.
- Agradeço a Cnpq pela disponibilização da bolsa que veio a possibilitar minha dedicação à pesquisa.

“A física é a poesia da natureza. A matemática, o idioma.”

*Antônio Gomes Lacerda
Pensador*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seção longitudinal radial do xilema secundário do Pinheiro-do-Paraná.....	8
Figura 2. Representação do tórus em uma conífera.....	8
Figura 3. Esquemas das placas de perfuração.....	9
Figura 4. Cavitação em série de elementos vaso.....	10
Figura 5. Circuito RC.....	13
Figura 6. Circuito básico do caule.....	14
Figura 7. Esquemático do software Qucs.....	16
Figura 8. Resistor e capacitor com as portas P1 e P2.....	17
Figura 9. Símbolo representativo do circuito da figura 5.....	17
Figura 10. Ilustração do caule do feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	19
Figura 11. Fase vegetativa de uma planta de feijão comum.....	21
Figura 12. Aparato experimental usado para determinação da resistência.....	22
Figura 13. Modelo simplificado das placas de perfuração.....	23
Figura 14. Símbolo representativo do circuito básico do caule.....	24
Figura 15. Circuito básico do tórus.....	24
Figura 16. Símbolo representativo do circuito tórus.....	24
Figura 17. Circuito básico para o sistema traqueíde-tórus.....	24
Figura 18. Símbolo representativo do circuito traqueíde-tórus.....	25
Figura 19. Representação do circuito hídrico de caule da espécie <i>Tsuga Canadensis</i> (100% ligados).....	26
Figura 20. Representação do circuito hídrico de caule da espécie <i>Tsuga Canadensis</i> (95% ligados).....	27
Figura 21. Linha de tendência polinomial entre os valores mínimos, máximos e médios dos fluxos.....	28
Figura 22. Esquema com as três mesas utilizadas no experimento..	29
Figura 23. Mesa A.....	30
Figura 24. Vasos utilizados no experimento.....	30
Figura 25. Amostra de terra sendo pesada após secagem.....	31
Figura 26. Folhas das plantas de feijão com oídio.....	32
Figura 27. Vaso com plástico para evitar ou reduzir a evaporação do solo.....	33

Figura 28. Caules e seção transversal de caule de feijão	36
Figura 29. Representação das camadas do cilíndrico concêntrico.....	37
Figura 30. Circuito hídrico para a célula elemento de vaso da camada externa.	38
Figura 31. Símbolo representativo para a célula elemento de vaso da camada exterior do caule.	38
Figura 32. Conjunto de 5x5 dos circuitos representativos para os elementos de vaso representativos da camada externa.	40
Figura 33. Símbolo representativo para o conjunto de elementos de vaso da camada externa.	41
Figura 34. Circuito representativo para a célula elemento de vaso da camada intermediária.....	42
Figura 35. Símbolo representativo para a célula elemento de vaso da camada intermediária do caule.	42
Figura 36. Conjunto de 5x5 dos circuitos representativos para os elementos de vaso representativos da camada intermediária.	43
Figura 37. Símbolo representativo para o conjunto de elementos de vaso da camada intermediária.....	44
Figura 38. Circuito representativo para a célula elemento de vaso da camada interna.	45
Figura 39. Símbolo representativo para a célula elemento de vaso da camada interna do caule.	45
Figura 40. Conjunto de 5x5 dos circuitos representativos para os elementos de vaso representativos da camada interna.....	46
Figura 41. Símbolo representativo para o conjunto de elementos de vaso da camada interna.....	47
Figura 42. Circuito geral dos elementos de vaso.	48
Figura 43. Valores em percentagens de cada componente do circuito básico dos elementos de vaso do feijão.	49
Figura 44. Curva da transpiração em função da quantidade de água solo e as curvas obtidas por Denmead e Shaw (1962).	52
Figura 45. Tendências das quedas dos fluxos para os circuitos com elementos de vaso com placas simples e escalariformes	56

Figura 46. Volume de água nas células.....	58
Figura 47. Fluxo experimental e estimado	59
Figura 48. Circuito geral das angiospermas.....	61
Figura 49. Fluxo experimental e do modelo <i>in silico</i>	63
Figura 50. Regressão entre fluxo experimental e fluxo do modelo <i>in silico</i>	64
Figura 51. Elementos de vaso de comprimento 410 µm com placa simples.	76
Figura 52. Elementos de vaso de comprimento 1090 µm com placa simples.	77
Figura 53. Elementos de vaso de comprimento 1090 µm com placa escalariforme..	78
Figura 54. Elementos de vaso de comprimentos 410 µm com placa escalariforme..	79
Figura 55. Curvas de crescimento dos valores de armazenamento de água.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Grandezas análogas entre fluxo elétrico e hídrico.....	12
Tabela 2. Capacitância da árvore com as características citadas no texto.	15
Tabela 3. Valores utilizados por Gaio (2011) para o cálculo da capacitância	15
Tabela 4. Subdivisões das fases fenológicas do feijão.....	20
Tabela 5. Siglas dos componentes hídricos nos circuitos.	39
Tabela 6. Valores de fluxos de elementos de vaso com diferentes placas	48
Tabela 8. Volume total por tratamento e Volume total por planta.....	53
Tabela 9. Comprimento médio dos caules para cada tratamento.	54
Tabela 10. Valores de fluxos máximo, mínimo, médio e desvio padrão com elementos de vaso com placa simples com 8 mm, conforme a seção 3.3.4.	54
Tabela 11. Valores de fluxos máximo, mínimo, médio e desvio padrão com elementos de vaso com placa escalariforme, conforme a seção 3.3.4.....	55
Tabela 12. Valores dos componentes dos circuitos gerais para as células elementos de vaso do feijão.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

ψ	Potencial hídrico (Pa)
ψ_{π}	Potencial hídrico osmótico
ψ_p	Potencial hídrico de pressão
ψ_g	Potencial hídrico gravitacional
ψ_x	Potencial hídrico do xilema
ψ_{cm}	Potencial hídrico nas células do mesófilo
r_{xcm}	Resistência entre xilema e células do mesófilo
ψ_{xr}	Potencial hídrico no xilema da raiz
ψ_{xf}	Potencial hídrico no xilema da folha
$\Delta\psi_{xrf}$	Diferença de potencial hídrico entre xilema da raiz e da folha
$\Delta\psi_{cf}$	Diferença de potencial hídrico entre caule e folha
$\Delta\psi$	Diferença de potencial hídrico
$\Delta\psi_g$	Diferença de potencial hídrico gravitacional
$\Delta\psi_{\pi}$	Diferença de potencial hídrico osmótico
μ	Potencial químico no estado observado
μ_0	Potencial químico de água pura à altura de referência
v	Volume parcial molal
T	Temperatura
C	Concentração de solutos (mol.L ⁻¹)
z_0	Altura do ponto de referência (m)
z	Altura a partir do ponto de referência
i	Intensidade de corrente elétrica
f	Fluxo hídrico (m ³ .s ⁻¹)
C	Capacitância (F)
τ	Tempo característico (s)
r_c	Raio de caule (m)
h_c	Altura do caule (m)
A	Área foliar (mm ²)
j	Taxa de transpiração diária (mm por dia)

V0	Fase de germinação do feijão
V1	Fase de emergência do feijão
V2	Fase do surgimento da primeira folha trifoliada do feijão
V3	Fase do surgimento da terceira folha trifoliada do feijão
V4	Final da fase vegetativa do feijão
ET	Evapotranspiração da cultura (mm)
ΔP	Varição de pressão (Pa)
R_{des}	Resistência de descarregamento
W	Volume hídrico (m ³)
W_c	Volume da célula
ΔW	Varição do volume hídrico (m ³)
W_0	Volume no instante inicial
W_t	Volume total do tratamento (cm ³)
W_p	Volume total da planta (cm ³)
π	Constante Pi (3,14159)
R	Constante dos gases (8,32 mol.k-1.L-1)
g	Campo gravitacional da Terra (9,81 Nkg-1 ao nível do mar)
μ_w	Massa específica da água (103 kg.m-3 a 20°C em 1 atm)
SPA	Contínuo Solo-Planta-Atmosfera

RESUMO

LIMA, L.P.A.; **ESTUDO DO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO FLUXO E ARMAZENAMENTO HÍDRICO EM CAULES DE ANGIOSPERMAS.** Cuiabá. 2017.80 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

Transportada nos tecidos do caule até a copa, a água absorvida pelas raízes de uma planta, flui, por evapotranspiração, para a atmosfera. Os processos de rega e precipitação fecham o circuito do fluxo hídrico no contínuo solo-planta-atmosfera, com a água retornando ao solo. Uma forma que se pode estudar o fluxo hídrico nesse contínuo é por meio dos dispositivos hídricos que surgem da analogia hídrico-elétrica, o que permite a utilização de softwares de simulação de circuitos. Seguindo essa metodologia de simulação do fluxo a partir de dispositivos hídricos, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um análogo elétrico do caule de angiospermas, *in silico*, que permita reproduzir os dados experimentais de fluxo e armazenamento hídrico dessas plantas cujos elementos de vaso são as principais células formadoras dos tecidos xilemáticos e diferem das células traqueídes do xilema das gimnospermas, que são consideradas menos evoluídas filogeneticamente em relação as angiospermas. O fluxo hídrico dos elementos de vaso foi obtido tanto teoricamente a partir da equação de Poiseuille, como experimentalmente. Para isso, foram utilizados dados de resistências de elementos de vaso com diferentes placas de perfuração e, com o desenvolvimento de um experimento, obteve-se dados experimentais de fluxo e armazenamento hídrico no caule de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.). Em concordância com a literatura, os resultados obtidos para elementos de vaso com placas simples foram 18% e 46% maiores que os fluxos dos elementos de vaso com placas escalariformes. Obteve-se coeficientes de Spearman (0,8) e de determinação (95,46%) da correlação entre os valores de fluxo obtidos da simulação e dos valores experimentais. Assim, o modelo deste trabalho mostrou ter desempenho muito próximo aos dados experimentais, o que evidencia o potencial dos modelos elétricos análogos à dinâmica hídrica. Os valores teóricos estimados do fluxo do feijão apresentaram mesma ordem de grandeza que os fluxos experimentais.

Palavras-chave: Dispositivo hídrico; Resistência de caule; Elementos de vaso; Analogia hídrico-elétrica.

ABSTRACT

LIMA, L.P.A.; **STUDY OF THE HYDRIC-ELECTRIC ANALOGY OF THE WATER FLOW AND STORAGE IN ANGIOSPERMS STEMS.** Cuiabá. 2017. 80 f. Dissertation (Master in Environmental Physics), Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

Transported in the tissues from the stem to the treetop, water absorbed by roots of a plant flows, by evapotranspiration, into the atmosphere. The irrigation and precipitation processes close the water flow circuit in the continuous soil-plant-atmosphere, with water returning to the soil. One way to study the water flow in this continuum is through the water devices that emerge from hydric-electric analogy, which allows the use of circuit simulation software. Following this methodology of flow simulation from water devices, the objective of this work was to develop an electric analogue of the angiosperm stem, *in silico*, that allow to reproduce the experimental data of water flow and storage of these plants, of which vessel elements are the main cells formings xylem tissues and differ from the tracheid cells of gymnosperms xylem, which are considered less phylogenetically evolved in relation to angiosperms. The water flow of the vessel elements was obtained theoretically from the Poiseuille equation and experimentally. For this, resistance data of vessel elements with different drilling plates and, with the development of an experiment, experimental data of water flow and storage was obtained from the stem of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In agreement with the literature, results obtained for simple plate vessel elements were 18% and 46% larger than vessel elements with scalariform plates. Spearman coefficients (0.8) and determination (95.46%) of the correlation between the flow values obtained from the simulation and the experimental values were obtained. Thus, the model of this work showed having the performance very close to the experimental data, which shows the potential of electric models analogous to hydric dynamics. The estimated theoretical values of the bean flow presented the same order of magnitude as the experimental flows.

Keywords: Hydric device; Resistance of stem; Vessel elements; Hydric-electric analogy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Problemática	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Potencial hídrico	5
2.1.1 Potencial osmótico (ψ_{π}).....	5
2.1.2 Potencial de pressão (ψ_p)	6
2.1.3 Potencial gravitacional (ψ_g)	6
2.2 Teoria da tensão-coesão de Dixon	6
2.3 Xilema.....	7
2.4 Analogia hídrico-elétrica	11
2.4.1 Lei de Ohm	11
2.4.2 Leis análogas de Kirchhoff	12
2.4.3 Circuito RC	13
2.4.4 Circuito básico para o caule.....	14
2.5 Simuladores de Circuitos	16
2.6 Medida de Evapotranspiração.....	17
2.6.1 Experimento de Denmead e Shaw (1962)	17
2.6.2 Lisímetros de pesagem.....	18
2.6.3 Características da Cultura: Feijão	18
2.7 Lei de Poiseuille.....	21
2.8 Dados de referências para elementos de vaso.....	22
2.9 Circuito para o caule de coníferas.....	23
3. MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 O Arranjo experimental	29
3.2 Cálculo de Parâmetros do Xilema.....	34

3.2.1 Resistência e capacitância das células com diferentes placas de perfuração	35
3.2.2 Fluxo hídrico teórico no caule de feijão	35
3.2.3 Resistência e capacitância das células do feijão	36
3.3 Modelagem no QUCS.....	37
3.3.1 Camada externa.....	38
3.3.2 Camada intermediária	41
3.3.3 Camada interna	44
3.3.4 Valores utilizados nos componentes hídricos dos circuitos.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 Dados experimentais	51
4.2 Fluxos hídricos dos elementos de vaso com diferentes placas de perfuração	54
4.3 Tendência do fluxo hídrico (cavitação)	55
4.4 Volume de água nas células	57
4.5 Fluxo hídrico teórico no caule de feijão	58
4.6 Circuito hídrico do caule das angiospermas	59
4.7 Fluxo hídrico no caule de feijão (Validação do modelo <i>in silico</i>).....	63
5. CONCLUSÃO.....	65
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
APÊNDICE A.....	75

1. INTRODUÇÃO

1.1 Problemática

A solução do solo, absorvida na raiz da planta, flui para os tecidos do caule; é transportada até a copa, e, por evapotranspiração, alcança a atmosfera. Os processos de rega e precipitação fecham o circuito, com a água retornando ao solo.

O estudo da analogia hídrico-elétrica desse contínuo solo-planta-atmosfera tem obtido expressão desde a década de 1960, com os estudos de Philip (1966) e Lang et al. (1969). Além desses autores, outros contribuíram para o avanço desse tema, como, por exemplo, Cowan (1972), Farquhar e Cowan (1974), Tyree e Ewers (1991) e Johnsson e Prytz (2002). A utilização de modelagem matemática computacional para estudo deste tema pode ser encontrada em Chen et al. (2012) e Sun et al. (2014). Gaio (2011) fez modelagem *in silico*¹, por meio de software de simulador de circuitos, de várias partes das plantas vasculares com a introdução dos dispositivos hídricos. Seguindo essa metodologia de simulação do fluxo a partir de dispositivos hídricos, este trabalho analisa o circuito do caule.

O Pantanal, a Amazônia e o Cerrado, presentes no Estado de Mato Grosso, proporcionam uma diversidade de plantas vasculares. Nessas, o xilema constitui a porção mais longa do transporte hídrico. Em uma planta de um metro de altura, por exemplo, 99,5% desse transporte é feito dentro do xilema (TAIZ e ZAIGER, 2013). Apesar de ser longo, as células formadoras do xilema apresentam anatomia própria, de modo a oferecer menor resistência ao fluxo, comparado a outras partes da planta.

Os traqueídes são células do xilema encontradas em gimnospermas e angiospermas mais primitivas, são fusiformes, e se organizam por empilhamento de filas verticais sobrepostas. Entre algumas dessas células pode existir um espessamento central chamado tórus. Os elementos de vaso, típicos de angiospermas, são células filogeneticamente mais evoluídas que os traqueídes, e tendem a ser mais curtas e mais largas que essas. Empilhadas formam um condutor maior chamado de vaso. Dentro dessas células, há formação de bolhas devido à redução, em valores absolutos, do

¹ Modelagem *in silico* é originalmente considerada como uma simulação computacional cujo objetivo é modelar um processo natural ou de laboratório.

potencial hídrico de pressão no xilema. Esse fenômeno é conhecido como cavitação e pode levar à ruptura da coluna de água formada pelo tecido. Com intuito de minimizar esses efeitos, as plantas realizam processos de redução da área do xilema ativo a crescimento secundário xilemático, além do tórus que, presente em algumas espécies, age como uma válvula, fechando as pontoações e evitando a propagação da bolha.

Do ponto de vista da analogia hídrico-elétrica, pode-se estudar o transporte hídrico no caule com o uso de dispositivos hídricos que simulam as células desse tecido, contribuindo, desse modo, com o estudo da cavitação e de seus impactos sobre a planta. Esses dispositivos hídricos têm como base circuitos resistivos-capacitivos.

Este trabalho dá continuidade aos estudos do análogo hídrico-elétrico do caule desenvolvido em meu TCC (LIMA, 2015), no qual, estudou-se o fluxo hídrico no xilema de gimnospermas². Diferentemente daquele, este trabalho trata da análise do circuito análogo ao fluxo e armazenamento hídrico das angiospermas e da calibração do modelo com dados experimentais de resistência e capacitância da espécie *Phaseolus vulgaris* L. (feijão comum) obtidos em experimento desenvolvido pelo grupo de pesquisa.

1.2 Justificativa

Até o momento, os estudos análogos hídrico-elétricos do fluxo em plantas vasculares realizados no Programa de Pós-graduação em Física Ambiental (PEREIRA, 2013; SIQUEIRA, 2014; PEREIRA, 2016) utilizaram dados experimentais de outros autores para calibração do modelo (JONES et al., 1988; GUEYMARD et al., 2002; MUNEER, 2007). Para o grupo de pesquisadores do PPGFA, que utiliza essa modelagem, este estudo tem importância por marcar o início de coleta de dados em experimento desenvolvido pelo próprio grupo. A larga extensão do experimento possibilitou a calibração e a validação do modelo.

Optou-se pelo feijão comum dada sua importância socioeconômica e, sobretudo, pelo curto ciclo de desenvolvimento que possibilitou análises acuradas de fluxo e armazenamento de água no caule.

É projeto do grupo, a construção da planta eletrônica, isto é, um protótipo construído com base nos esquemáticos desenvolvidos no QUCS (Sigla em inglês para

² Na seção 2.9 da revisão bibliográfica, será apresentada um resumo do TCC.

Simulador de Circuito Totalmente Universal). O desafio deste projeto futuro é criar um instrumento que aprenda com os dados coletados, isto é, que faça automaticamente a calibração do modelo análogo hídrico-elétrico.

Sua importância, além de teórica, reside na possibilidade de permitir um melhor aproveitamento da água utilizada em culturas de interesse econômico; possibilita, também, uma representação didática da dinâmica hídrica de plantas vasculares. Os modelos facilitarão a compreensão e o aprendizado com a utilização de gráficos gerados pelas simulações, sendo, assim, um instrumento de ensino (PEREIRA, 2013). O estudo aqui desenvolvido é, também, parte a ser acoplada à futura planta eletrônica.

1.3 Objetivos

Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de um análogo elétrico do caule de angiospermas³ *in silico*, que permita reproduzir os dados experimentais de fluxo e armazenamento hídrico dessas plantas.

Para alcançar o objetivo geral, fez-se necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- a) Construção de arranjo experimental para coleta de informações sobre o comportamento hídrico de plantas vasculares angiospermas - feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.);
- b) Estimativa *in silico* de fluxo hídrico em elementos de vaso com diferentes placas de perfuração, a partir de dados da literatura (ELLERBY e ENNOS, 1998);
- c) Estudo da tendência do fluxo hídrico quando há cavitação e do volume de água em elementos de vaso, *in silico*, a partir de dados da literatura (ELLERBY e ENNOS, 1998);
- d) Estimativa teórica de fluxo hídrico no caule de feijão comum por meio da equação de Poiseuille;
- e) Construção do modelo análogo *in silico* para caule de angiospermas no *software* de simulação de circuitos (QUCS);

³ As descrições detalhadas das células formadoras do tecido xilemático, bem como a definição de angiospermas e sua diferença com as gimnospermas, serão detalhadas na seção 2.3.

- f) Validação do modelo *in silico* com os dados experimentais de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Potencial hídrico

No Contínuo Solo-Planta-Atmosfera, a água flui de um ponto de maior potencial hídrico para um de menor potencial. Isto é análogo ao fluxo de cargas em um potencial elétrico. O fluxo hídrico nesse contínuo é proporcional a diferença de potencial hídrico que pode ser considerado como o potencial químico da água por unidade volumétrica molal (GAIO, 2011).

$$\psi = \frac{\mu - \mu_0}{v} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que μ é o potencial químico no estado observado, μ_0 é o potencial de água pura à altura de referência e v é o volume parcial molal de água pura. Em sistemas de um único componente, em uma molécula de água, por exemplo, o potencial químico é a energia interna por partícula (GAIO, 2011; TAIZ e ZEIGER, 2013).

Nos processos espontâneos, quando a pressão e a temperatura são variáveis de melhor acesso experimental, o potencial hídrico também pode ser calculado em função da energia livre de Gibbs, que representa a capacidade de um sistema de realizar trabalho ou movimento (SALINAS, 2005; STUMM e MORGAN, 2012; SIQUEIRA, 2014).

Em plantas, segundo Taiz e Zeiger (2009), o potencial hídrico (ψ) pode ser obtido pela somatória de seus componentes. Neste trabalho, serão considerados os potenciais osmótico (ψ_π); de pressão (ψ_p) e gravitacional (ψ_g).

$$\psi = \psi_\pi + \psi_p + \psi_g \quad \text{Equação (2)}$$

2.1.1 Potencial osmótico (ψ_π)

O efeito dos solutos no potencial hídrico, quando dissolvidos, é chamado de potencial de soluto ou osmótico (ψ_π). Quando diluídos, os solutos diminuem a energia por um efeito da entropia, consequência da 2ª lei da termodinâmica, e do potencial osmótico (TAIZ e ZEIGER, 2013). A equação de Van 't Hoff (Equação 3) pode estimar o potencial osmótico para solução diluídas em substância que não se dissociam.

$$\psi = -RTC \quad \text{Equação (3)}$$

R é a constante dos gases cujo valor é $8,32 \text{ mol.k}^{-1}.\text{L}^{-1}$, T é a temperatura absoluta do sistema (K) e C é a concentração de solutos, independentemente da natureza das partículas (mol.L^{-1}). O sinal negativo indica que os solutos dissolvidos reduzem o potencial hídrico da solução.

2.1.2 Potencial de pressão (ψ_p)

A pressão que as paredes celulares aplicam sobre a água dentro da célula é chamada de turgescência. Ela aumenta o potencial hídrico, pois é positiva (ROELFSEMA e HEDRIC, 2005). Isso significa que sobre a membrana celular está sendo realizada uma força em sentido de dentro para fora da célula. Por outro lado, a pressão negativa diminui o potencial hídrico como, por exemplo, a sucção exercida pela atmosfera sobre cavidade subestomática.

2.1.3 Potencial gravitacional (ψ_g)

O potencial gravitacional é expresso como sendo a energia potencial gravitacional por unidade de volume molal da água pura localizada a uma altura z do ponto de referência z_0 (Equação 4).

$$\psi_g = \mu_w g z \quad \text{Equação (4)}$$

Nessa expressão, g é o campo gravitacional da Terra ($9,81 \text{ N.kg}^{-1}$ ao nível do mar) e μ_w é a massa específica da água (10^3 kg.m^{-3} , a 20°C sob 1 atm).

2.2 Teoria da tensão-coesão de Dixon

A teoria da tensão-coesão de Dixon e Joyle (1894) descreve que a água é transportada no interior das plantas por meio de capilares em fase contínua até às paredes celulares do mesófilo, sendo que, nesses capilares, há uma redução na energia livre da água em função da evaporação e consequente da curvatura do menisco, que são formadas nos poros das paredes celulares (VIEIRA et al., 2010).

A diferença de potencial hídrico entre solo e atmosfera gera uma força motora (tensão) que faz com que haja movimentação das moléculas de água até a superfície onde ela será transpirada. Após isso, forma-se uma coluna contínua de água da copa à raiz que se mantém pela força de coesão das moléculas de H₂O.

Conforme equação de continuidade ou de conservação de massa, os fluxos de entradas e saídas de água na planta são iguais, ou seja, os fluxos de água são iguais a quantidade transpirada, descontando a quantidade de água armazenada em pontos da estrutura vegetal (GAIO, 2011).

2.3 Xilema

Em plantas vasculares, o xilema é o tecido condutor de água e substâncias inorgânicas neles dissolvidas, estende-se por todo o vegetal e oferece baixa resistência para o fluxo hídrico. Seus elementos de condução são espessos e suas paredes celulares secundárias são lignificadas (NOBEL, 2009). Suas células possuem estruturas anatômicas especializadas que permitem o transporte de grande quantidade de água com eficiência.

Traqueídes e elementos de vaso são as células formadoras do xilema. Encontra-se a primeira em angiospermas primitivas e em gimnospermas (coníferas) e, a segunda, na maioria das vezes, em angiospermas (GLÓRIA e GUERREIRO, 2006; NOBEL, 2009). As angiospermas são vegetais que apresentam flores, frutos e sementes, e as gimnospermas apresentam flores carpelares e não possuem frutos (NOGUEIRA, 2012).

Os traqueídes são células fusiformes achatadas nas extremidades e se organizam de forma empilhada (Figura 1), a passagem do fluxo se dá pela lateral por meio das pontoações que são regiões microscópicas sem presença de parede secundária e, quando encontradas com outras pontoações de células vizinhas, formam os pares de pontoações que oferecem baixa resistência ao fluxo de água (SILVEIRA, 2004; TAIZ e ZAIGER, 2013). Nas membranas de pontoações existem espessamentos centrais chamados tórus (Figura 2) que minimizam o efeito da cavitação, agindo como uma válvula (SPERRY et al., 2006; TAIZ e ZAIGER, 2013).

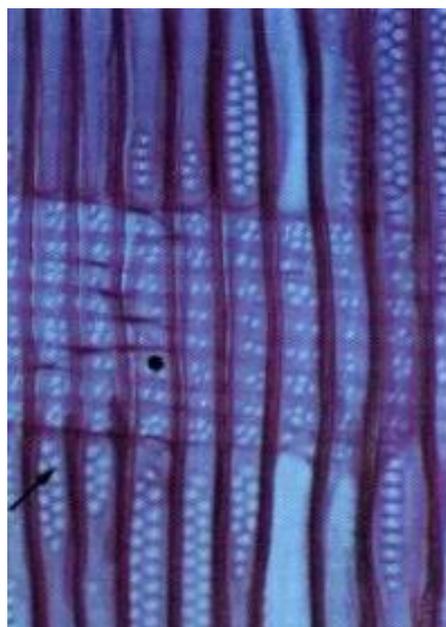


Figura 1. Seção longitudinal radial do xilema secundário do Pinheiro-do-Paraná. A seta indica a célula traqueíde, constituindo, junto com o raio, o lenho homogêneo. Lenho é uma das denominações para o xilema.
Fonte: Costa et al. (2006).

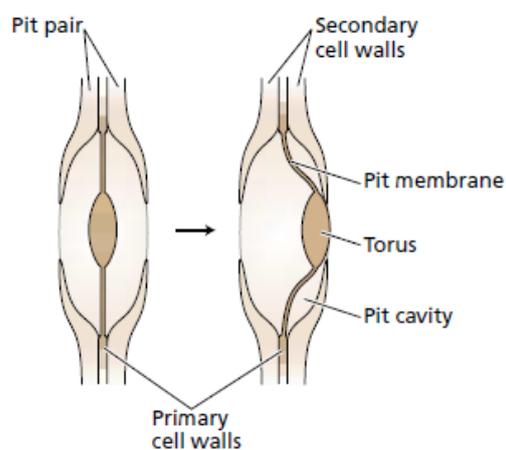


Figura 2. Representação do tórus em uma conífera. As legendas estão traduzidas a seguir. “*Pit pair*” (par de pontoação), “*Primary cell walls*” (paredes celulares primárias), “*Secondary cell walls*” (paredes celulares secundárias), “*pit membrane*” (membrana de pontoação), “*torus*” (tórus) e “*Pit cavity*” (cavidade de pontoação),
Fonte: Taiz e Zeiger (2006).

Os elementos de vaso são células menos longas quando comparadas com os traqueídes, porém um pouco mais largas, e permitem a comunicação pelas paredes terminais. Essa parede terminal sofre processo de dissolução, ocorrentes das junções de elementos de vaso unicelulares, dando origem à placa de perfuração (Figura 3), podendo ser simples ou parcial (GLÓRIA e GUERREIRO, 2006; CHRISTMAN e SPERRY, 2010). A placa de perfuração simples é a mais comum em cerca de 80% das

espécies arbóreas (WHEELER, 1986). Dentre as parciais, estão as placas de perfuração mista, escalariforme, reticulada e foraminada (Figura 3). As placas escalariformes são alongadas com forma padrão de degraus (JUDD et al., 2009). Empilhados, os elementos de vaso formam um condutor maior chamado vaso (NOBEL, 2009).

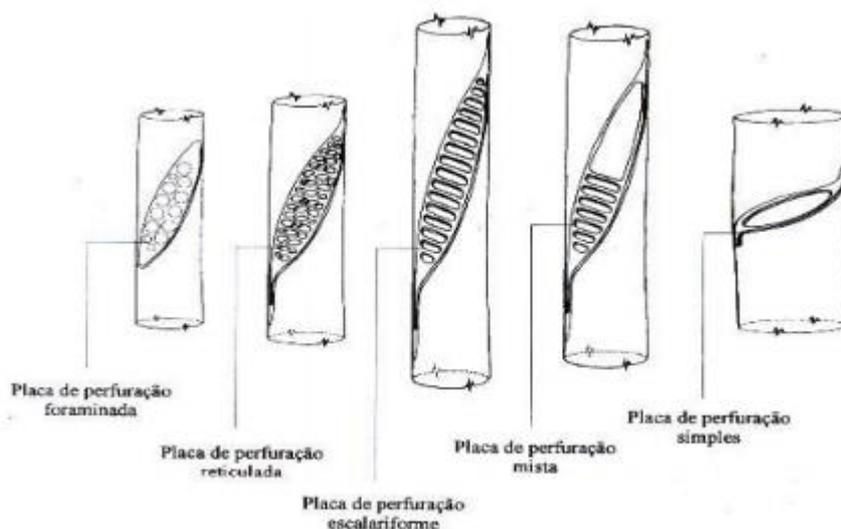


Figura 3. Esquemas das placas de perfuração.

Da esquerda para a direita, têm-se as placas de perfuração foraminada, reticulada, escalariforme, mista e simples.

Fonte: Glória e Guerreiro (2006).

Quando o teor de água relativo do solo diminui, há um valor característico (típico), tornando o potencial de água no solo mais negativo, a pressão negativa do xilema pode ser interrompida por bolhas de gás (Figura 4) que podem se expandir e, como consequência, bloquear ou reduzir o transporte vascular de água (COCHARD e TYREE, 1990; TORREZ-RUIZ, 2017).

Outros autores relacionam mais fortemente à vulnerabilidade da cavitação⁴ com a estrutura e a quantidade de pontoação (CHRISTMAN et al., 2012). A resistência do xilema à cavitação é uma característica importante para ecologia, na distribuição de espécies, e na mortalidade por seca (PADDOCK et al., 2013; JACOBSEN et al., 2014; VENTURAS et al., 2016).

⁴ Junto com o estresse hídrico, o congelamento, para alguns autores, também é citado como uma das maiores causas da cavitação nos vasos (GEROLAMO, 2016).

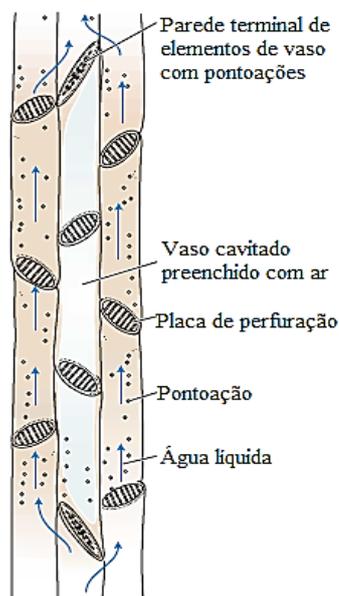


Figura 4. Cavitação em série de elementos vaso. Representação da cavitação em série com 3 elementos de vaso interconectados e separados por placas de perfuração escalariformes. Bolhas de ar bloqueiam o movimento de água.
Fonte: Taiz e Zeiger (2006).

Existem várias maneiras da planta minimizar os impactos da cavitação cujas consequências são de naturezas biomecânicas (SPERRY et al., 2006). Algumas árvores altas, por exemplo, utilizam-se da redução da área do xilema ativa como estratégia para evitar a cavitação. Nessas árvores, há criação de elevada pressão interna nos vasos, fazendo com que, então, as paredes dos vasos cedam-se (LANGAN et al., 1997).

Mesmo quando a água está sob tensão, a cavitação pode ser reparada. Como a transpiração das plantas à noite é baixa, tem-se um aumento do potencial de pressão (ψ_p), e os vapores de água de solução do xilema podem se redissolver. Também, em algumas espécies, o efeito da cavitação é minimizado pelo crescimento secundário do xilema ou pelo desenvolvimento de pressão positiva na raiz (HOLBROOK et al., 2001; TAIZ e ZEIGER, 2013).

A lei de Poiseuille foi utilizada por diversos autores para o estudo da influência da cavitação no transporte hídrico no xilema (POCKMAN e SPERRY, 1996; SPERRY e IKEDA, 1997; WHEELER et al., 2005; SCHREIBER et al., 2016; ZHANG et al., 2016). Essa lei relaciona o fluxo laminar de um fluido newtoniano cuja viscosidade é constante em relação ao tempo (MOREIRA, 2008; WESTERHOF et al., 2010).

Considerando a lei de Poiseuille, quanto maior a largura do vaso, maior é a condutividade hídrica, pois esta depende da quarta potência do raio de cada vaso (GIORDANO et al., 1978; BAAS et al., 2004). Porém, quanto maior a condutividade hidráulica mais vulneráveis os vasos serão perante à cavitação (SPERRY et al., 2008; MELCHER et al., 2012) e isso deve-se ao fato de que os vasos maiores tendem a ter uma parede mais pontiaguda, o que por sua vez pode aumentar a probabilidade de existir um poro maior na membrana de pontuação sendo, então, mais propenso ao ar (GUET et al., 2015).

O armazenamento de água no caule é um importante fator na relação hídrica no contínuo solo-planta-atmosfera. Além de estar envolvido da regulação estomática (MEINZER et al., 2008), o estoque de água no caule pode contribuir, por exemplo, para o brotamento de folhas e floração de árvores decíduas durante estação seca em floresta tropical (BORCHERT, 1994). Essa água estocada pode ser retirada conforme a mudança de potencial hídrico (SPERRY et al., 2008).

2.4 Analogia hídrico-elétrica

2.4.1 Lei de Ohm

Os processos de sucção de água pelas raízes, o transporte pelo xilema, até a saída em forma de vapor estão fortemente ligados entre si e formam um contínuo no sistema solo-planta-atmosfera, como afirma a Teoria Dixon e Joyle (1894). Com isso, o modelo da lei de Ohm análoga (GRADMANN, 1928; VAN DEN HONERT, 1948) trata o fluxo de água nesse contínuo como um análogo à corrente elétrica através de um condutor (ZHUANG e NAKAYAMA, 2014). A 1ª lei de Ohm (Equação 5) e a Lei análoga de Ohm (Equação 6), ao se desconsiderar a existência de armazenamento, seguem abaixo.

$$V = r \cdot i \quad (\text{Equação 5})$$

Nessa expressão, V é o potencial, ou tensão, dado em volts (V), r é a resistência em ohms (Ω) e i é a corrente elétrica em ampere (A).

Analogamente, para dinâmica hídrica, tem-se a Equação 6. Onde os símbolos ψ , r , f referem-se ao potencial hídrico (Pa), resistência ($\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^3$) e fluxo hídrico ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), respectivamente.

$$\psi = r \cdot f \quad (\text{Equação 6})$$

A diferença de potencial hídrico, entre dois pontos quaisquer de um determinado segmento de circuito hídrico, será expressa em função da resistência ao fluxo entre esses dois pontos e do fluxo nestes pontos. Por exemplo, o fluxo de água no xilema, da raiz até às folhas, depende da diferença entre os potenciais hídricos do xilema da raiz (ψ_{xr}) e da célula dos mesófilos (ψ_{cm}) (folha) dividida pela resistência do xilema neste trecho do circuito (r_{xc}) (Equação 7) (KOZLOWSKI e PALLARDY, 1997).

$$f = \frac{\psi_{xr} - \psi_{cm}}{r_{xc}} \quad (\text{Equação 7})$$

Nobel (2009) sugeriu valores de potenciais hídricos de cada parte das plantas.

2.4.2 Leis análogas de Kirchhoff

Dado ser o potencial hídrico uma variável de estado, é possível definir as leis análogas de Kirchhoff para resolver sistemas de equações gerados pelos circuitos desta modelagem (GAIO, 2011):

- a) Lei análoga das malhas: o potencial hídrico e o potencial eletrostático são variáveis de estado, uma função de ponto. Logo, em um circuito fechado, a diferença de potencial hídrico é nula.
- b) Lei análoga dos nós: existe conservação do volume em qualquer ponto do circuito.

Com isso, a partir das quantidades conservadas no circuito elétrico (energia e carga) e no circuito elétrico análogo (energia e volume), faz-se possível estabelecer as relações (Tabela 1).

Tabela 1. Grandezas análogas entre fluxo elétrico e hídrico. Tem-se, a partir da carga, característica intrínseca à matéria, e o volume as relações das grandezas.

Grandeza (Eletromagnetismo)	Símbolo	Relação	Grandeza (Hídrico)	Símbolo	Unidade
Carga elétrica	coulomb	C	Volume		m ³
Potencial elétrico	volt	J.C ⁻¹	Potencial	Pascal(Pa)	J.m ⁻³
Corrente	ampere	C.s ⁻¹	Fluxo		Pa.s.m ⁻³
Resistência	ohm	V.A ⁻¹	Resistência		m ³ .s ⁻¹
Capacitância	farad	C.V ⁻¹	Capacitância		m ³ .Pa ⁻¹

Fonte: Adaptado de Gaio (2011).

2.4.3 Circuito RC

O circuito RC, Figura 5, é formado pelo capacitor C1, resistor R1, ponteira de corrente Pr1 e a diferença de potencial V1. Os valores de carga e a diferença de potencial sobre o capacitor C1 representam o volume (W) e potencial hídrico (ψ) para o dispositivo hídrico, respectivamente.

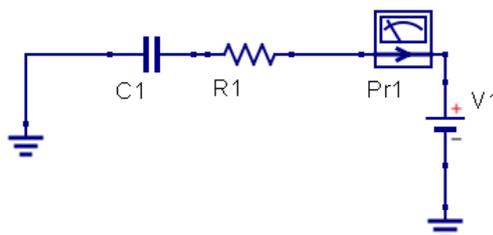


Figura 5. Circuito RC.

Com aplicação da lei das malhas no circuito, Figura 5, tem-se uma equação diferencial para descarga do capacitor, análoga à eletricidade (Equação 8). A capacitância relaciona-se com a quantidade de água que se retira do solo pelas células da raiz, a fonte de tensão fornece a diferença de potencial hídrico e a resistência representa a soma das resistências por associação em série e paralelo (GAIO, 2011).

$$\Delta\psi + \frac{W}{C} - \frac{RdW}{dt} = 0 \quad (\text{Equação 8})$$

As quantidades de água armazenada, nos instantes de tempo qualquer (t) e inicial (t_0), denotam-se por W e W_0 . Resolvendo a integral, tem-se o volume de água retirada do solo.

$$\int_{W_0}^W \frac{dW}{C\Delta\psi + W} = \int_0^t \frac{dt}{RC} \quad (\text{Equação 9})$$

$$W = (C\Delta\psi + W_0)e^{\left(-\frac{t}{RC}\right)} - C\Delta\psi \quad (\text{Equação 10})$$

Derivando a equação 10 em relação ao tempo, tem-se a expressão do fluxo. Esta expressão mostra que o fluxo é contrário ao gradiente potencial hídrico, conforme pode ser visto pelo sinal negativo (Equação 11).

$$f = - \frac{(C\Delta\psi + W_0)}{RC} e^{\left(-\frac{t}{RC}\right)} \quad (\text{Equação 11})$$

O produto da resistência e a capacitância RC tem unidades de tempo e é chamado de tempo característico (τ).

$$f = - \frac{(C\Delta\psi + W_0)}{RC} e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (\text{Equação 12})$$

2.4.4 Circuito básico para o caule

Como o processo de sucção se dá pela raiz, no circuito básico para o caule, Gaio (2011) confeccionou o circuito com duas portas de entradas, as quais são chamadas de abx e acm (Figura 6). Na abx , tem-se a chegada do fluxo das camadas da raiz e na acm tem-se a saída do fluxo para as camadas superiores (para os módulos das folhas ou para outro módulo de caule).

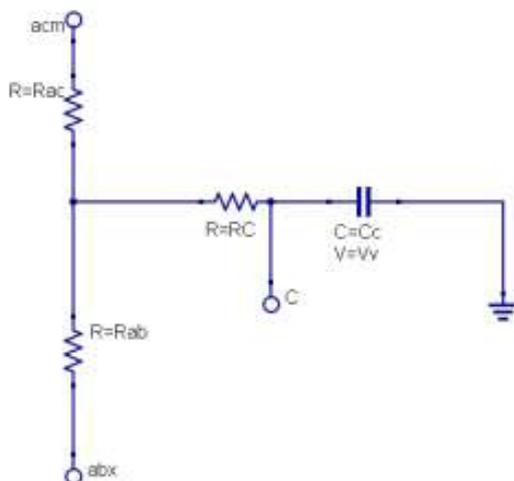


Figura 6. Circuito básico do caule. Na parte esquerda, tem-se as portas acm , abx e os resistores Rac e Rab . Na parte central, tem-se o resistor Rc . Por fim, lado direito tem-se o capacitor CC .
Fonte: Gaio (2001).

O resistor RC representa a resistência de descarregamento e a capacitância relativa ao armazenamento do caule é denotada por CC .

A Tabela 2, com base no trabalho de Nobel (2009), traz valores para a capacitância (C) do caule de uma árvore com altura (hc), taxa de transpiração diária

(Tr), volume do caule (Wc), variação diurna de volume do caule (ΔW), diferença de potencial hídrico ($\Delta \psi$). Os exemplos dessa tabela são para uma árvore hipotética com 10 m de altura de caule (hc), transpiração diária de 4 mm.dia⁻¹ (j), área foliar da copa de 16 m² (A), 0,1m de raio (rc) com variação de 1%.

Tabela 2. Capacitância da árvore com as características citadas no texto.

Grandeza	Expressão	Valor
Taxa de transpiração diária	$Tr=Aj$	0,0064 m ³ .dia ⁻¹
Volume do caule	$Wc= \pi(rc)^2hc$	0,314 m ³
Variação diurna de volume do caule	$W=\pi[(0,99rc)^2-rc^2]hc$	-0,0063 m ³
Diferença de potencial hídrico	$\Delta\psi=\Delta\psi_g-\Delta\psi_s$	-0,4 Mpa
Capacitância	$C= \Delta W \Delta\psi^{-1}$	1,6 x10 ⁻² m ³ .Mpa ⁻¹

Fonte: Nobel (2009).

A transpiração diária (Tr) foi obtida pelo produto da área foliar (m²) e taxa diária de transpiração (m².dia⁻¹). Para o cálculo do volume do caule, foi preciso considera-lo na forma de um cilindro circular reto. A variação do volume (m³) do caule foi calculada em função da variação do raio, 1%, com altura constante (h). A diferença de potencial hídrico foi de -0,4 MPa, obtida pela diferença do componente gravitacional e osmótico. Por fim, a capacitância encontrada foi obtida a partir da razão entre variação do volume e diferença de potencial hídrico.

Gaio (2011), em seu trabalho, utilizou valores a partir de Nobel (2009), porém diferenciou-se no cálculo da capacitância. Para a resistência associada a capacitância e a resistência ao fluxo contínuo do componente os valores foram de 20% e 80% do valor da resistência potencial (1,5x10⁶ MPa.m³.s). A capacitância (Equação 13) foi obtida por meio da solução da Equação 8 e os valores utilizados estão na Tabela 3.

$$C = \frac{W}{fR-\Delta\psi} \quad (\text{Equação 13})$$

Tabela 3. Valores utilizados por Gaio (2011) para o cálculo da capacitância.

Grandeza	Símbolo	Valor
Volume	W	0,0942 m ³
Fluxo	f	7,27x10 ⁻⁷ m ³ .s ⁻¹
Diferença de potencial hídrico	$\Delta\psi=\Delta\psi_g-\Delta\psi_\pi$	-0,4 Mpa
Resistência em função do capacitor	R	5,99 x10 ⁴ MPa.m ³ .s

A quantidade de água no caule, dependendo da época do ano e da espécie, corresponde de 20% a 50% sobre o volume total do caule. Gaio (2011) considerou um valor intermediário de 30% do volume do caule. O fluxo considerado foi de $0,0063 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ ($7,27 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Com isso, o valor de capacitância obtido foi de $0,2124 \text{ m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$, com tempo característico de 3,5 horas.

2.5 Simuladores de Circuitos

Os simuladores de circuitos são ferramentas que podem auxiliar no estudo de circuitos eletrônicos, nas aplicações desses circuitos e no cálculo das propriedades dos diversos componentes. Dentro desse contexto, o QUCS é um eficiente software de confecção e simulação de circuitos que está em desenvolvimento desde 2004 (SCORDILIS et al., 2007). Além de ser gratuito (licença GPL), o QUCS oferece uma gama de componentes de grande, médio e pequeno porte (Figura 7).

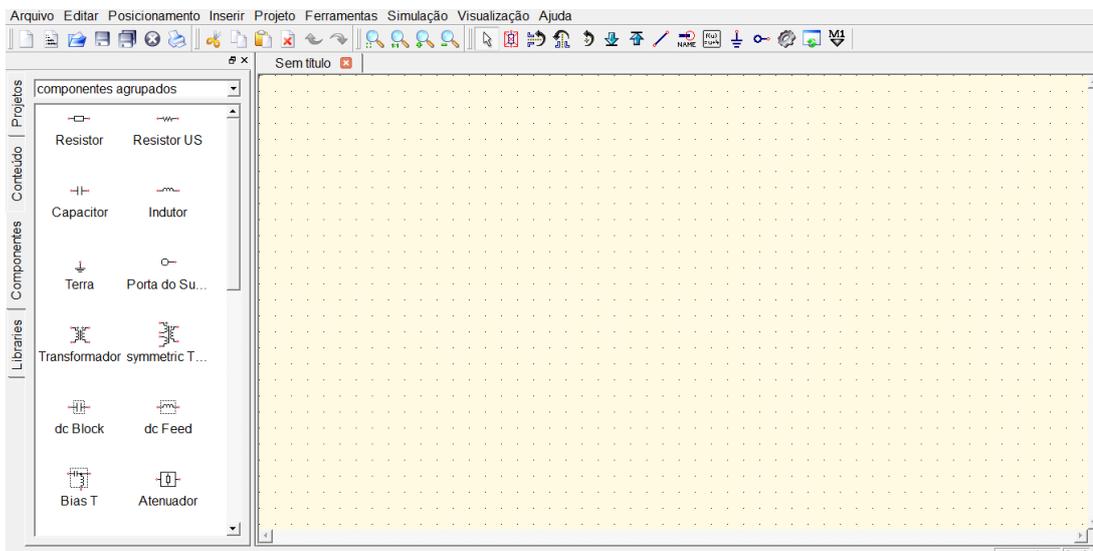


Figura 7. Esquemático do software Qucs, ressaltando a diversidade de componentes eletrônicos oferecidos para simulações.

Após a solução das equações diferenciais por métodos numéricos, o QUCS pode oferecer diagramas que geram informações a respeito do circuito e da simulação desejada, como o fluxo elétrico, por exemplo. O software permite também fazer o encapsulamento de um circuito (Figura 8) sob um símbolo, sem perda das suas características, permitindo, assim, a conexão com outros circuitos encapsulados por meio de portas de conexão, definidas pelo usuário (Figura 9).

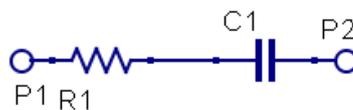


Figura 8. Resistor e capacitor com as portas P1 e P2.

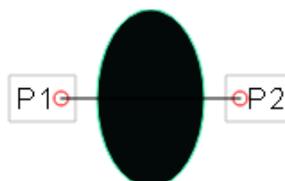


Figura 9. Símbolo representativo do circuito da figura 5.

De forma sequencial, a partir do trabalho de Gaio (2011), outros autores do grupo do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental utilizaram o QUCS no estudo da analogia hídrico-elétrica de partes específicas de plantas vasculares. Pereira (2013) simulou a pressão de turgescência dos estômatos da espécie *Vicia faba*; Siqueira (2014) modelou as vias de transporte hídrico da raiz em plantas vasculares (milho e trigo); Pereira (2016) desenvolveu um análogo elétrico, *in silico*, do movimento estomático em função da radiação solar e do potencial hídrico atmosférico e Ferreira (2017) desenvolveu um módulo de software para simulação do fluxo de calor no solo.

2.6 Medida de Evapotranspiração

2.6.1 Experimento de Denmead e Shaw (1962)

Denmead e Shaw (1962) investigaram como a transpiração das plantas sofre influência de diversos fatores, como, por exemplo, a umidade do solo e as condições atmosféricas do local. Para isso, em 3 dias com diferentes condições atmosféricas (seco e claro; úmido e parcialmente nublado e úmido e chuvoso), a transpiração de plantas de milho foi monitorada em contêineres, sendo que a quantidade de água presente foi mantida constante. Com isso, em relação aos dados experimentais, curvas foram ajustadas para os regimes possíveis da transpiração. O trabalho de Denmead e

Shaw é utilizado como referência em diversos trabalhos da literatura (ARÉVALO et al., 2014; FERREIRA et al., 2015; NADAL-SALA et al., 2017)

2.6.2 Lisímetros de pesagem

A evapotranspiração de uma cultura (ET) pode ser medida de maneira direta por meio dos lisímetros (FIGUERÊDO et al., 2009). Os lisímetros, que podem ser construídos de vários materiais, como tambores, por exemplo, são utilizados para mensurar os componentes do balanço de água do contínuo SPA (Solo-Planta-Atmosfera) e os de pesagem são considerados os mais precisos para determinação direta da ET que é feita pelo método do balanço de massa (FARIA et al., 2006).

Para diminuir a evaporação, um dos componentes da evapotranspiração, recomenda-se a cobertura do solo, independentemente do tipo de solo, clima e cultura (BORGES e SOUZA, 1998). Em se tratando da cobertura do solo feita por plástico, muitos benefícios podem ser trazidos para as plantas, como, por exemplo, a conservação da umidade próxima da superfície do solo, o aumento da concentração de raízes na parte mais fértil do solo e da atividade microbiana etc. (CLARK e MAYNARD, 1992; TSEKLEEV et al., 1993; ALMEIDA, 2012).

2.6.3 Características da Cultura: Feijão

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das principais culturas agrícolas produzidas no Brasil e no mundo, tendo importância na economia, na segurança alimentar e nutricional (BARBOSA e GONZAGA, 2012). Além de ser um dos maiores produtores, tendo sua produção na safra de 2013/2014 de 3,45 milhões com rendimento de 1026 kg ha⁻¹, o Brasil destaca-se também pelo grande consumo do grão (FAO, 2011; CONAB, 2015).

Tem-se dois centros primários para origem da espécie *Phaseolus vulgaris* L. (FARIA, 2012). Segundo Athanázio (1993), a espécie teve sua origem no primeiro centro, cultivada pelos povos pré-colombianos, desde o Canadá até à Argentina. Para De Oca (1987), ela se originou na Europa como resultado de mutações genéticas do feijão vindo da América.

O feijão é uma espécie de angiosperma com a presença de dois cotilédones (ALMEIDA e ALMEIDA, 2014). Segundo Silva (1999 apud Embrapa, 2003), o caule do feijão é herbáceo, classificado morfologicamente como haste e possui formato cilíndrico, quando atingida a fase adulta (VIEIRA et al., 2006). É formado por uma sucessão de nós e entrenós, estando no primeiro os cotilédones e no segundo as folhas primárias. A partir da terceira, estão as folhas trifolioladas. O caule do feijão também apresenta pilosidade e colorações que variam de acordo com a posição, com o estágio de desenvolvimento e as condições ambientais (VIEIRA et al., 2006)

Em razão da diversidade de ambientes nos quais se cultivam feijão comum, a espécie se destaca por sua variabilidade de caracteres agronômicos, que vão desde crescimento, cor de grãos e ciclo (VIEIRA et al., 2006). Dos doze grupos gênicos, nos quais as variabilidades da espécie foram agrupadas, os cultivares carioca, mulatinho, e rosinha, cujas cores das sementes variam de preta a branca, fazem parte do grupo 3 e também são da raça Mesoamericana (VIEIRA et al., 2006).

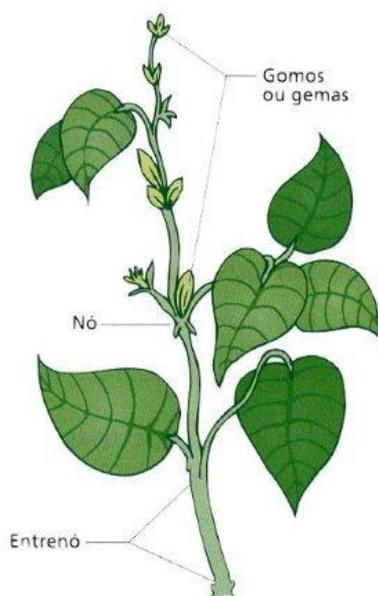


Figura 10. Ilustração do caule do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) com a indicação do nó e entrenó.

Fonte: Disponível em <http://slideplayer.com.br/slide/395161/>.

Devido a sua alta adaptabilidade, o feijão tem um desenvolvimento satisfatório em temperaturas entre 18° a 30°C e, com relação ao fotoperíodo, sua produção em dias curtos ou longos pode se equivaler (FILGUEIRA, 2008). A duração das fases fenológicas do feijão, em média, é de trinta e cinco dias da germinação ao início da floração, vinte e cinco dias a floração e do desenvolvimento das vagens à

maturação são vinte dias, totalizando 90 dias o ciclo do feijoeiro (BARBOSA e GONZAGA, 2012).

A Tabela 4 traz as subdivisões das fases fenológicas com o tempo médio de cada uma.

Tabela 4. Subdivisões das fases fenológicas do feijão⁵.

Estádio	Intervalo de tempo previsto (dias)	
	Média	Limites
Germinação e emergência	11	3 a 40
Vegetativa	40-60	
Floração	14	
Maturação	14	
Total	~90	

A escala de desenvolvimento de feijão proposta por Geptz e Fernandez (1982) é a mais utilizada nos estudos envolvendo esse tema. Nessa proposta, o desenvolvimento do feijão consiste em dez etapas: cinco vegetativas e outras cinco reprodutivas (ABRANTES, 2008).

A primeira fase vegetativa (V0) é a germinação, que se inicia na sementeira e termina quando os cotilédones atingem a superfície do solo. A segunda fase (V1) corresponde à emergência e é caracterizada pelo surgimento do hipóclito encurvado, que é porção do eixo do embrião entre o ápice da raiz e os cotilédones, e é finalizada quando as folhas primárias se separam e se abrem, dando início, assim, à terceira fase (V2).

Essa fase termina quando a primeira folha trifoliada está totalmente aberta, a quarta fase (V3) inicia-se com a primeira folha trifoliada aberta e termina com terceira folha trifoliada totalmente aberta. Na fase V4, podem surgir hastes secundárias, e também, na haste principal, podem surgir novas folhas trifoliadas. O final dessa fase é marcado pelo início do florescimento que é o início da reprodução do feijão (GEPTZ e FERNANDEZ, 1998; FANCELLI e DOURADO-NETO, 1997; VIEIRA et al., 2006; ABRANTES, 2008).

As 5 fases reprodutivas são R5, que consiste na pré-floração; R6, que corresponde abertura da primeira flor; R7, que dá início a fase de aparecimento das

⁵ As informações contidas na Tabela 4, sobre as subdivisões das fases fenológicas do feijão, estão disponíveis no site <http://www.ehow.com.br/estagios-crescimento-feijao-fatos_8671/>.

primeiras vagens; R8, que consiste na etapa de enchimento das vagens e, por fim, R9, maturação, que apresenta descoloração das vagens, queda das folhas até a seca total da planta (VIEIRA et al., 2006; ABRANTES, 2008).

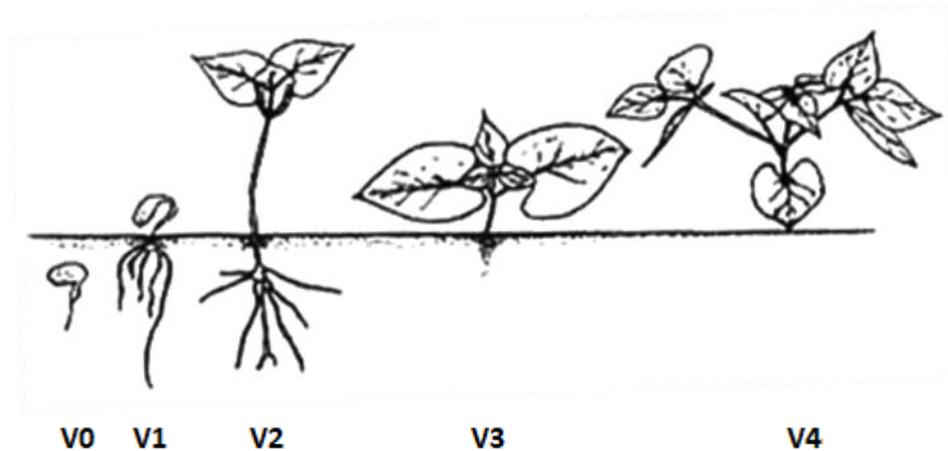


Figura 11. Fase vegetativa de uma planta de feijão comum, desde V0 à V4 (esquerda para direita).
Fonte: Vieira et al. (2006).

2.7 Lei de Poiseuille

A lei de Poiseuille (Equação 14), de grande importância no estudo da hidrodinâmica, relaciona o fluxo laminar de uma solução simples em um tubo cilíndrico (MOREIRA, 2008). Essa lei descreve o fluxo volumétrico ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) de um fluido incompressível, sem variação da densidade e viscosidade, em um tubo de forma cilíndrica com raio r e comprimento L .

$$Q = \frac{\pi \Delta P r^4}{8L\eta} \quad (\text{Equação 14})$$

ΔP é a diferença de pressão nas duas extremidades do tubo (Pa), η é a viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s), L e r representam o comprimento e raio do tubo (m), respectivamente. Segundo Lima e Luz (2001), a viscosidade da água pode ser calculada em função da temperatura T em Kelvin (K).

$$\eta_{\text{água}} = 0,002488 - 0,0049567 \ln(T - 273) \quad (\text{Equação 15})$$

Isolando a variação de pressão (ΔP) da Equação 14, obtêm-se:

$$\Delta P = \frac{8L\eta Q}{\pi r^4} \quad (\text{Equação 16})$$

Essa equação corresponde a lei de Ohm para circuitos hídricos (MOREIRA,2008), tomando como propriedade intrínseca ao tubo a resistência laminar que é representada pela equação abaixo.

$$R_{lam} = \frac{8L\eta}{\pi r^4} \quad (\text{Equação 17})$$

2.8 Dados de referências para elementos de vaso

Ellerby e Ennos (1998) construíram um aparato experimental, de larga escala (Figura 12), quando comparado com o tamanho real da célula (μm), para calcular as resistências impostas por placas de perfuração dos elementos de vaso e pela própria parede das células.

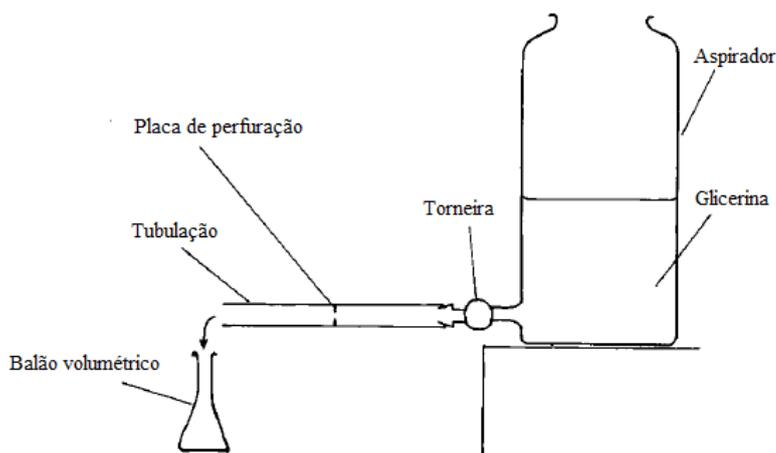


Figura 12. Aparato experimental de Ellerby e Ennos (1998).

O aparato de Ellerby e Ennos (1998) consistiu em aspirador de 2 L, glicerina, torneira, modelo de placa de perfuração, tubulação e balão volumétrico.

Fonte: Adaptado de Ellerby e Ennos (1998).

A torneira foi completamente aberta para que o glicérol escorresse através do tubo até chegar ao volume de 50 ml no balão volumétrico, medindo, assim, o tempo desse processo. Com isso, os dados foram aplicados a lei de Poiseuille e ao cálculo do

número de Reynold, chegando, assim, em uma relação direta entre o comprimento do tubo e a resistência. O maior comprimento de tubulação utilizado em testes foi de 0,75 m com diâmetro de 10 mm e as placas de perfuração com abertura de 5 a 8 mm (simples) e $0,31 \pm 0,02$ mm (escalariforme) (Figura 13).

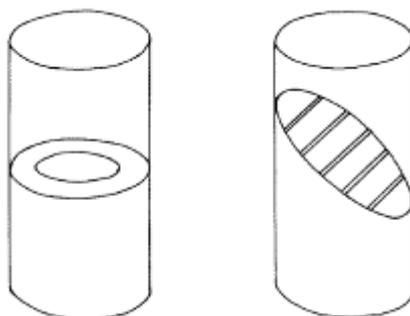


Figura 13. Modelo simplificado de placas de perfuração.

No lado direito, tem-se a placa de perfuração escalariforme e no lado esquerdo tem-se a placa de perfuração simples.

Fonte: Ellerby e Ennos (1998).

Esses autores consideraram, com base em Forst (1930), o comprimento de tubo de 0,363 m como sendo elementos de vaso reais de $1090 \mu\text{m}$ e comprimento de 0,137 m para elementos de vaso reais de $410 \mu\text{m}$.

Sendo assim, as resistências da tubulação desobstruída, sem as placas, foram de $3,11 \times 10^9 \text{ Pa.s.m}^{-3}$ e $1,18 \times 10^9 \text{ Pa.s.m}^{-3}$ para as tubulações com 0,363 m ($1090 \mu\text{m}$) e 0,137 ($410 \mu\text{m}$), respectivamente. As resistências impostas pelas placas de perfurações simples com 8 a 5 mm de abertura foram de 2×10^7 a $6 \times 10^7 \text{ Pa.s.m}^{-3}$ e as resistências impostas pelas placas escalariformes foram de $2,1 \times 10^7$ a $58 \times 10^7 \text{ Pa.s.m}^{-3}$.

2.9 Circuito para o caule de coníferas

Nesta seção, serão descritos resumidamente os resultados da modelagem do fluxo hídrico em caule de coníferas (LIMA, 2015), de modo se analisar (na seção 4) as diferenças entre as duas modelagens

Para a modelagem das plantas que apresentam tórus entre traqueídes, foram utilizados valores de resistência e capacitância baseados em Lanchashire et al. (2002) para a espécie *Tsuga Canadensis*. Essa conífera, que pertence ao grupo gimnosperma, tem origem norte americana.

O símbolo representativo para o circuito do caule desenvolvido por Gaio (2011) está ilustrado na Figura 14.



Figura 14. Símbolo representativo do circuito básico do caule.

Nesse trabalho, considerou-se o circuito do caule desenvolvido por Gaio (2011) como sendo o circuito básico das células traqueídes. P1 e P2 são os conectores, elas representam a porta de entrada e saída para os outros dispositivos.

Para o tórus tem-se um resistor como componente do circuito (Figura 15), símbolo representativo ilustrado na Figura 16.



Figura 15. Circuito básico do tórus.

Este circuito simples com um resistor que, para o tórus real, representaria a resistência da passagem do fluxo hídrico para outro traqueíde. P1 e P2 são os conectores, elas representam a porta de entrada e saída para os outros dispositivos.

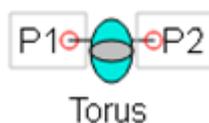


Figura 16. Símbolo representativo do circuito tórus.

Com a junção de dois tórus nas duas portas do símbolo representativo dos traqueídes, tem-se o sistema traqueíde-tórus que compõe a célula xilemática (Figura 17).

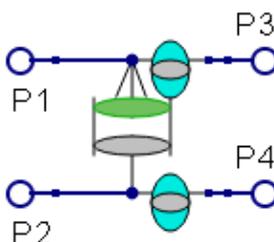


Figura 17. Circuito básico para o sistema traqueíde-tórus. Essa representação permite englobar as características do circuito do tórus, figura 16, e do traqueíde, figura 14.

O símbolo representativo para o circuito traqueíde-tórus (Figura 18) mostra o caminho da corrente hídrica, para um outro circuito que, de maneira análoga, representa a passagem de água de um traqueíde a outro. Essa passagem dá-se pelas portas P1 a P4, considerando o transporte lateral da água, sem comunicação nas extremidades.

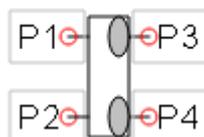


Figura 18. Símbolo representativo do circuito traqueíde-tórus.

Define-se, no âmbito desse trabalho, índice de ligados como o número de traqueíde-tórus totalmente ligados pelas 4 portas. Quando o fluxo é interrompido, por cavitação, por exemplo, elimina-se uma dessas ligações.

O circuito geral para o caule com 100 traqueíde-tórus com os índices de ligados igual a 1 está representado na figura 19. Na Figura 20, tem-se um exemplo de interrupção do fluxo hídrico em um circuito com 100 traqueídes. Nesse caso, há 95% dos traqueíde-tórus totalmente ligados, assim, para esse exemplo, o índice de ligados é igual a 0,95.

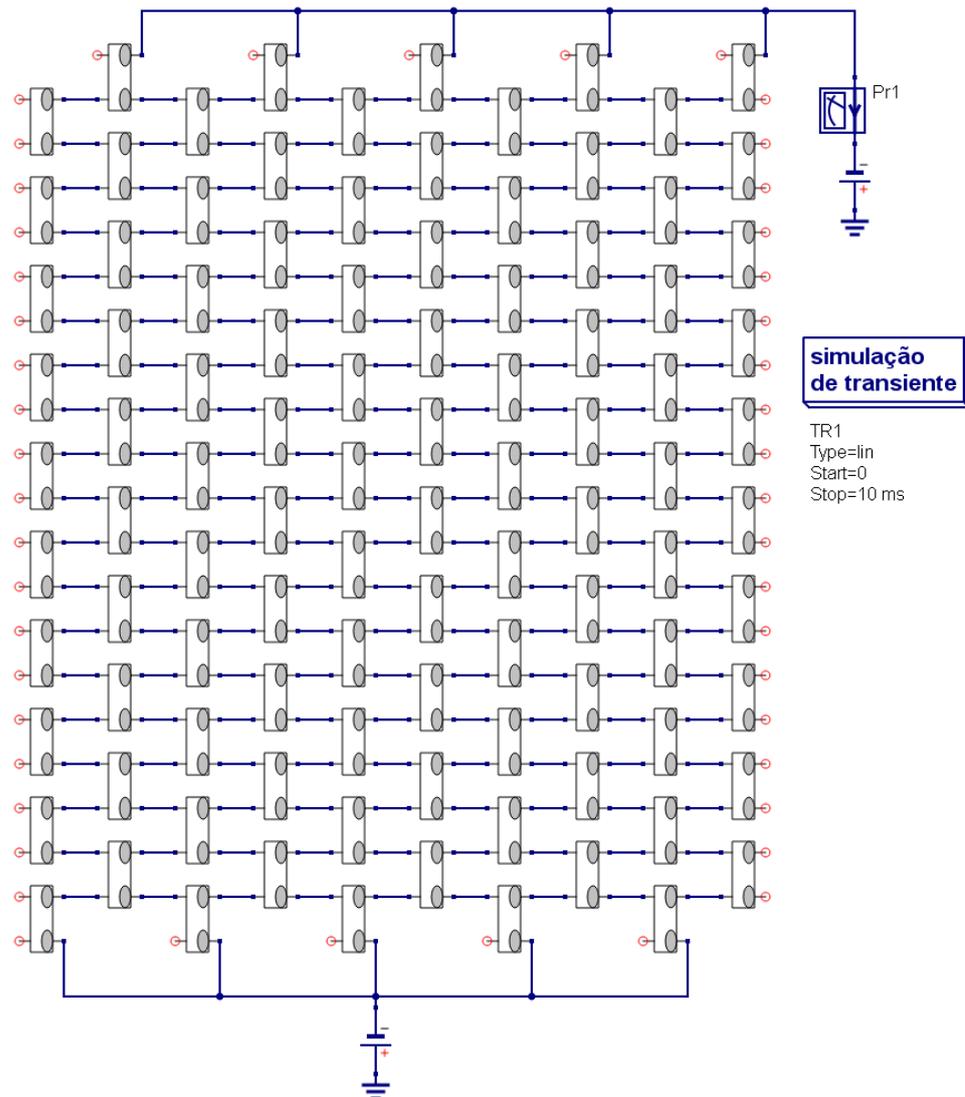


Figura 19. Representação do circuito hídrico de caule da espécie *Tsuga Canadensis*. Este circuito representa 100% dos traqueíde-tórus totalmente ligados.

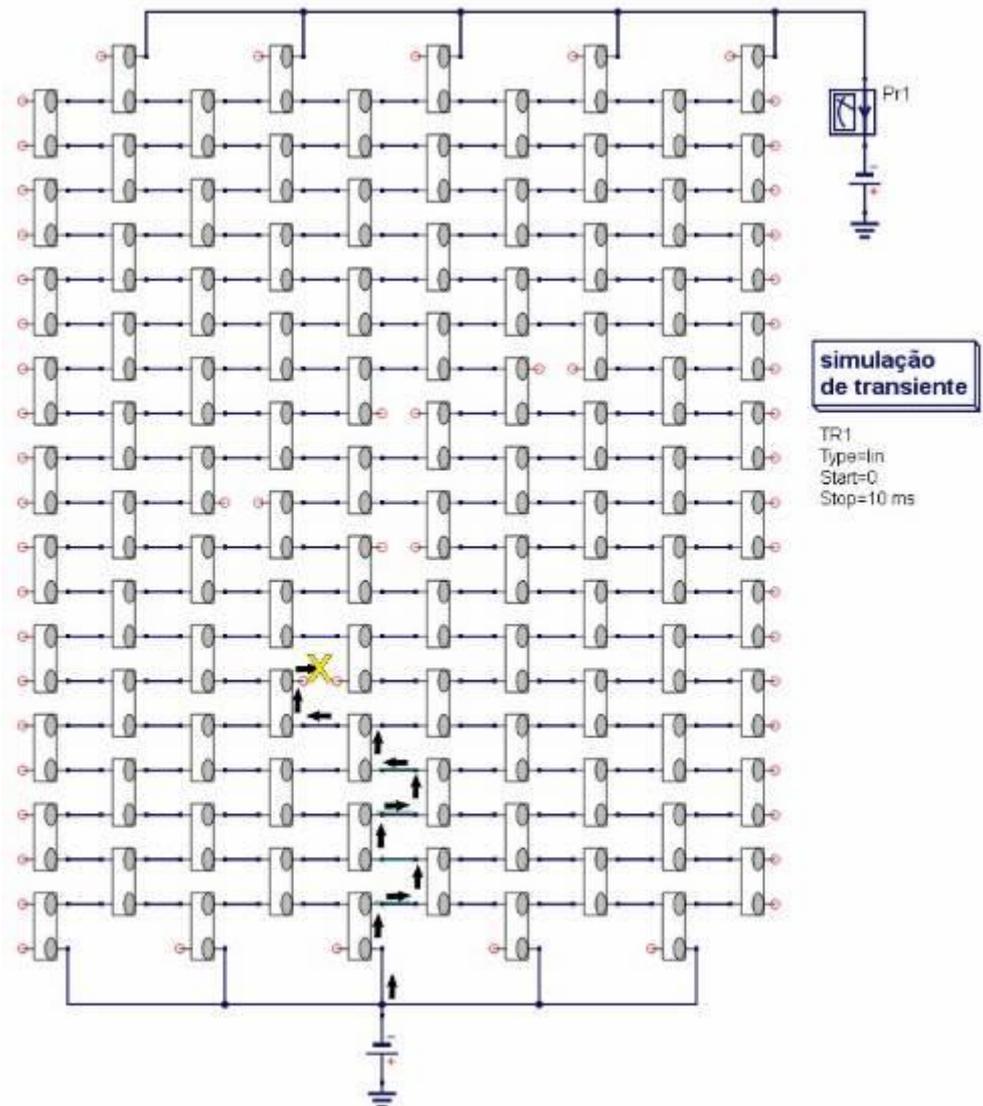


Figura 20. Representação do circuito hidráulico de caule da espécie *Tsuga Canadensis*.

Este circuito representa 95% dos traqueíde-tórus totalmente ligados. As setas representam o sentido do fluxo que, por causa do desligamento de um fio, foi obstruído. Caracterizando a cavitação cuja consequência é ruptura do fluxo hídrico.

As médias dos fluxos obtidos para a conífera *Tsuga Canadensis* tiveram decaimento polinomial conforme a diminuição do índice de ligados. Ou seja, a queda do fluxo hídrico (Figura 21) devido à cavitação é descrita como não linear (e, no caso mais intensa do que seria nesse regime).

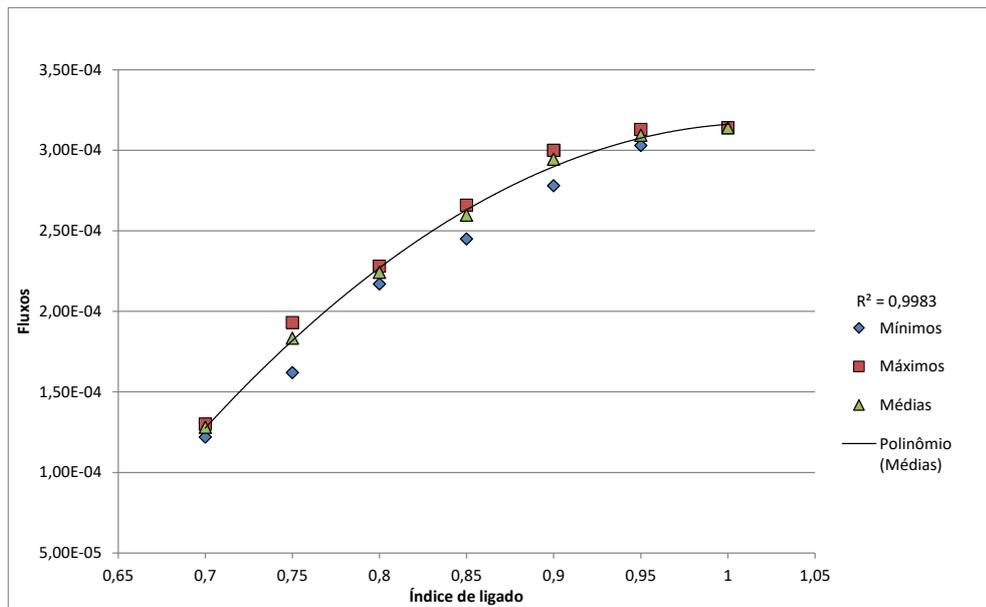


Figura 21. Linha de tendência polinomial entre os valores mínimos, máximos e médios dos fluxos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para o cumprimento dos objetivos, o trabalho foi desenvolvido em três frentes: o experimento; estimativas teóricas e modelagem no QUCS.

3.1 O Arranjo experimental

De modo a cumprir o objetivo específico “a”, foi desenvolvido um experimento na área adjunta à bordadura da estação meteorológica “Mestre Bombled” situada na Universidade Federal de Mato Grosso, campus Cuiabá, presente nas coordenadas 15° 36’ 31’’ S de latitude e 56° 03’49’’ W de longitude (Figura 22). Esse experimento permitiu um amplo conjunto de medidas do fluxo hídrico em lisímetros.

Estrutura

Foram confeccionadas três mesas com 66 lugares cada para colocação dos lisímetros arranjados em 11 filas e 6 colunas (Figuras 22 e 23). Os lisímetros foram construídos a partir de vasos de 1,7 litros com 8,9 centímetros de diâmetro de base e 20,7 cm de altura (Figura 24). Garrafas pet foram adaptadas às bases dos vasos para facilitar o controle de água que viesse a permanecer no fundo da estrutura.

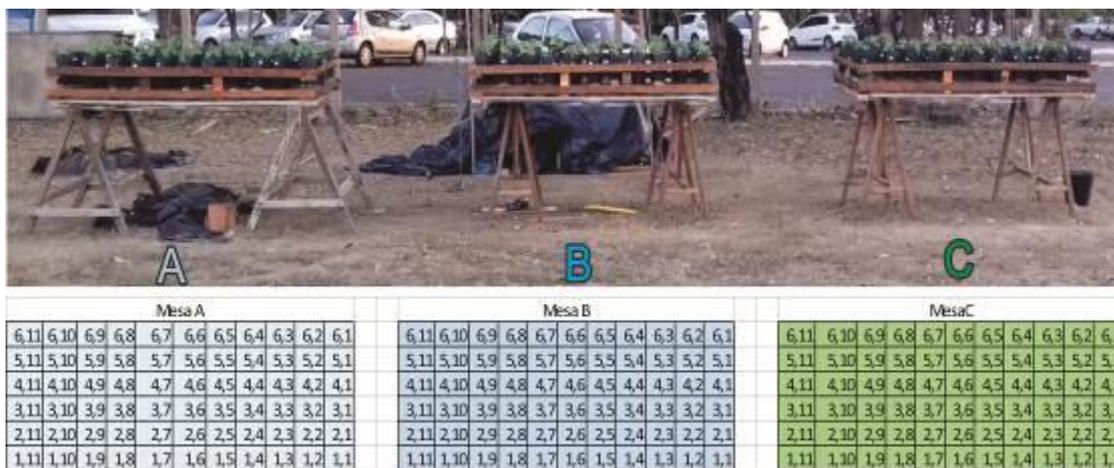


Figura 22. Esquema com as três mesas utilizadas no experimento.

O suporte dos vasos consistiu em armações de ferros presos nas partes superiores e inferiores para a garantia de total apoio. A numeração do vaso foi matricial, sendo o primeiro número representante das colunas, variando de 1 a 6, e o último o número as filas, variando de 1 a 11.



Figura 23. Mesa A, uma das 3 mesas utilizadas no experimento.

Os vasos adaptados (Figura 24) foram utilizados como lisímetros de pesagem, uma vez que esses instrumentos podem ser constituídos de vários materiais e a técnica utilizada neste experimento consistiu em monitorar a variação da massa da amostra de solo contida em casa vaso. Essa variação deveu-se à entrada e à saída de água do sistema (SEIXAS, 2009; CAMPECHE et al., 2011). A massa da estrutura, medida em balança comercial com precisão de $\pm 1\text{g}$ (Figura 25), registrou o valor médio de 74g e desvio padrão de 4g.



Figura 24. Vasos utilizados no experimento.

A base desses consistiu-se em garrafas pet, de 2 ou 2,5 litros. Os buracos do vaso e o local da conexão com a garrafa pet foram vedados para que não houvesse saída de água, no furo da garrafa foi colocado cano com rolha de vedação. Esse furo na garrafa permitiu a contabilização da água excedente presente na base.

O solo utilizado foi obtido em viveiros. Após homogeneização do solo, os 198 vasos foram preenchidos. Foram registrados os valores de 1300g para a média e 3g para o desvio padrão da massa de solo dos lisímetros. Durante o preenchimento, 11 amostras de solos foram retiradas, intercaladas ao preenchimento dos lisímetros

(aproximadamente 19 lisímetros a cada amostra recolhida). Após pesadas, foram levadas à estufa a 105°C (desvio padrão de 5°C) para determinação da massa seca. Obteve-se para o conteúdo de água no solo, um valor médio de 28,1% com desvio padrão de 2%. Apesar de se observar pouca variabilidade na umidade dos vasos, o valor da umidade inicial de cada grupo foi utilizado no cálculo da massa seca de cada amostra. Foram também retiradas amostras de 1000 g para análise granulométrica. Os valores obtidos pelo método do densímetro foram: 8,4 % de argila, % 62,3% de areia, 29,3% de silte. Finalmente, outros dois lisímetros foram preenchidos com água até que escorresse para o compartimento de coleta de água abaixo dos vasos. No dia seguinte, após ter cessado o gotejamento, foram retiradas amostras para a determinação da capacidade de campo deste solo.



Figura 25. Amostra de terra sendo pesada após secagem.

O saco pardo era utilizado para facilitar a retirada da amostra no momento do preenchimento do solo nos vasos. A massa do saco (4,6 g) foi descontada da massa total registrada pela balança.

Plantio

No dia 23 de junho de 2017, foram colocadas três sementes de feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.) em cada vaso. Os vasos foram regados de modo à quantidade de água no solo se aproximar à capacidade de campo. A dinâmica da rega consistiu em 6 dias da semana com o valor de 50 mililitros e 1 dia com o valor em torno da capacidade de campo. Esperou-se 15 dias, a partir do dia da semeadura para que o máximo de sementes germinassem. No dia 8 de julho foi realizado um novo plantio nos vasos em que não ocorreu germinação de nenhuma semente.

Após 3 semanas de cultivo, contadas a partir da segunda semeadura, mais de 50% das plantas apresentavam a fase de desenvolvimento vegetativo V4, ou seja, com

a presença terceira folha trifoliada. Portanto, os dados obtidos neste experimento correspondem ao estágio V4 do plantio.

Algumas plantas apresentaram, especialmente nas partes áreas, manchas brancas que correspondem aos fungos (*Erysiphe polygoni* DC) que causam a doença chamada de oídio que, dentre outros danos à planta, pode afetar negativamente o seu desenvolvimento e a sua produção. Para o tratamento desse patógeno fez-se pulverização, em toda planta, de uma mistura composta por 5% de leite e 95% de água (BETTIOL, 2004). Após a pulverização, observou-se melhora das plantas (Figura 26).



Figura 26. Folhas das plantas de feijão com oídio.

Lado esquerdo: folhas antes da pulverização de leite com água, com presença de oídio. Lado direito: folhas após a pulverização de leite com água, percebeu-se melhora por causa da diminuição de manchas brancas.

Tratamentos

A partir do dia 02 de agosto 2017, rearranjou-se a quantidade de água de rega para que existissem 15 tratamentos, isto é, 15 diferentes quantidades de água no solo. Cada tratamento consistia em 12 lisímetros com a mesma quantidade de água disponíveis no solo.

Em cada vaso, com uma planta, colocou-se plástico, produzidos de polietileno (Figura 27), para evitar a evaporação do solo (RAMAKRISHNA et al., 2006). Desse modo, as diferenças entre uma rega e outra era praticamente o valor da transpiração das plantas.

Em 18 vasos, deixou-se solo nu (retirou-se a planta de modo que o dado obtido fosse apenas da evaporação da terra), mantendo-se as mesmas condições dos vasos

com cultura, para suporte na análise da transpiração, deixando, assim, um número total de 180 vasos com plantas.



Figura 27. Vaso com plástico para evitar ou reduzir a evaporação do solo.

Ocorreu secagem das folhas de algumas amostras – provavelmente, devido à baixa umidade relativa do ar atmosférico e à alta intensidade da radiação solar em Cuiabá –, as quais foram descartadas. Utilizou-se, portanto, apenas 137 lisímetros de um total de 180 para o ensaio destrutivo. Em 10 de agosto, mensurou-se as massas dos vasos às 6, 9, 12, 15 e 16 horas para obter as transpirações das plantas e os fluxos de água. O final das medidas foi antes do anoitecer, pois objetivou-se obter o valor máximo da transpiração até antes dos fechamentos dos estômatos que se dão, normalmente, no período noturno (PILLAR, 1995).

A curva de transpiração versus quantidade de água no solo ($T \times \theta_{\text{solo}}$) foi obtida por meio de cálculos dos parâmetros. Para a transpiração, calculou-se a diferença entre as massas dos lisímetros nos últimos dois horários de pesagem (15 e 16 horas). Para a quantidade de água no solo, em % (gramas de água em 100 gramas de solo), fez-se a média da diferença entre a massa do lisímetro no momento da pesagem (15 e 16 horas) e a massa do lisímetro com massa seca de terra.

Ensaio Destrutivo

Às 18 horas, iniciou-se o ensaio destrutivo das plantas. Foram separadas as folhas, caules e raízes das plantas de cada tratamento. A seguir, foram colocadas em

sacos de papel craft (3,2g), pesados em balança comercial (precisão de 0,1g), e levados à estufa a 60°C (desvio de 5°C) até obtenção de massas constantes.

Os dados de transpiração do feijão (fluxo hídrico no caule) entre o primeiro e o último horário de pesagem, quantidade de água no caule e comprimento do caule (L) foram utilizados, respectivamente, para as estimativas da resistência de descarregamento dos elementos de vasos, capacitância e estimativa teórica do fluxo por meio da equação de Poiseuille.

3.2 Cálculo de Parâmetros do Xilema

Na segunda etapa, cumprindo os objetivos específicos “b” (estimativa de fluxo de elementos de vaso com placas de perfuração diferentes com dados da literatura) e “c” (estudo da tendência da cavitação e do volume de água em elementos de vaso), foram realizadas estimativas teóricas para a capacitância e a resistência dos elementos de vaso. Para tanto, utilizou-se valores constantes de resistências de diferentes placas de perfuração (ELLERBY e ENNOS, 1998). Os valores utilizados de potenciais hídricos do módulo geral caule e da folha foram os constantes em Nobel (2009). Nesse caso, as equações utilizadas seguem na seção 3.2.1.

Para cumprir o objetivo específico “d” (estimativa teórica de fluxo hídrico no caule de feijão comum por meio da equação de Poiseuille) utilizou-se valores constantes de potenciais hídricos específicos no xilema da raiz e da folha (NOBEL, 2009) e dados de comprimento do caule e de diâmetro de elemento de vaso do feijão. Esses valores foram aplicados na equação de Poiseuille (Equação 14) para obtenção do fluxo teórico. Diante disso, as equações utilizadas seguem na seção 3.2.2

Após a construção do modelo no QUCS (objetivo “e”), estimativas teóricas foram realizadas da capacitância e da resistência dos elementos de vaso do feijão, no cumprimento do objetivo específico “f” (validação do *modelo in silico* com os dados experimentais de feijão comum). Utilizou-se os valores de fluxos hídricos e de quantidade de água presente no caule (obtidos no experimento) e os valores constantes de potenciais hídricos específicos no xilema da raiz e da folha (NOBEL, 2009). Assim sendo, as equações utilizadas seguem na seção 3.2.3.

3.2.1 Resistência e capacitância das células com diferentes placas de perfuração

A resistência total da célula, conforme os dados de Ellerby e Ennos (1998), foi obtida por meio da soma das resistências da tubulação desobstruída e da resistência máxima imposta pelas diferentes placas de perfuração (simples e escalariformes).

O valor de capacitância utilizado, Equação 18, foi obtido pela razão entre o volume da tubulação e a diferença de potencial hídrico de valor igual a 5,9 MPa ($\Delta\psi_{cf}$), entre o início do circuito (caule) e o fim (folha), conforme a proposta de Nobel (2009). Considerou-se a tubulação como cilindros perfeitos de comprimentos 0,363 e 0,137 m com diâmetros correspondentes aos diâmetros das aberturas das placas de perfuração, conforme os dados do experimento de Ellerby e Ennos (1998).

$$C = \frac{W_c}{\Delta\psi_{cf}} \quad (\text{Equação 18})$$

O volume de armazenamento de água em cada célula (W_c) foi calculado por meio do produto entre a capacitância da célula a diferença de potencial entre os terminais desse capacitor.

3.2.2 Fluxo hídrico teórico no caule de feijão

Considerando que a água no caule, especificamente no xilema, segue de forma laminar (ELLERBY e ENNOS, 1998) e pela correta dimensão das unidades, rearranjou-se a equação de Poiseuille (Equação 14) para calcular o fluxo hídrico de um vaso xilemático aplicando os valores obtidos em cada tratamento (Equação 19).

$$f = \frac{(\psi_{xr} - \psi_{xf})\pi r^4}{8\eta L} \quad (\text{Equação 19})$$

Com base em Nobel (2009), foi utilizado o valor de 0,5 Mpa para a diferença de potencial entre o início e o final do circuito hídrico do caule, isto é, xilema da raiz (ψ_{xr}) (-1,2 MPa) e xilema da folha (ψ_{xf}) (-1,7 MPa), respectivamente. Não foi considerada a contribuição do potencial gravitacional no potencial hídrico total, pois o potencial gravitacional cresce a razão de 0,0098 MPa.m⁻¹, ou seja, se torna

desprezível quando se estuda plantas de pequeno porte ou o transporte de água em nível celular (COELHO FILHO, 2011).

Como vários elementos de vaso empilhados formam um condutor maior chamado vaso, que pode variar de centímetros a metros, dependendo da espécie (TAIZ e ZEIGER, 2013), utilizou-se L , equação 21, como sendo o comprimento médio do caule para cada tratamento. η corresponde à viscosidade da água a 33°C.

Para o cálculo do raio (r) interno do caule, Equação 19, utilizou-se imagens de uma seção transversal do caule de uma planta de feijão por meio de um microscópio digital (resolução 640X480) e estimou-se, por meio de software de análise de imagem (ImageJ), a área da seção reta interna do elemento de vaso presente na lâmina (Figura 28). Mediu-se o diâmetro interno do elemento de vaso cuja área da secção transversal se aproximava à uma circunferência perfeita.

Por fim, para obtenção do fluxo total do caule multiplicou-se o valor do fluxo de um vaso xilemático pelo número total de elementos de vaso considerado.



Figura 28. Caules e seção transversal de caule de feijão. Lado esquerdo: caules de plantas de feijão do experimento (após secagem). Lado direito: seção transversal do caule para visualização, em microscópio digital, do diâmetro dos elementos de vaso.

3.2.3 Resistência e capacitância das células do feijão

A capacitância média do elemento de vaso do feijão, por tratamento, foi obtida pela razão entre a quantidade de água presente no caule por planta (diferença entre a massa úmida e a massa seca) (W_p) e a diferença de potencial hídrico do xilema da raiz à folha ($\Delta\psi_{xrf}$) em MPa (NOBEL, 2009).

Para o cálculo da resistência de descarregamento do feijão, que é a resistência em função do capacitor, fez-se uso Equação 20, a partir do rearranjo da equação 13 (GAIO, 2011). Nessa equação relaciona-se o valor do fluxo hídrico no caule (f), em

$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, e da diferença de potencial entre xilema da raiz e folha em MPa ($\Delta\psi_{xrf}$), conforme Nobel (2009). O fluxo hídrico no caule foi obtido pela diferença de massas dos lisímetros entre o primeiro e último horário de pesagem dividida pelo intervalo de tempo correspondente. A quantidade de água presente no caule por planta (W_p) foi obtida por meio da diferença de massas úmida e seca do caule (após a secagem).

$$R_{des} = \frac{W_p}{fC} + \frac{\Delta\psi_{xrf}}{f} \quad (\text{Equação 20})$$

3.3 Modelagem no QUCS

Para modelar o fluxo hídrico no xilema do caule de angiospermas, considerou-se o caule como sendo um cilindro com 3 camadas concêntricas⁶: externa, intermediária e interna (Figura 29). Cada camada é formada por um conjunto de 25 elementos de vaso. Utilizou-se como base o circuito do caule modelado por Gaio (2011) como sendo o circuito dos elementos de vaso que, em conjunto, formam o tecido xilemático das angiospermas.

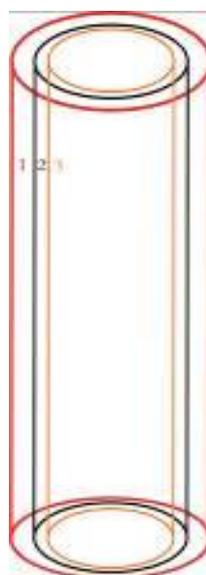


Figura 29. Representação das camadas do cilíndrico concêntrico.

A camada 1 faz referência ao conjunto exterior de 25 células. A camada 2 refere-se ao conjunto intermediário de 25 células e, por fim, a camada 3 representa o conjunto de 25 células no interior do caule.

⁶ De modo que ficasse mais clara a metodologia empregada e que facilitasse o entendimento dos resultados, bem como no estudo da cavitação no circuito hídrico, o número de 3 camadas, com o conjunto de 75 células, mostrou-se ser factível.

3.3.1 Camada externa

O circuito das células da camada externa apresenta 5 portas de entrada ou saída de água (Figura 30).

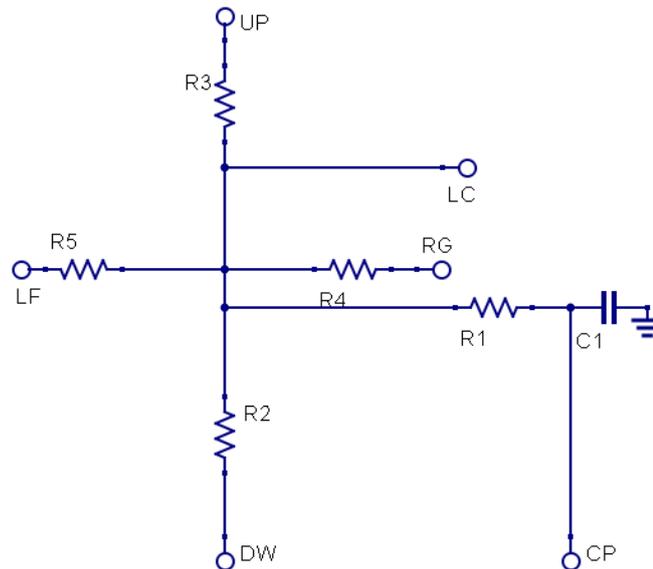
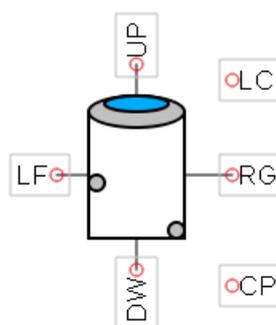


Figura 30. Circuito hídrico para a célula elemento de vaso da camada externa.

O resistor R1 representa a resistência ao descarregamento do capacitor, as resistências R2 e R3 compõem a resistência ao fluxo para entrada na célula e saída para célula superior. Os resistores R4 e R5 representam as resistências ao fluxo para células vizinhas. A capacitância é a medida da quantidade de água armazenada na célula por unidade de potencial hídrico. O símbolo representativo para o circuito acima está ilustrado na Figura 31.



Elemento_Vaso_Externo

Figura 31. Símbolo representativo para a célula elemento de vaso da camada exterior do caule.

As portas permitem a conexão de uma célula com outra célula na vertical, na horizontal e intercadas. As siglas das portas de conexão e suas descrições estão na Tabela 5 e são as mesmas para todas as células de todas as camadas.

Tabela 5. Siglas dos componentes hídricos nos circuitos.

Sigla	Descrição	Conexão
UP	Acima	Célula acima
DW	Abaixo	Célula abaixo
LF	Esquerda	Célula lateral esquerda
RG	Direita	Célula lateral direita
LC	Conexão intercadas	Célula de outra camada
CP	Sonda do capacitor	

Modelou-se o circuito da camada externa em um conjunto matricial de 5x5 elementos de vaso de modo que todas as saídas para células vizinhas são conectadas a outra célula, ainda da mesma camada, sendo, assim, uma condição de contorno periódica (Figura 32). O símbolo representativo da camada externa está representado na Figura 33.

Na figura 32, as portas para conexão das fontes estão descritas como “SEL”, do inglês “*Source of the External Layer*”, o que significa fonte da camada externa. De mesma forma, as portas de conexão das fontes da camada intermediária e interna foram descritas respectivamente como “SML”, do inglês “*Source of the Middle Layer*”, e “SIL”, do inglês “*Source of the Internal Layer*”.

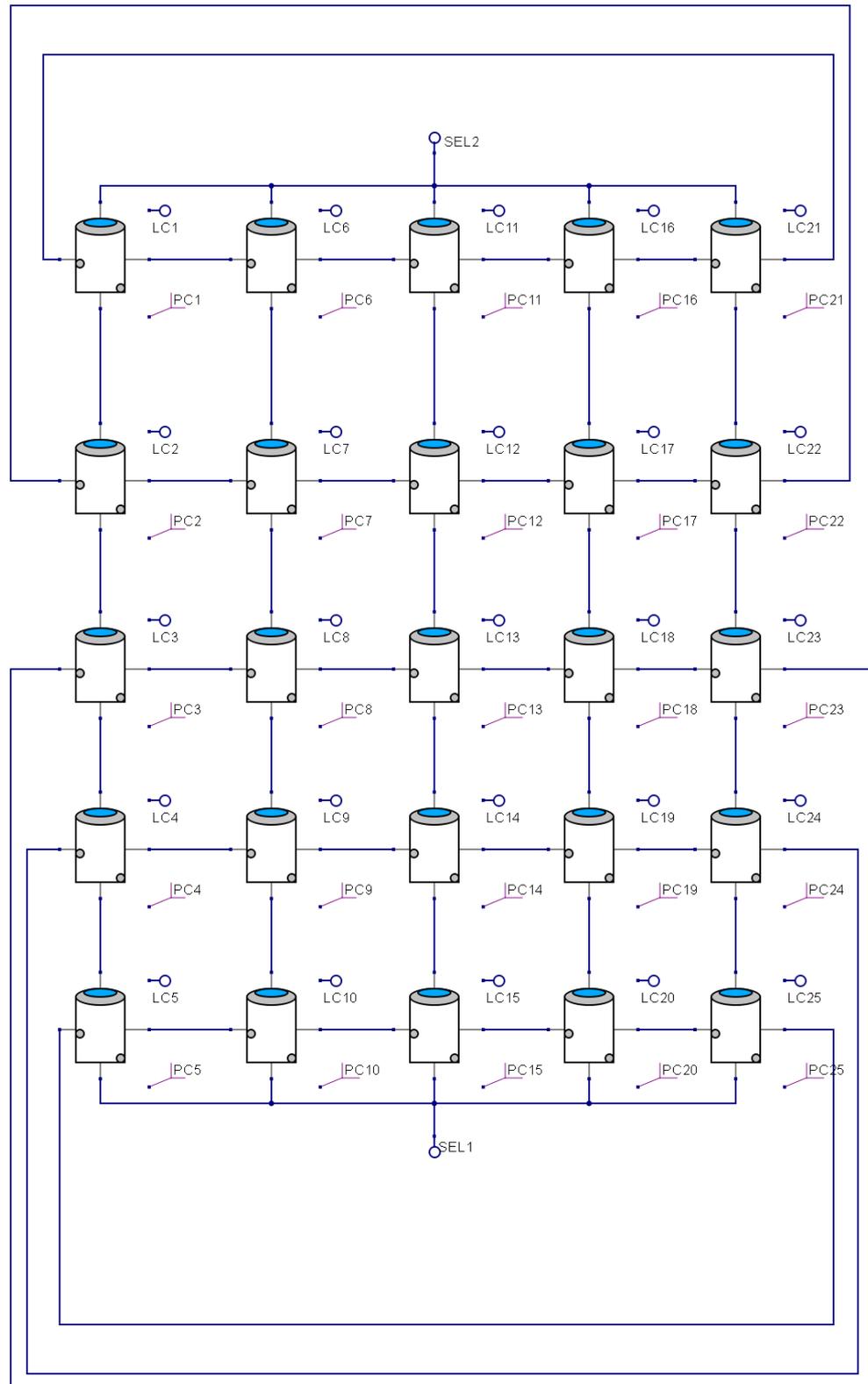


Figura 32. Conjunto de 5x5 dos circuitos representativos para os elementos de vaso representativos da camada externa.



Figura 33. Símbolo representativo para o conjunto de elementos de vaso da camada externa.

3.3.2 Camada intermediária

O circuito das células da camada intermediária apresenta 6 portas de entrada ou saída de água (Figura 34). A existência de uma porta de conexão a mais que as outras camadas, deve-se ao fato dessa camada se conectar com as outras duas.

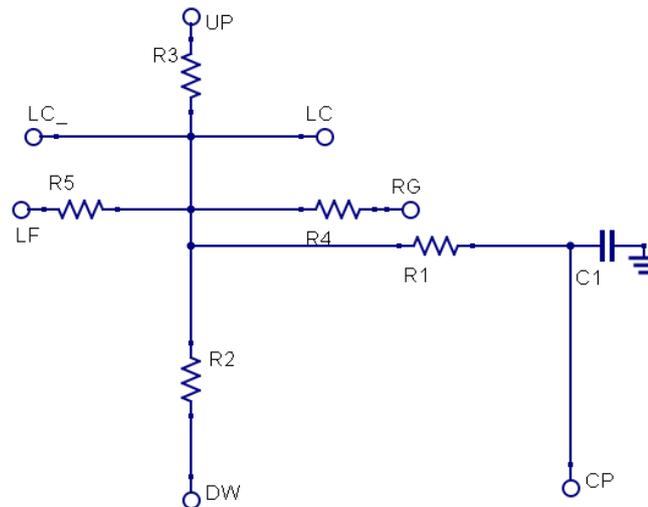
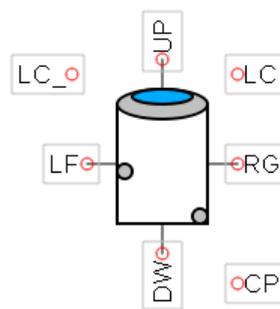


Figura 34. Circuito representativo para a célula elemento de vaso da camada intermediária.

O símbolo representativo para o circuito acima está ilustrado na Figura 35.



Elemento_Vaso_Intermediario

Figura 35. Símbolo representativo para a célula elemento de vaso da camada intermediária do caule.

A sigla LC_ representa a conexão oriundas das células da camada externa. Modelou-se o circuito da camada intermediária em um conjunto matricial de 5x5 elementos de vaso (Figura 36), de mesma forma que a camada externa, e o símbolo representativo está na Figura 37.

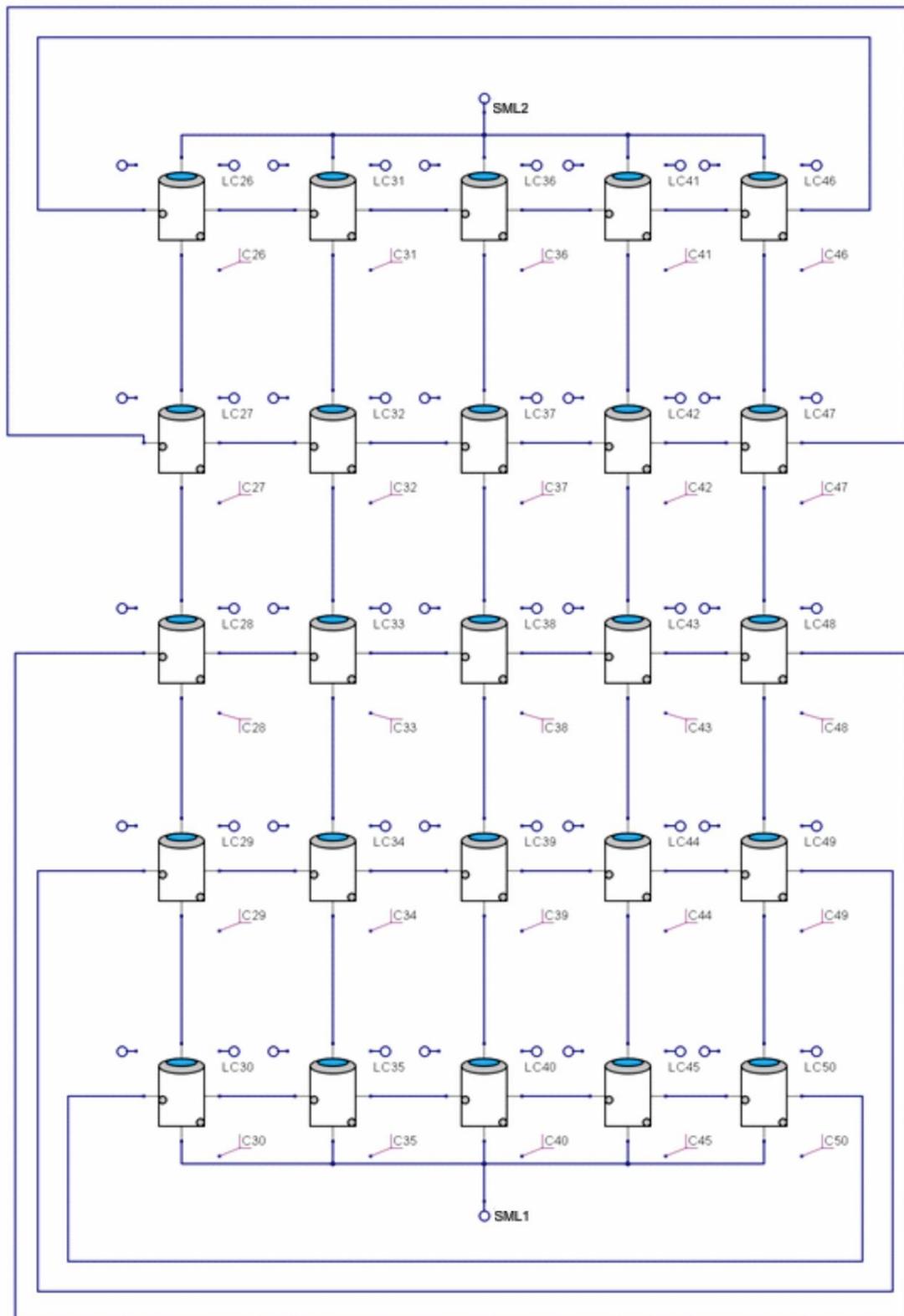


Figura 36. Conjunto de 5x5 dos circuitos representativos para os elementos de vaso representativos da camada intermediária.

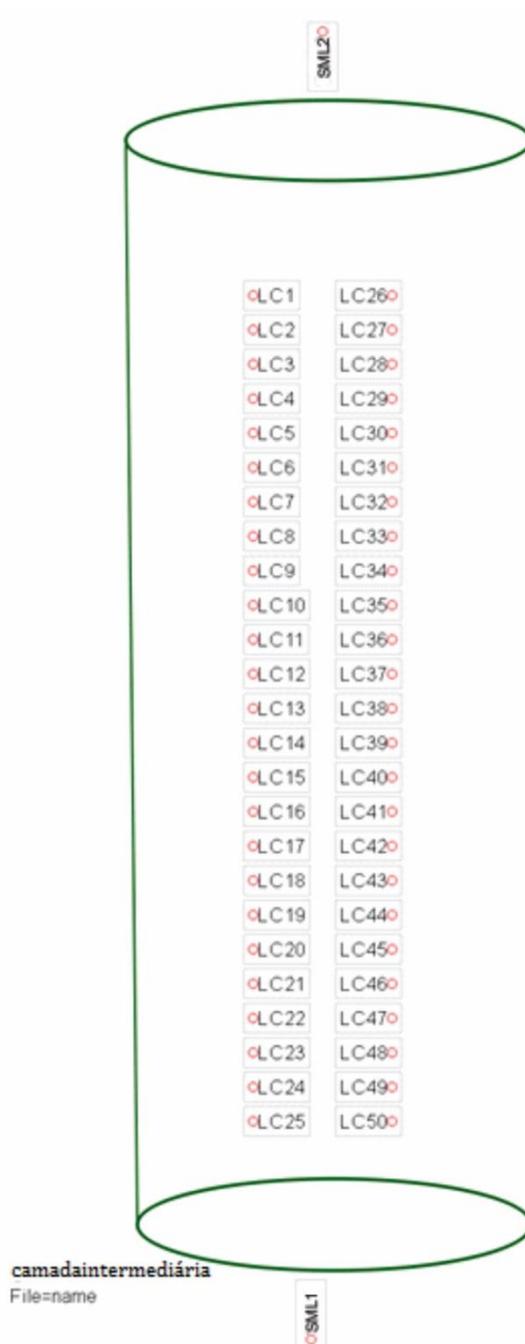


Figura 37. Símbolo representativo para o conjunto de elementos de vaso da camada intermediária.

3.3.3 Camada interna

O circuito das células da camada interna apresenta 5 portas de entrada ou saída de água (Figura 38) e o símbolo está na Figura 39. Possui conexão apenas com a camada intermediária.

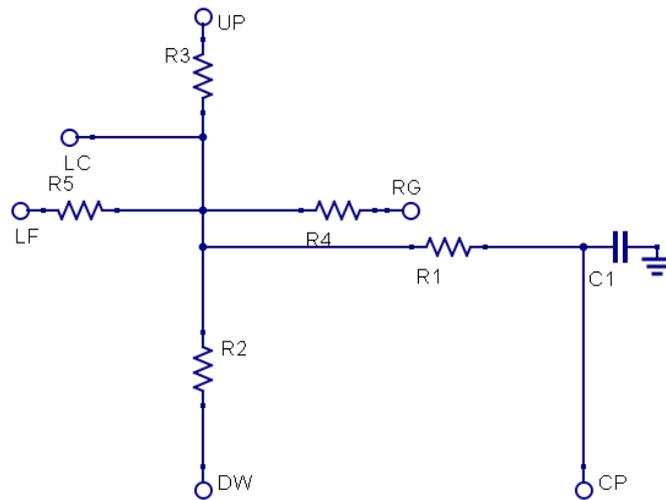


Figura 38. Circuito representativo para a célula elemento de vaso da camada interna.

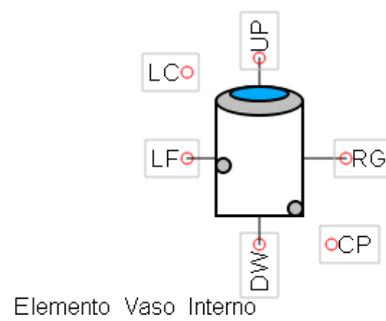


Figura 39. Símbolo representativo para a célula elemento de vaso da camada interna do caule.

O conjunto matricial de 5x5 de elementos de vaso da camada interna e seu símbolo estão nas Figuras 40 e 41.

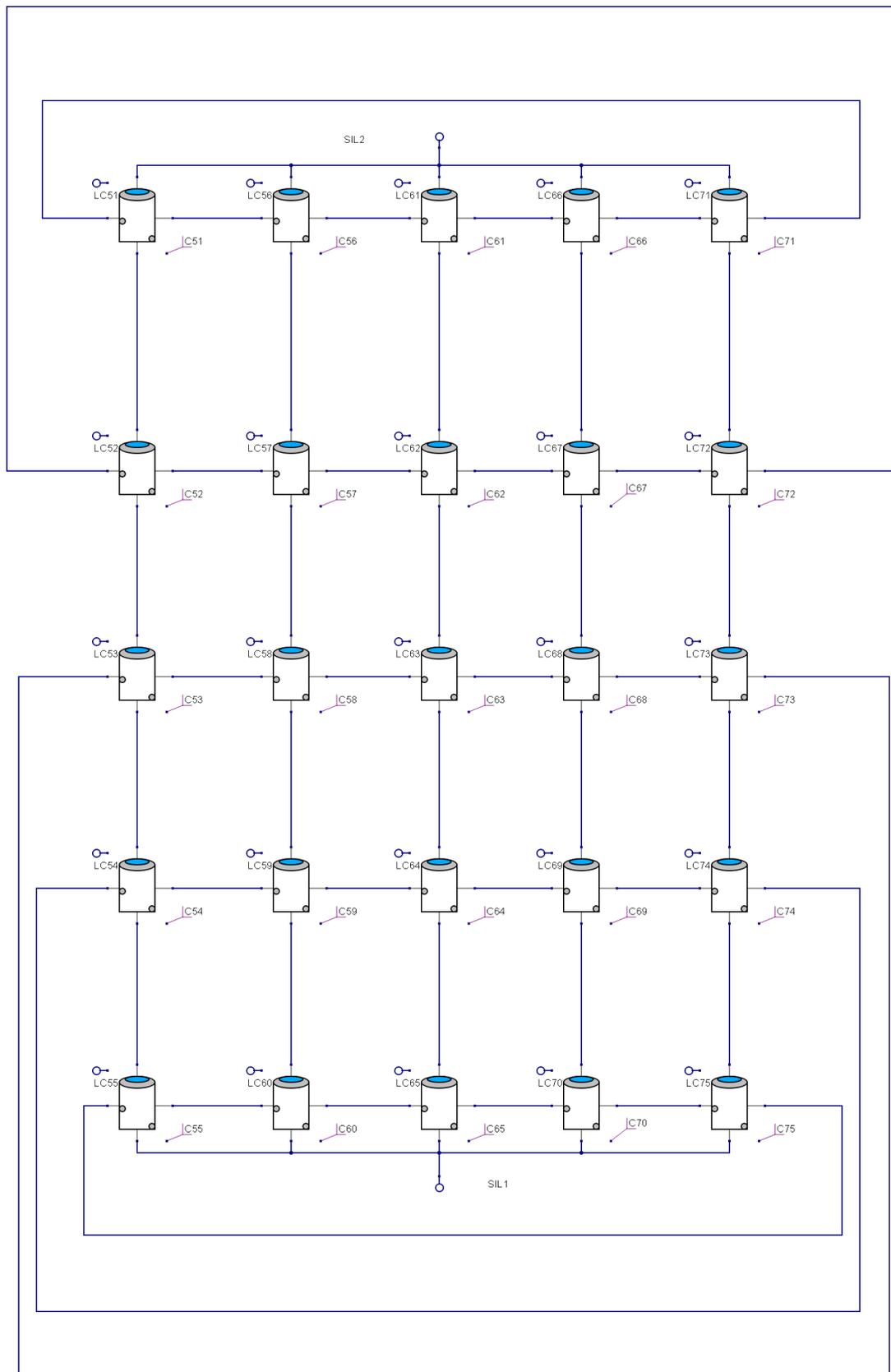


Figura 40. Conjunto de 5x5 dos circuitos representativos para os elementos de vaso representativos da camada interna.



Figura 41. Símbolo representativo para o conjunto de elementos de vaso da camada interna.

3.3.4 Valores utilizados nos componentes hídricos dos circuitos

Para o circuito dos elementos de vaso com placas de perfuração diferentes foi considerado um valor de 20% do valor total da resistência de saída (resistor R3)

para a resistência de descarregamento- resistor R1 (Figura 42). Gaio (2011) e Siqueira (2014) utilizaram essa relação proposta por Nobel (2009) que considera que 20% da resistência está na região do armazenamento.

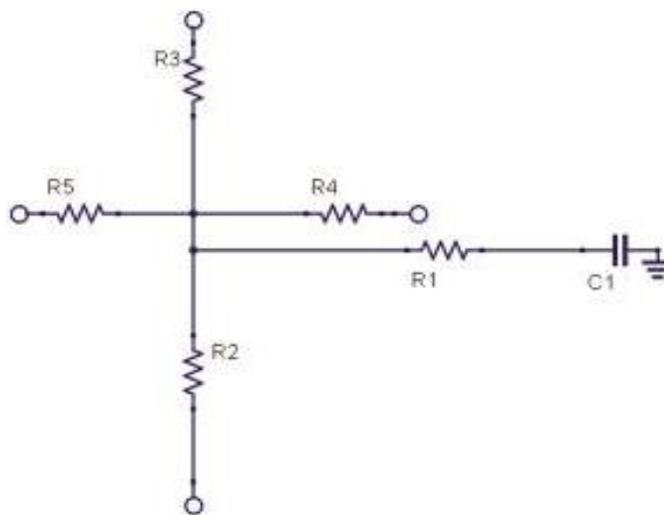


Figura 42. Circuito geral dos elementos de vaso.

Os valores dos demais resistores, incluindo o resistor intercamadas, foram considerados como o valor da resistência da tubulação desobstruída, conforme Ellerby e Ennos (1998). Obteve-se a resistência do resistor de saída (com placa de perfuração) pela soma da resistência da tubulação desobstruída e da resistência máxima imposta pelas diferentes placas de perfuração (Tabela 6).

Tabela 6. Valores de fluxo máximo, mínimo, médio e desvio padrão com elementos de vaso com diferentes placas.

Componente	Sigla	Simples (1090 μm)	Simples (410 μm)	Escalariforme (1090 μm)	Escalariforme (410 μm)
Resistência de descarregamento	R1 (Pa.s.m^{-3})	$6,26 \times 10^8$	$2,40 \times 10^8$	$7,38 \times 10^8$	$3,52 \times 10^8$
Resistência de entrada	R2	$3,11 \times 10^9$	$1,18 \times 10^9$	$3,11 \times 10^9$	$1,18 \times 10^9$
Resistência de saída (placa)	R3	$3,13 \times 10^9$	$1,20 \times 10^9$	$3,69 \times 10^9$	$1,76 \times 10^9$
Resistência lateral direita	R4	$3,11 \times 10^9$	$1,18 \times 10^9$	$3,11 \times 10^9$	$1,18 \times 10^9$
Resistência lateral esquerda	R5	$3,11 \times 10^9$	$1,18 \times 10^9$	$3,11 \times 10^9$	$1,18 \times 10^9$
Capacitância	C1 (F)	3,9	1,17	0,005	0,002

Neste caso, foram realizadas simulações transientes de 86400 segundos (período de 1 dia civil) para obtenção de fluxos máximos e mínimos durante esse período, utilizando valores das combinações de resistências entre placas e tubos, representando, então, conforme Forst (1930), os elementos de vaso com placa de perfuração simples com 8 mm de abertura (1090 μm e 410 μm) e elementos de vaso com placa de perfuração escalariforme com 0,32 mm de abertura (1090 μm e 410 μm).

Para avaliar a tendência da cavitação, eliminou-se caminhos hídricos dos circuitos entre vasos nas camadas e entre as camadas. Analisou-se a tendência da queda do fluxo para circuitos com índices de ligados de 70% a 40%.

Para os valores dos componentes hídricos dos circuitos dos elementos de vaso do feijão considerou-se também o valor de 20% para a resistência de descarregamento. A partir disso, estimou-se o valor da resistência total (100%) e 40% para os demais resistores do circuito (Figura 43), incluindo o resistor intercamadas. Obteve-se o tempo de descarregamento do capacitor por meio produto da resistência de descarregamento e capacitância.

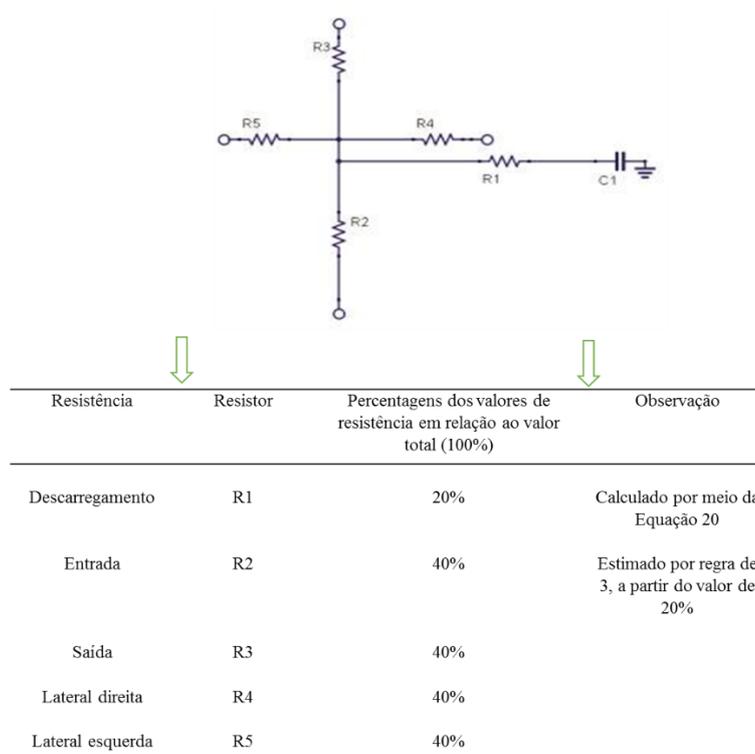


Figura 43. Valores em percentagens de cada componente do circuito básico dos elementos de vaso do feijão.

Nessa situação, realizou-se simulações transientes⁷ no *QUCS* de até 86400 segundos para obtenção de uma melhor análise do comportamento do fluxo, já que os valores de transpiração obtidos corresponderam, praticamente, a um dia inteiro de atividade das plantas sob luz solar.

Afim de avaliar o desempenho do modelo *in silico*, calculou-se a correlação de Spearman e o coeficiente de determinação em relação aos fluxos experimentais.

⁷ Nessa simulação, se uma diferença de potencial constante for aplicada entre os terminais dos circuitos, o capacitor irá variar a quantidade de carga e a corrente irá variar no tempo até a descarga do capacitor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados experimentais

Transpiração

A quantidade de água no solo (θ_{solo}) variou aproximadamente entre 20% (mínimos) e 46% (máximos). Essa faixa de valores é maior que a faixa utilizada por Denmead e Shaw (1962) de, aproximadamente, 25% a 40% para θ_{solo} , para dia seco e claro. Os valores médios de θ_{solo} para cada tratamento estão na Tabela 7.

Tabela 7. Quantidade média de água no solo para cada tratamento.

Quantidade média de água no solo	
Tratamento	θ_{solo}
1	24,5%
2	25,7%
3	27,3%
4	28,7%
5	30,5%
6	30,6%
7	32,6%
8	35,0%
9	36,1%
10	38,0%
11	38,5%
12	40,8%
13	41,0%
14	41,9%
15	44,0%

A curva obtida para a taxa de transpiração (mm.s^{-1}) em função quantidade de água solo (θ_{solo}), apresentou 2 diferentes regimes, conforme mostra a Figura 44 (lado esquerdo). 1° regime (até 35%) e 2° regime (acima de 35%).

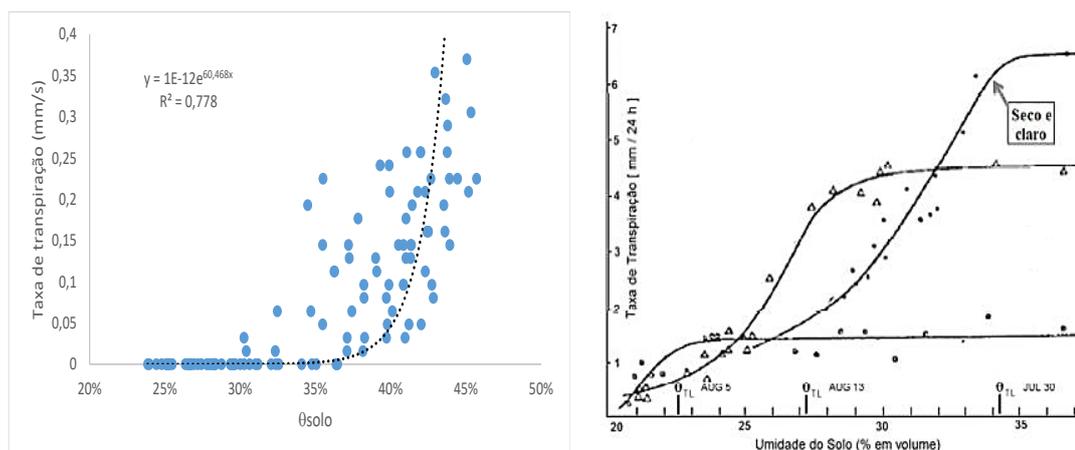


Figura 44. Curva da transpiração em função da quantidade de água solo (lado esquerdo) e as curvas obtidas por Denmead e Shaw (1962) (lado direito).

O 1º regime representa a baixa transpiração dos feijões, próximas de zero, em tratamento com baixas quantidades de água no solo, o que implica em fechamento total dos estômatos e, conseqüentemente, a transpiração medida deve ser principalmente a transpiração cuticular (ocorrente na região epidérmica das folhas). O fechamento estomático é uma das rápidas respostas de plantas em déficit hídrico, esse fechamento é uma tentativa de manter o conteúdo hídrico favorável nos tecidos por maior tempo possível (FIOREZE et al., 2013).

O melhor ajuste encontrado, no entanto, foi o de uma única curva exponencial ($R^2= 77,8\%$). Isso pode ser explicado pelo fato da transpiração crescer fortemente com o aumento da disponibilidade hídrica (2º regime). Com a turgescência nas células das folhas, os estômatos mantem-se abertos (GAIO, 2011), e as folhas ficam sujeitas ao forte poder evaporativo da atmosfera.

A curva obtida por Denmead e Shaw (1962), lado direito (Figura 44), para dia seco e claro, também apresenta o crescimento da transpiração com o aumento da disponibilidade hídrica até alcançar um patamar⁸ na faixa de maiores valores de quantidade de água no solo (acima de 35%).

Neste trabalho, a transpiração não apresenta um patamar. Uma possível razão é de que o valor da umidade relativa do ar no dia da coleta de dados estava muito baixo (abaixo de 20%). Isto é, mesmo havendo grandes valores de quantidade de água disponível no solo (acima de 35%), não foi possível satisfazer a demanda evaporativa

⁸ No trabalho de Denmead e Shaw (1962), para o dia seco e claro, a perda de turgescência dos estômatos acarretou na perda desse patamar.

da atmosfera. Faz-se necessário também considerar-se um intervalo de tempo para que a quantidade de água perdida para a atmosfera na superfície da folha ascenda do solo.

Devido a isso, tem-se a necessidade de se realizar outros experimentos, com plantas da mesma ou de outra espécie, para se conhecer a curva transpiração x quantidade de água no solo.

Propriedades do caule

A quantidade de água na planta (W_p), obtida pela diferença entre massa úmida e massa seca, está na Tabela 8. Os valores de W_t (volume por tratamento) variaram entre mínimos, de 0,8 (tratamento 12), e máximos, de 13,6 (tratamento 14). Esses números indicam uma umidade de aproximadamente 80%, com exceção do tratamento 12, e são próximos dos valores encontrados na literatura para umidade de caule de diversas espécies (LIMA, 2016).

Tabela 8. Volume total por tratamento- W_t (cm³) e Volume total por planta - W_p (cm³).

Tratamentos	Nº	W_t (Volume por tratamento-cm ³)	W_p (Volume por planta-cm ³)
1	8	7,3	0,9
2	9	8,0	0,9
3	7	7,3	1,0
4	8	10,0	1,3
5	9	8,8	1,0
6	7	8,6	1,2
7	9	8,9	1,0
8	8	6,6	0,8
9	9	6,3	0,7
10	9	8,0	0,9
11	10	10,8	1,1
12	11	0,8	0,1
13	9	9,9	1,1
14	12	13,6	1,1
15	12	12,5	1,0

O dado do tratamento 12 foi detectado como outlier (a um nível de significância de 95%). No dia do ensaio destrutivo verificou-se que os caules desse tratamento estavam muito secos em comparação com os caules de plantas de outros tratamentos

e, por isso, houve pouca diferença entre a massa úmida e a massa seca (após a secagem em estufa). Entretanto, esse valor não afetou negativamente o desempenho do modelo.

O diâmetro obtido de um elemento de vaso foi de $23\mu\text{m}$ cuja área de seção transversal equivale a $4,1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$. Os tamanhos médios dos caules (cm) utilizados na estimativa teórica do fluxo hídrico no caule dos feijões estão na Tabela 9.

Tabela 9. Comprimento médio dos caules para cada tratamento.

Tratamento	Comprimento (cm)	Desvio Padrão (cm)
1	13,3	1,5
2	13,9	2,4
3	13,5	2,1
4	14,4	1,8
5	13,2	2,9
6	11,4	1,7
7	12,5	2,3
8	10,5	1,3
9	8,5	1,8
10	9,5	2,3
11	9,6	1,3
12	8,6	1,1
13	9,8	1,9
14	8,7	1,4
15	8,8	1,8

4.2 Fluxos hídricos dos elementos de vaso com diferentes placas de perfuração

O circuito obtido para os elementos de vaso com placa de perfuração simples (Tabela 10) obteve melhor condutividade do fluxo hídrico quando comparado com os circuitos dos elementos de vaso com placa escalariforme (Tabela 11).

Tabela 10. Valores de fluxos máximo, mínimo, médio e desvio padrão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) com elementos de vaso com placa simples com 8 mm, conforme a seção 3.3.4.

Placa 8 mm simples	Tamanho do tubo (m)	Fluxo máximo	Fluxo mínimo	Média do fluxo	Desvio padrão
1090 micrômetro	0,363	$2,47 \times 10^{-8}$	$2,47 \times 10^{-8}$	$2,47 \times 10^{-8}$	$1,06 \times 10^{-13}$
410 micrômetro	0,137	$6,44 \times 10^{-8}$	$6,44 \times 10^{-8}$	$6,44 \times 10^{-8}$	$2,00 \times 10^{-12}$

Em percentagem, os valores dos fluxos para os elementos de vaso com placas simples foram 18% e 46% maiores que os elementos de vaso com placas escalariformes. Esses resultados estão em conformidade com a literatura

(CARLQUIST, 1975; 1991; OSKOLSKI e JANSEN, 2009; CHRISTMAN e SPERRY, 2010). Esses autores defendem a ideia que os elementos de vaso com placas de perfuração simples são melhores condutoras de água que os elementos de vaso com placas escalariformes, pois, como consequência de uma evolução filogenética, oferecem menor resistência ao fluxo e, assim, apresentam melhor condutividade.

Tabela 11. Valores de fluxos máximo, mínimo, médio e desvio padrão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) com elementos de vaso com placa escalariforme, conforme a seção 3.3.4.

Escalariforme	Tamanho do tubo (m)	Fluxo máximo	Fluxo mínimo	Média do fluxo	Desvio padrão
1090 micrômetro	0,363	$2,10 \times 10^{-8}$	$2,09 \times 10^{-8}$	$2,10 \times 10^{-8}$	$7,07 \times 10^{-11}$
410 micrômetro	0,137	$4,40 \times 10^{-8}$	$4,33 \times 10^{-8}$	$4,37 \times 10^{-8}$	$4,95 \times 10^{-9}$

Na comparação do fluxo entre os tamanhos dos elementos de vaso, obteve-se um maior valor para o circuito com as células com comprimento de 410 micrômetros, que corresponderam entre 110% e 161% vezes maiores que os valores de fluxos para o circuito representativo dos elementos de vaso com 1090 micrômetros. Esse resultado pode ser analisado, considerando a célula como um condutor cilíndrico, pela própria Lei de Poiseuille, a qual descreve a dependência do fluxo volumétrico com o comprimento do condutor (MOREIRA, 2008), isto é, para condutores menores, tem-se maiores valores de fluxos quando submetidos a uma mesma diferença de pressão.

4.3 Tendência do fluxo hídrico (cavitação)

Esta seção faz referência ao resultado do estudo da tendência do fluxo hídrico quando há cavitação no circuito hídrico das células elementos de vaso com placas escalariformes e simples, conforme os dados de Ellerby e Ennos (1998).

A redução do fluxo hídrico no caule de angiospermas é função polinomial do índice de ligados – assim como nas angiospermas –, dado ser causada pela cavitação nos vasos. A figura 45 ilustra as linhas de tendências de grau 2 para os índices de ligado de 70% a 40%. Os valores de R^2 (coeficiente de determinação) para os valores de fluxos dos circuitos com células simples e escalariformes foram bem próximos.

A curva polinomial encontrada para as angiospermas e gimnospermas concorda com o resultado de Rice et al. (2004). Esses autores estudaram os padrões de morte de árvores, sendo uma das espécies a *Eucalyptus crebra*, em Queensland,

Austrália, e obtiveram curvas polinomiais de grau 2 para a vulnerabilidade hídrica dessas espécies perante à cavitação.

O decaimento do fluxo ocorre quando se torna menor a quantidade de fios conectados nos circuitos que levam, como consequências, a diferentes arranjos de associações em paralelo e em série que influenciam diretamente nos valores das resistências totais.

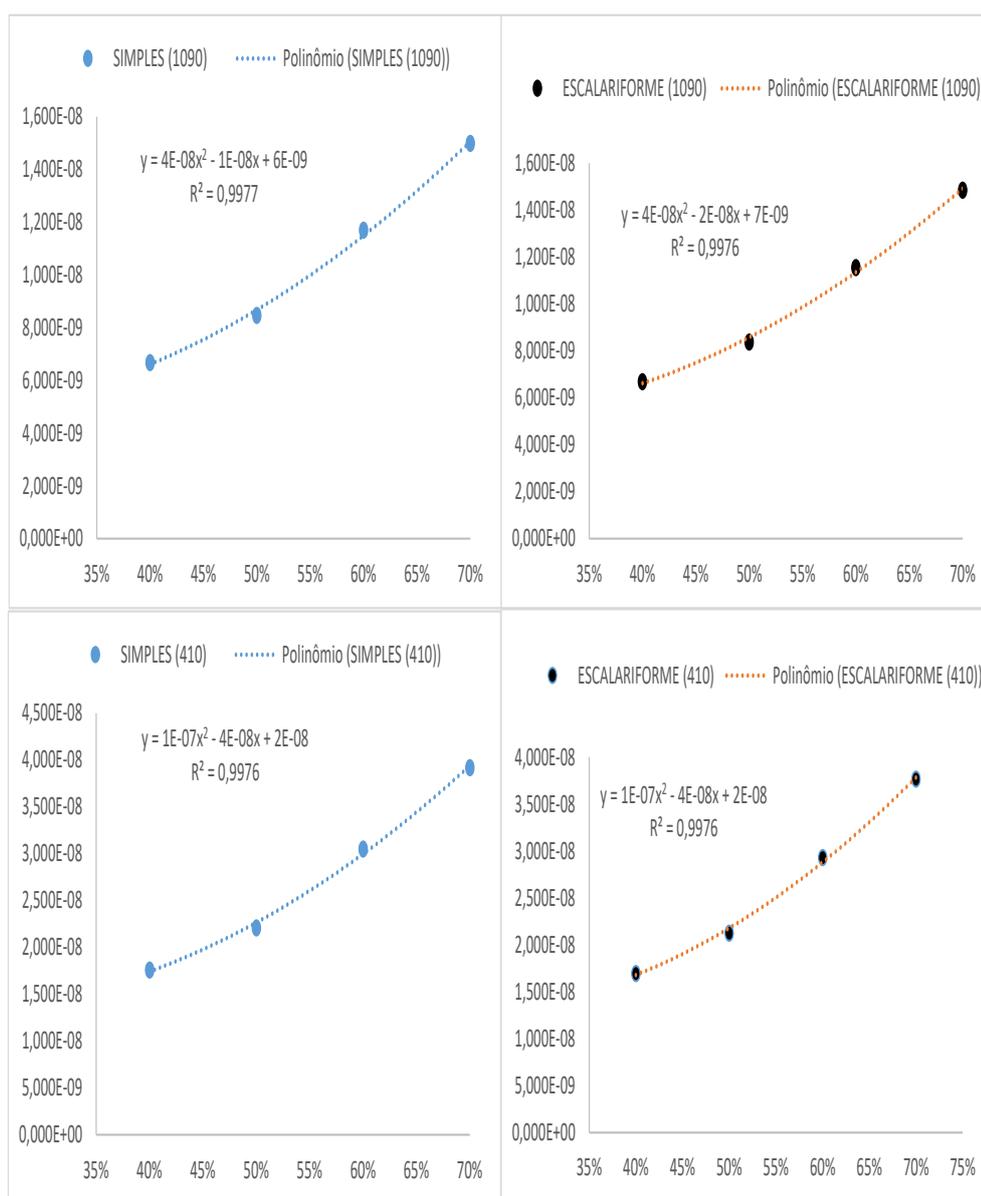


Figura 45. Tendências das quedas dos fluxos hídricos.

Tendências das quedas dos fluxos hídricos para os circuitos com elementos de vaso com placas simples e escalariformes com comprimentos de 1090 e 410 nanômetros. No lado esquerdo, nas partes superior e inferior, têm-se as linhas de tendências para as células com placas simples e no lado direito têm-se as linhas de tendências para as células com placas escalariformes.

4.4 Volume de água nas células

As células nas quais encontram-se os maiores valores de armazenamentos de água estão indicadas nas partes “A1” e “A2” da Figura 46 e no Apêndice A (gráfico de volume das células de uma camada em função da posição no circuito da camada).

O resultado obtido foi que as células elementos de vaso com placas simples (Figura 46) presentes em linhas com maiores potenciais também apresentaram maiores valores de armazenamento de água, como consequência direta da equação da capacitância hídrica-equação 18. Esse resultado é o mesmo para todos os circuitos de elementos de vaso com placas escalariformes e simples de todas as camadas interna, intermediária e externa (Apêndice A).

O resultado indica um maior armazenamento de água na parte do caule mais próxima às folhas, isso pode vir a ser um dos reflexos causado pela dinâmica do papel regulativo do caule, conforme Goldstein et al. (1998). O papel importante do caule nesse cenário está na regulação do estado da água das folhas de espécies expostas às grandes variações diurnas de demanda evaporativa, presentes em regiões de dossel superior de florestas tropicais (GOLDSTEIN et al., 1998).

Apesar de se ter estimativas da contribuição do armazenamento de água no xilema na transpiração diária de algumas espécies (GARTNER e MEINZER, 2005), a influência desse armazenamento sobre o fluxo hídrico do próprio tecido ainda é pouco conhecida, normalmente as pesquisas se concentram na mecânica do transporte do xilema (PRATT et al., 2007).

O crescimento do valor de armazenamento de água entre as células da primeira linha (região mais próxima da raiz, valor 1 no eixo abscissa) e a as células da última linha (região mais próxima das folhas, valor 5 no eixo abscissa) é mais que linear (curva polinomial de grau 2), conforme a parte “C” da Figura 46. Esse resultado também é o mesmo para todos os circuitos de elementos de vaso com placas escalariformes e simples de todas as camadas (Apêndice A).

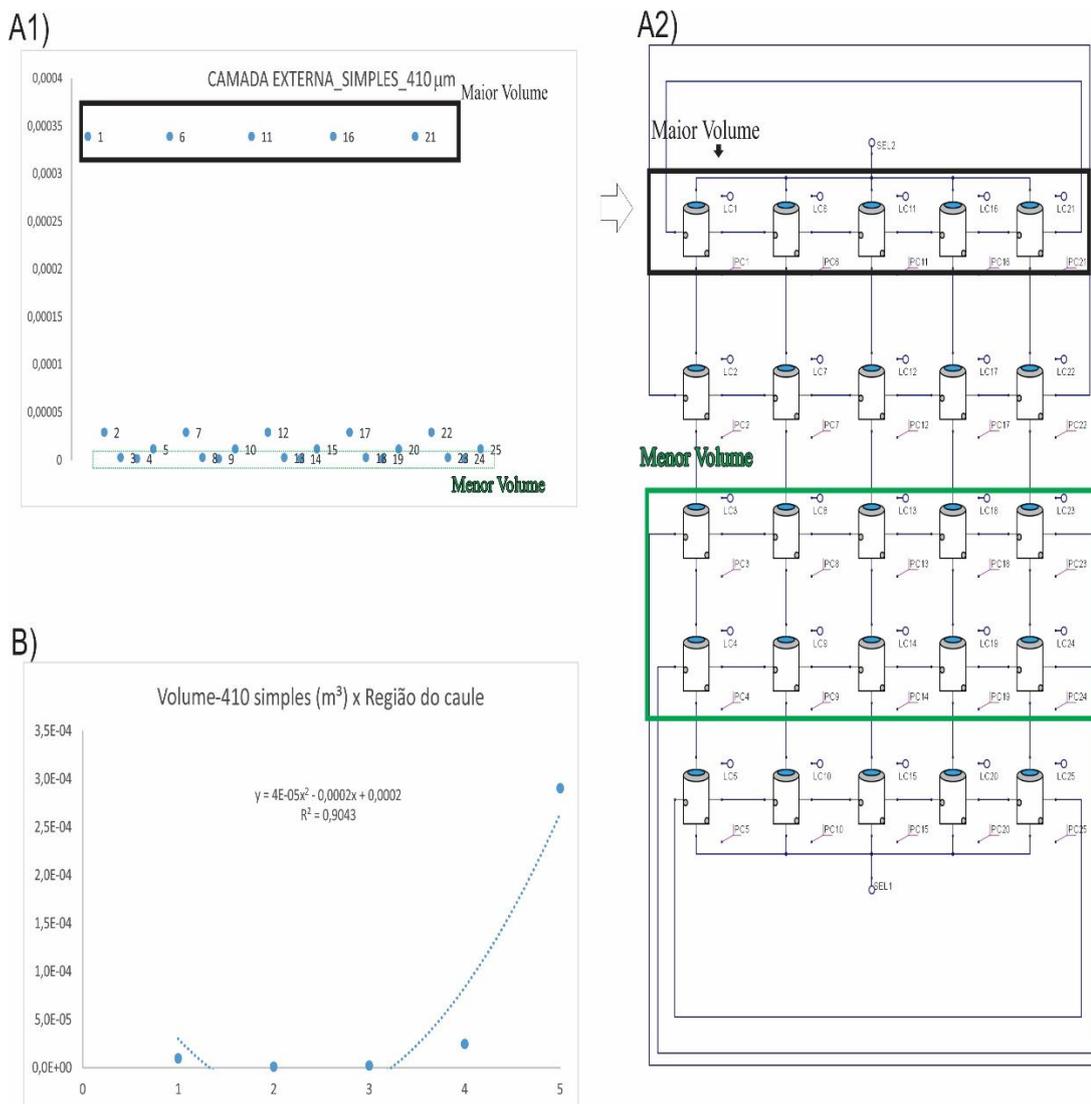


Figura 46. Volume de água nas células.

Na parte “A1”, tem-se o gráfico de dispersão de volume (ordenada) das células em função das suas posições (abscissa) do circuito da camada externa, nele destacam-se linhas de células com mesmos volumes e potencial. Na parte A2, tem-se o circuito representativo da camada externa com os destaques nas linhas das células com maiores, 5ª linha, contando de baixo para cima, e menores volumes, 2ª e 3ª linhas. Na parte “B”, o intervalo de 1 a 5 (abscissa) corresponde desde a região do caule mais próxima a raiz (número 1) até à região do caule mais próxima das folhas (número 5), tendo o número 3 como a região intermediária. Os valores da ordenada correspondem aos valores médios de armazenamento de água (m^3) de cada linha.

4.5 Fluxo hídrico teórico no caule de feijão

Os valores teóricos dos fluxos hídricos nos caules dos feijões (Figura 47), obtidos por meio da Equação de Poiseuille (Seção 3.2.2), obteve R^2 aproximadamente a 39%, em relação aos dados experimentais de fluxo médio no caule das plantas de feijão para cada tratamento (das 6 às 16 horas).

Baixas correlação de fluxos e resistências obtidas pela equação de Poiseuille em relação as medidas experimentais já foram encontradas em alguns trabalhos (TEARE e PEET, 1983; FRENSCH, 1997; NOBEL, 1999). Steudle e Peterson (1998), por exemplo, obteve uma diferença de 10^{-4} MPa.s.m⁻³ de resistência hidráulica entre a resistência teórica e experimental (medidas *in situ*⁹). Segundo Pimentel (2004), essa diferença deve-se a não interpretação, por parte da equação, da existência de interrupção da continuidade do fluxo entre poros das paredes celulares e as células do xilema.

Entretanto, apesar do baixo valor de R², conseguiu-se alguns valores de mesma ordem de grandeza que o valor medido, 10^{-9} m³.s⁻¹, e diferenças máximas na ordem de 10^{-1} m³.s⁻¹.

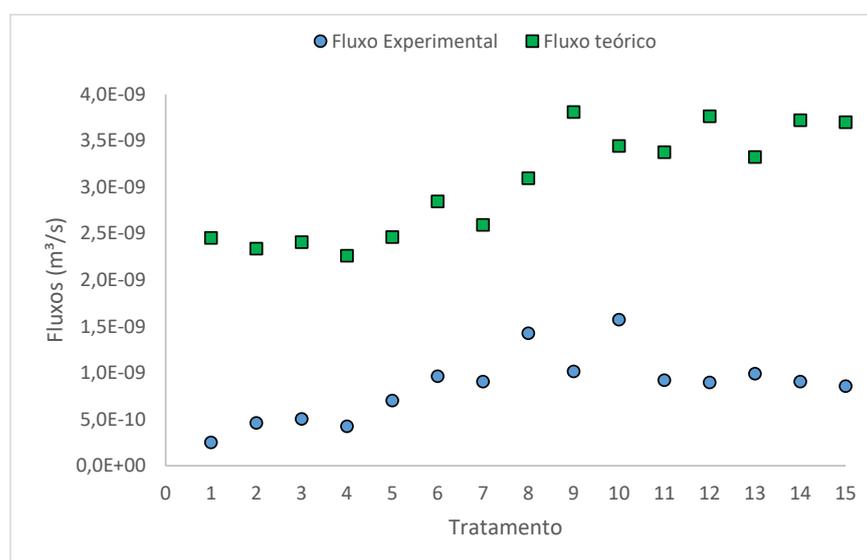


Figura 47. Fluxo experimental e estimado, para cada tratamento (m³.s⁻¹). R²=38,70%.

4.6 Circuito hídrico do caule das angiospermas

O circuito do caule de angiospermas está na Figura 48 e é caracterizado pelas conexões das camadas externa, intermediária e interna. Nessas conexões foram colocados resistores que, pela analogia hídrico-elétrica, corresponderiam as resistências ao fluxo hídrico entre camadas de células cujos os valores são os mesmos das resistências para células vizinhas. O número total de células presente no circuito é 75.

⁹ De origem latina, a expressão *in situ* significa no lugar. Ou seja, medida *in situ* refere-se à uma medida de uma propriedade no exato local de estudo.

Às fontes “P1” e “P2”, potenciais hídricos (MPa) no início do caule (início do circuito) e na folha (final do circuito), correspondem os valores de pontos específicos, tais como o xilema da raiz e o xilema da folha (NOBEL, 2009), ou de um único componente geral relativo ao caule e o xilema da folha (GAIO, 2011). Pr1 é a ponteira de fluxo hídrico (corrente).

O que diferencia o resultado apresentado neste trabalho com os circuitos de Gaio (2011) e com o circuito das gimnospermas é que este circuito é um modelo mais robusto para o caule de angiospermas com uma malha tridimensional de elementos de vaso, existindo a conexão entre as células horizontais, verticais e intercamadas. Além disso, há conexões das células das extremidades de cada camada de modo que possibilite a comunicação entre todas as células da mesma camada. Essa robustez permite, neste modelo, estimar o fluxo hídrico no caule de angiospermas, mesmo quando, devido à cavitação, há interrupção de fluxo em alguns elementos de vaso.

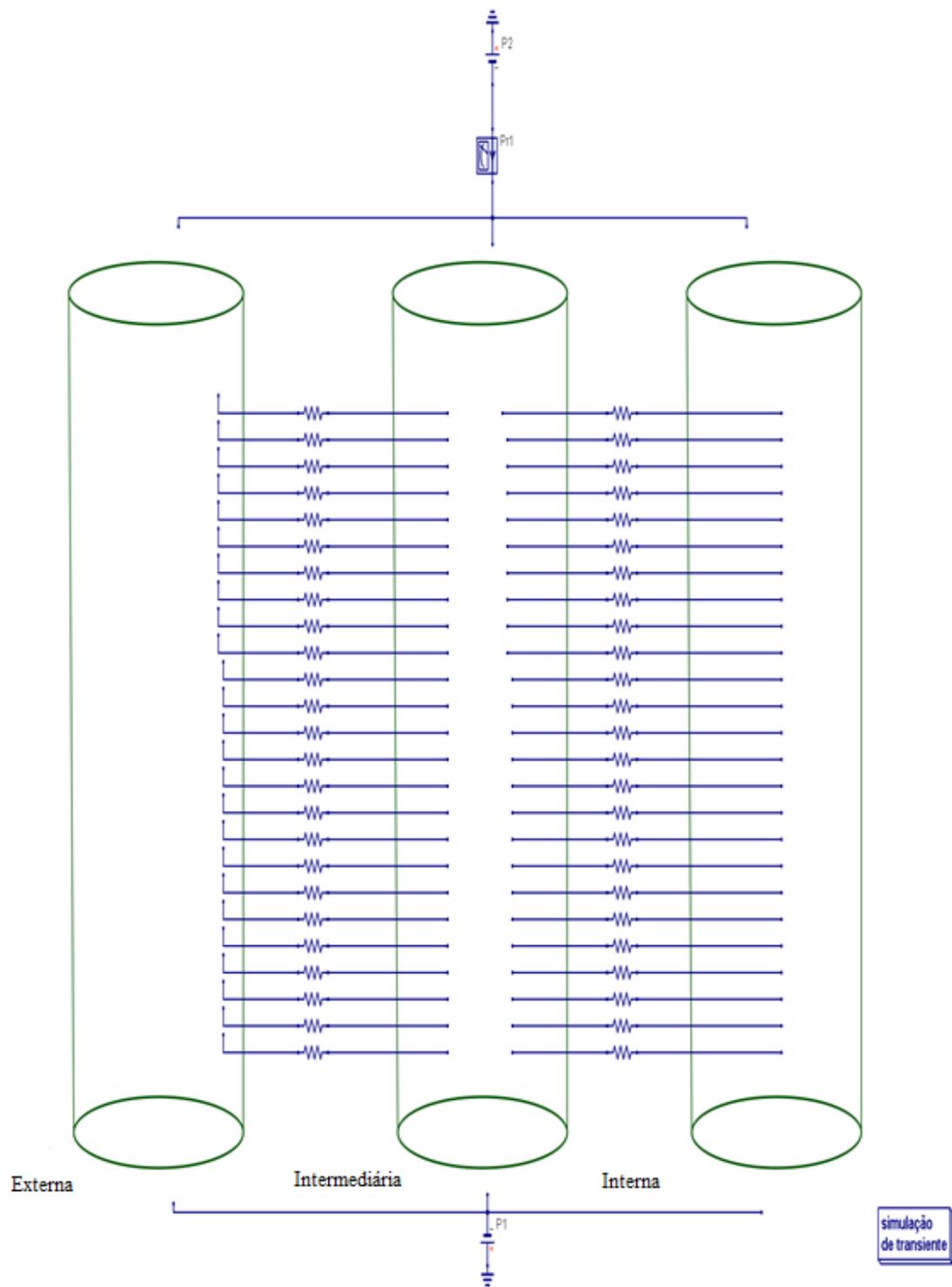


Figura 48. Circuito geral das angiospermas, representado pelas conexões da camada externa, intermediária e interna.

Os valores médios de resistência para cada tratamento do circuito dos elementos de vaso do feijão (Tabela 12) foram da ordem de 10^{14} a 10^{15} Pa.s.m⁻³ (ou, 10^8 MPa e 10^9 MPa), e de 10^{-12} a 10^{-13} F. O valor de $1,70 \times 10^{15}$ Pa.s.m⁻³ de resistência real ao fluxo hídrico em traqueídes, encontrado por Lanchashire et al. (2002) para a espécie *Tsuga Canadensis*, é da mesma ordem de grandeza que este trabalho.

Entretanto, como a resistência de um elemento de vaso foi considerada como a resistência total do caule, é muito provável que a resistência real de um elemento de vaso do feijão seja menor que a resistência de uma célula traqueíde. Isso, que é uma parte futura deste estudo, conforme Salisbury e Ross (1992), poderá mostrar inferioridade numérica da resistência dos elementos de vaso do feijão quando comparado com os traqueídes da *Tsuga Canadensis*.

Tabela 12. Valores dos componentes dos circuitos gerais para as células elementos de vaso do feijão.

Tratamento	C1 (m ³ .Pa ⁻¹)	R1 (Pa.s.m ⁻³)	R2, R3, R4 ,R5 e entre camadas (Pa.s.m ⁻³)
1	$1,8 \times 10^{-12}$	$4,0 \times 10^{15}$	$8,0 \times 10^{15}$
2	$1,8 \times 10^{-12}$	$2,2 \times 10^{15}$	$4,4 \times 10^{15}$
3	$2,1 \times 10^{-12}$	$2,0 \times 10^{15}$	$4,0 \times 10^{15}$
4	$2,5 \times 10^{-12}$	$2,4 \times 10^{15}$	$4,7 \times 10^{15}$
5	$1,9 \times 10^{-12}$	$1,4 \times 10^{15}$	$2,9 \times 10^{15}$
6	$2,5 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{15}$	$2,1 \times 10^{15}$
7	$2,0 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{15}$	$2,2 \times 10^{15}$
8	$1,7 \times 10^{-12}$	$7,0 \times 10^{14}$	$1,4 \times 10^{15}$
9	$1,4 \times 10^{-12}$	$9,9 \times 10^{14}$	$2,0 \times 10^{15}$
10	$1,8 \times 10^{-12}$	$6,4 \times 10^{14}$	$1,3 \times 10^{15}$
11	$2,2 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{15}$	$2,2 \times 10^{15}$
12	$1,4 \times 10^{-13}$	$1,1 \times 10^{15}$	$2,2 \times 10^{15}$
13	$2,2 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{15}$	$2,0 \times 10^{15}$
14	$2,3 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{15}$	$2,2 \times 10^{15}$
15	$2,1 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{15}$	$2,3 \times 10^{15}$

A maior média de tempo característico de descarga de capacitor foi de aproximadamente 2 horas, correspondente ao tratamento 1.

Dados de resistência e capacitância de plantas obtidos por modelagem *in silico* ou por experimento não são comuns na literatura, nesse tema se destacam estudos sobre capacitância e resistências por meio de sensores invasivos ou modelagem numéricas (FEHRENBACH et al., 1992; JAWOREK e TRELA, 2004).

4.7 Fluxo hídrico no caule de feijão (Validação do modelo *in silico*)

Obteve-se bom ajuste dos valores de fluxo obtido pelo modelo *in silico* em relação aos valores experimentais de fluxo médio no caule das plantas de feijão (das 6 às 16 horas), com R^2 de aproximadamente 95,5% (Figuras 49 e 50).

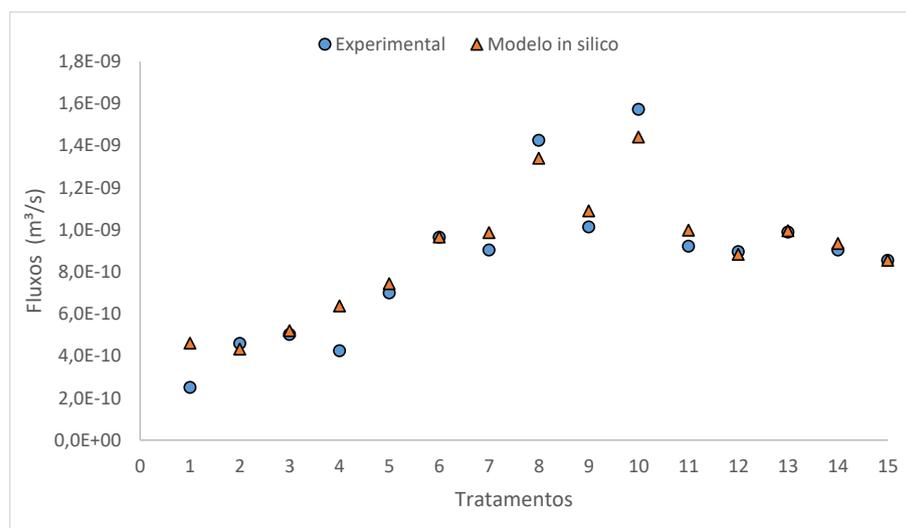


Figura 49. Fluxo experimental e do modelo *in silico*, para cada tratamento ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). $R^2=95,46\%$.

O coeficiente de Spearman foi de 0,80, valor próximo ao valor de 0,87 obtido por Pereira (2016) que fez modelagem *in silico* da dinâmica estomática em função da radiação solar e potencial hídrico atmosférico. Assim, este modelo mostrou ter desempenho muito próximo aos dados experimentais, o que evidencia o potencial dos modelos hídricos análogos à eletricidade. Nesse sentido, este trabalho dá continuidade aos trabalhos de Gaio (2011), Siqueira (2014) e Pereira (2013; 2016).

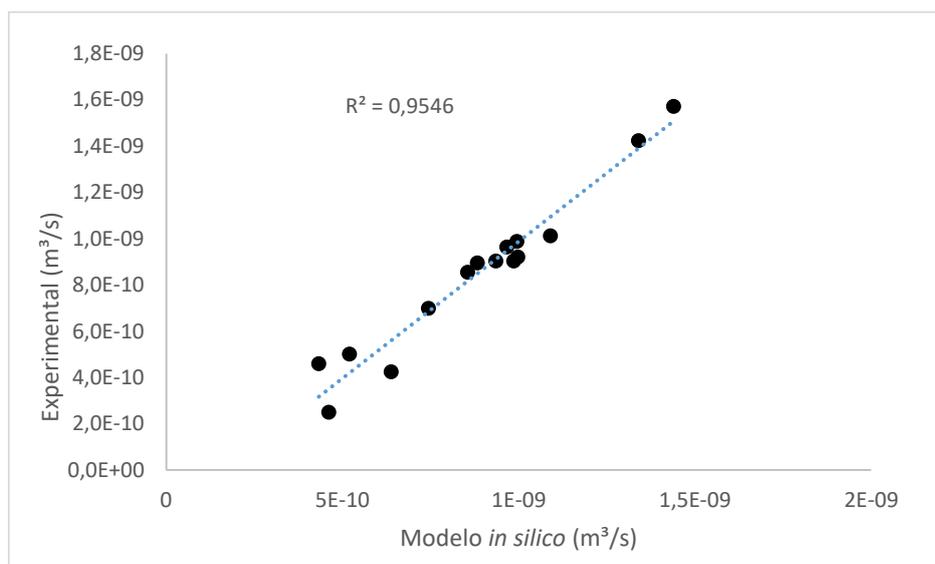


Figura 50. Regressão entre fluxo experimental e fluxo do modelo *in silico* ($R^2=95,46\%$, correlação de Spearman aproximadamente igual a 0,80).

O modelo análogo hídrico-elétrico se torna uma opção nos estudos deste tema como uma técnica teórica, podendo auxiliar na compreensão das funções do xilema, que é fundamental para testar hipóteses ecológicas evolutivas quanto à diversidade e tipos de estruturas (PRATT et al., 2007).

5. CONCLUSÃO

A malha tridimensional de elementos de vaso do caule pertencente ao circuito obtido neste trabalho correspondeu bem aos dados experimentais da literatura e aos dados obtidos a partir do experimento de feijão. Os dispositivos hídricos representantes das células elemento de vaso se diferenciaram dos circuitos hídricos do caule obtidos em trabalhos anteriores, principalmente pela não existência do tórus e pela existência da conexão resistiva intercamadas e entre células.

Os dados de quantidade de água no caule de feijão e do fluxo hídrico, correspondente a transpiração, em diferentes quantidades de água no solo, permitiu calcular a resistência e capacitância da planta conforme equações (GAIO, 2011) e valores de potenciais hídricos sugeridos na literatura (NOBEL, 2009).

A analogia hídrico-elétrica adequou-se para representação do caule das angiospermas, mostrando ser, por meio dos dispositivos hídricos, uma boa possibilidade de estudos dos fluxos hídrico no contínuo SPA, como já defendido por Gaio (2011).

No circuito do caule com os dados de Ellerby e Ennos (1998), os fluxos obtidos para os elementos de vaso com placas de perfuração simples foram maiores que os fluxos hídricos das células com placas de perfuração escalariforme, resultado em conformidade com Carlquist (1975; 1991), Oskolski e Jansen (2009) e Christman e Sperry (2010).

A tendência da queda do fluxo causada pela cavitação, nas angiospermas, é também polinomial como nas gimnospermas, concordante assim com Rice et al. (2004). O volume de água no circuito com dados de Ellerby e Ennos (1998) mostrou-se ser maior nas células da região superior, o que representaria uma região do caule mais próxima das folhas, podendo ser um dos reflexos do papel regulativo do caule sobre as folhas (GOLDSTEIN et al., 1998).

O modelo do caule de feijão deste trabalho obteve bom ajuste aos dados experimentais ($R^2=95,46\%$) e valor de correlação de Spearman de 0,8. A estimativa teórica obteve R^2 igual a 38,7%, sendo que alguns fluxos estimados apresentaram mesma ordem de grandeza que o fluxo experimental.

Este trabalho teve como condição de contorno a consideração do valor da resistência total do caule com sendo o valor de resistência de uma célula. Com os avanços de estudos sobre este tema, pretende-se calcular a resistência de uma célula do xilema, com aparatos adequados, e sanar essa condição.

Como recomendação de trabalhos futuros, a utilização de medidas *in situ* de potências hídricas em várias partes da planta pode contribuir diretamente no avanço do tema, o que representaria melhor a situação real do experimento. Pois, comumente, os valores mais utilizados na literatura são teóricos.

Tem-se também como recomendação para trabalhos futuros a mudança dos capacitores convencionais para capacitores que sejam controlados por sinais de potencial hídrico e que tenham limites de armazenamento, já que existe um limite intrínseco ao volume dos caules. Esse dispositivo é conhecido como varicap, ou varactor, e possibilitaria a sofisticação dos modelos geral e específico das plantas, bem como em suas calibrações com novos dados experimentais de espécies do Pantanal.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, F. L. **Efeito de bioestimulante sobre a produtividade e qualidade fisiológica de dois cultivares de feijão cultivados no inverno**. 2008.. 66 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2008.
- ALMEIDA, M.; ALMEIDA, C.V. Morfologia da raiz de plantas com sementes. **Coleção Botânica**, 1, 2014.
- ALMEIDA, W. F. de. **Gotejamento por pulsos e cobertura do solo na formação do bulbo molhado e produtividade da alface americana**. 2012. 79 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.
- ANGELOCCI, L. R. 2002. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera. Introdução ao tratamento biofísico**. Editado pelo autor, Piracicaba.
- ATHANÁZIO, J. C. Adubação de feijão-vagem. In: FERREIRA, M. E.; CASTELLANE, P. D.; CRUZ, M. C. P. da. (Ed). **Nutrição e adubação de hortaliças**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato.487p. 1993.
- ARÉVALO, J. J.; VÉLEZ, S.; ENRIQUE, J.; INTRIGLIOLO, D. S. Determination of an efficient irrigation schedule for the cultivation of rose cv. Freedom under greenhouse conditions in Colombia. **Agronomía Colombiana**, v. 32, n. 1, p. 95-102, 2014.
- BARBOSA, F.; GONZAGA, A. Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na Região Central-Brasileira. **Embrapa Arroz e Feijão. Santo Antônio de Goiás, Brasil**, 2012.
- BAAS, P.; EWERS, F. W.; DAVIS, S. D.; WHEELER, E. A. Evolution of xylem physiology. **The evolution of plant physiology**, v. 273, p. 273-291, 2004.
- BETTIOL, W. **Leite de vaca cru para o controle de oídio**. Embrapa Meio Ambiente, 2004.
- BORCHERT, R. Water status and development of tropical trees during seasonal drought. **Trees**, v. 8, n. 3, p. 115-125, 1994.
- BORGES, A. L.; SOUZA, L. D. S. Cobertura vegetal del suelo para el banano. **REUNIÓN ACORBAT**, v. 13, p. 608-617, 1998.
- CAMPECHE, L.F.S.M.; AGUIR NETTO, A.O.; SOUSA, I.F.; FACCIOLI, G.G.; SILVA, V.P.R.; AZEVEDO, P.V. LISÍMETRO DE PESAGEM DE GRANDE PORTE. PARTE I: Desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 519-525, 2011.
- CARLQUIST, S. Anatomy of vine and liana stems: a review and synthesis. In: F.E. Putz e H.A. Mooney (eds.). **The Biology of Vines**. Cambridge, Cambridge University Press, 1991.
- CARLQUIST, S.J. **Ecological strategies of xylem evolution**. Univ of California Press, 1975.
- CHARLTON, R. Fundamentals of fluvial geomorphology. **New York: Routledge**, 234p. 2007

CHEN, Z. H.; HILLS, A.; BÄTZ, U.; AMTMANN, A.; LEW, V. L.; BLATT, M. R. Systems dynamic modeling of the stomatal guard cell predicts emergent behaviors in transport, signaling, and volume control. **Plant physiology**, v. 159, n. 3, p. 1235-1251, 2012.

CHRISTMAN, M. A.; SPERRY, J.S.; SMITH, D. D. Rare pits, large vessels and extreme vulnerability to cavitation in a ring-porous tree species. **New Phytologist**, v. 193, n. 3, p. 713-720, 2012.

CHRISTMAN, M.A.; SPERRY, J.S. Single-vessel flow measurements indicate scalariform perforation plates confer higher flow resistance than previously estimated. **Plant, Cell e Environment**, v. 33, n. 3, p. 431-443, 2010.

CLARK, G. A.; MAYNARD, D. N. Vegetable production on various bed widths using drip irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 8, n. 1, p. 28-32, 1992.

COCHARD, H.; TYREE, M.T. Xylem dysfunction in *Quercus*: vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. **Tree Physiology**, v. 6, n. 4, p. 393-407, 1990.

COELHO FILHO, M. A., BASSOI, L., ANGELOCCI, L., COELHO, E., PEREIRA, F. D. C. Relação solo-planta-atmosfera. **Embrapa Mandioca e Fruticultura-Capítulo em livro técnico-científico (ALICE)**.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2014/15, 7º levantamento**. 2015. Available at: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_10_09_22_05_boletim_graos_abril_2015.pdf>. Acesso em: agosto/2017.

COSTA, C.G.; CALLADO, C.H.; CORADIN, V.T.R.; CARMELLO-GUERREIRO, S.M. Xilema. In: APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B; CARMELLO-GUERREIRO, S.M. (Orgs.). **Anatomia vegetal**. Viçosa: Editora da UFV, p.129-154, 2006.

COWAN, I.R. **An Electrical Analogue of Evaporation from, and Flow of Water in Plants**. *Planta*, 1972.

DENMEAD, O, T; SHAW, R, H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy journal**, v. 54, n. 5, p. 385-390, 1962.

DE OCA, G.M. Mejoramiento genético de la habichuela en el CIAT y resultados de viveros internacionales. In: DAVIS, J.; JASSEM, W. (Ed.) **El Mejoramiento genético de la habichuela in America Latina: memorias de un taller**. Cali, Colombia, CIAT, 1. p. 60-72, 1987.

DIXON H. H.; JOLY J. On the ascent of sap. *Phil. Trans. Royal Society o London B, Biological Sciences* 186, p. 563–576. 1894.

ELLERBY, D. J.; ENNOS, A. R. Resistances to fluid flow of model xylem vessels with simple and scalariform perforation plates. **Journal of Experimental Botany**, v. 49, n. 323, p. 979-985, 1998.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de Métodos de análises de solo, 2ªed, Rio de Janeiro-RJ: **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**, 212p. (Embrapa-CN-Doc:1), 1997.

ESAU, K. Anatomia das plantas com sementes. Tradução de Morretes, B. L. **Editora Edgard Blücher**. . São Paulo. 1974.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia do feijoeiro. **Tecnologia da produção do feijão irrigado**. Piracicaba: **ESALQ, Departamento de Agricultura**, p. 100-20, 1997.

FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 2011. **The State of Food and Agriculture 2010-2011 1: Women in Agriculture**. flome: FAO.

FARQUHAR, G. D.; COWAN, I. R. Oscillations in stomatal conductance. **Plant Physiology**, v. 54, n. 5, p. 769-772, 1974.

FARIA, M.T. **Produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigada por aspersão convencional com diferentes métodos de estimativa de lâmina de irrigação**. Jaboticabal. 2012. 99f. Tese. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F.; CHIBANA, E. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 237-242, 2006.

FEHRENBACH, R.; COMBERBACH, M.; PETRE, J. O. On-line biomass monitoring by capacitance measurement. **Journal of biotechnology**, v. 23, n. 3, p. 303-314, 1992.

FERREIRA, R.P. **Desenvolvimento de Módulo De Software Para Simulação do Fluxo de Calor no Solo** Cuiabá, 2017. 66p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá. 2017.

FERREIRA, M. I.; CONCEIÇÃO, N.; MALHEIRO, A. C.; SILVESTRE, J. M. Water stress indicators and stress functions to calculate soil water depletion in deficit irrigated grapevine and kiwi. In: **VIII International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 1150**, p. 119-126, 2015.

FIGUEIRÊDO, V. B.; MEDEIROS, J. F. D.; ZOCOLER, J. L.; ESPINOLA SOBRINHO, J. Evapotranspiração da cultura da melancia irrigada com água de diferentes salinidades. **Engenharia Agrícola**, p. 231-240, 2009.

FILGUEIRA, F. A R. **Novo Manual de Olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: UFV, p. 421, 2008.

FIGUEIREDO, S. L.; RODRIGUES, J. D.; CARNEIRO, J. P. C.; DO AMARAL SILVA, A.; LIMA, M. B. Fisiologia e produção da soja tratada com cinetina e cálcio sob deficit hídrico e sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 11, p. 1432-1439, 2013.

FRENSCH, J. Primary responses of root and leaf elongation to water deficits in the atmosphere and soil solution. **Journal of Experimental Botany**, v. 48, n. 5, p. 985-999, 1997.

GAIO, D.C. **Análogo elétrico da dinâmica hídrica em plantas vasculares**. Cuiabá. 2011. 104 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

GARTNER, BARBARA L.; MEINZER, FREDERICK C. Structure-function relationships in sapwood water transport and storage. **Vascular transport in plants**, p. 307-318, 2005.

GEROLAMO, C.S. **Dinâmica, anatomia, biomecânica e condutividade hídrica de lianas da Floresta Amazônica**. São Paulo. 2016.16 p. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas. Universidade de São Paulo.

GEPTZ, P.; FERNANDÉZ, F. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol comum** (*Phaseolus vulgaris* L.). Cali, Colombia, CIAT, 10p. (mimeografado), 1982.

GIORDANO, R.; SALLEO, A.; SALLEO, S.; WANDERLINGH, F. Flow in xylem vessels and Poiseuille's law. **Canadian Journal of Botany**, v. 56, n. 3, p. 333-338, 1978.

GLÓRIA, B. A.; GUERREIRO, SMC. Anatomia vegetal. **Viçosa: UFV**, 2006.

GOLDSTEIN, G.; ANDRADE, J. L.; MEINZER, F. C.; HOLBROOK, N. M.; CAVELIER, J., JACKSON, P.; CELIS, A. Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. **Plant, Cell e Environment**, v. 21, n. 4, p. 397-406, 1998.

GRADMANN, H. Untersuchungen über die Wasserverhältnisse des Bodens als Grundlage des Pflanzenwachstums, *I. Jahrb. Wiss. Bot.* 69, p. 1–100, 1928.

GUET, J.; FICHOT, R.; LÉDÉE, C.; LAURANS, F.; COCHARD, H.; DELZON, S.; BRIGNOLAS, F. Stem xylem resistance to cavitation is related to xylem structure but not to growth and water-use efficiency at the within-population level in *Populus nigra* L. **Journal of experimental botany**, v. 66, n. 15, p. 4643-4652, 2015.

GUEYMARD, C.A.; MYERS, D.; EMERY, K. Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing. **Solar energy**, v. 73, n. 6, p. 443-467, 2002.

HOLBROOK, N. M.; AHRENS, E. T.; BURNS, M. J.; ZWIENIECKI, M. A. In vivo observation of cavitation and embolism repair using magnetic resonance imaging. **Plant Physiology**, v. 126, n. 1, p. 27-31, 2001.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em . Acesso em: 23 ago. 2011b.

JACOBSEN, A. L.; PRATT, R. B.; DAVIS, S. D.; TOBIN, M. F. Geographic and seasonal variation in chaparral vulnerability to cavitation. **Madroño**, v. 61, n. 4, p. 317-327, 2014.

JAWOREK, A.; KRUPA, A.; TRELA, M. Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 15, n. 5, p. 317-324, 2004.

JOHNSON A.; PRYTZ G. **Period Doubling of Rhythmic Water Regulation in Plants**. In: Biological Rhythms. Editor: Vinod Kumar. New Delhi: NarosaPublishing House. 2002.

JONES, H; LEIGH, R. A.; JONES, R. G. W.; TOMOS, A. D. **The integration of whole-root and cellular hydraulic conductivities in cereal roots.** *Plant*, Springer- Verlag, n° 1, p. 1-7, 1988.

JUDD, W. S.; CAMPBELL, C. S.; KELLOGG, E. A.; STEVENS, P. F.; DONOGHUE, M. **J.Sistemática Vegetal:- Um Enfoque Filogenético.** Artmed Editora, 2009.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiology of Woody Plants.** Academic Press. San Diego, 1997.

LANCASHIRE, J. R.; ENNOS, A. R. Modelling the hydrodynamic resistance of bordered pits. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 373, p. 1485-1493, 2002.

LANG, A., KLEPPER, B.; CUMMING, M. Leaf Water Balance During Oscillation of Stomatal Aperture. **Plant Physiol**, vol. 44, p. 826-830, 1969.

LANGAN, S. J.; EWERS, F. W.; DAVIS, D. Xylem dysfunction caused by water stress and freezing in two species of co-occurring chaparral shrubs. **Plant, Cell and Environment**. Vol. 20, p. 425-437, 1997.

LIMA, C.A. Avaliação de umidade, cinzas e proteínas em folhas e caule de Ora-pro-nóbis (*Pereskia grandifolia* Haworth). In: **Congresso de Pesquisa e Extensão da Faculdade da Serra Gaúcha**, p. 53-55, 2016.

LIMA, L.P.A. **Análogo Elétrico da Dinâmica Hídrica de Caules de Plantas Vasculares.** 2015.20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá ,2015.

LIMA, R.M.F.; LUZ, J.A.M. Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: Lei de Stokes. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 54, n. 2, p. 155-159, 2001.

MEINZER, F. C., WOODRUFF, D. R., DOMEK, J. C., GOLDSTEIN, G., CAMPANELLO, P. I., GATTI, M. G., VILLALOBOS-VEGA, R. Coordination of leaf and stem water transport properties in tropical forest trees. **Oecologia**, v. 156, n. 1, p. 31-41, 2008.

MELCHER, P. J.; MICHELE HOLBROOK, N.; BURNS, M. J.; ZWIENIECKI, M. A.; COBB, A. R.; BRODRIBB, T. J.; SACK, L. Measurements of stem xylem hydraulic conductivity in the laboratory and field. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 3, n. 4, p. 685-694, 2012.

MOREIRA, F.R. Sobre as leis de Poiseuille no sistema circulatório. **Vita et Sanitas**, v. 2, n. 2, p. 92-110, 2008.

MUNEER, T. **Solar radiation and daylight models.** Routledge, 2007.

NADAL-SALA, D; SABATÉ, S.; GRACIA, C. Importancia relativa dela profundidad del suelo para la resiliencia de los bosques de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) frente al incremento de aridez debido al cambio climático. **Revista Ecosistemas**, v. 26, n. 2, p. 18-26, 2017.

NOBEL, P.S. **Physicochemical and Environmental Plant Physiology**, 4th edition, San Diego, CA Academic Press/Elsevier 1-582. 2009.

NOGUEIRA, A. C. O. **Elaboração de curso de fitoterapia para o ensino de botânica, com base nas plantas medicinais selecionadas pelo ministério da saúde de interesse para o SUS**. Belo Horizonte. 2012. 157 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Biologia) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

OSKOLSKI, A.A; JANSEN, S. Distribution of scalariform and simple perforation plates within the vessel network in secondary xylem of Araliaceae and its implications for wood evolution. **Plant Systematics and Evolution**, v. 278, n. 1-2, p. 43-51, 2009.

PADDOCK III, W. A.; DAVIS, S. D.; PRATT, R. B.; JACOBSEN, A. L.; TOBIN, M. F.; LÓPEZ-PORTILLO, J.; EWERS, F. W. Factors determining mortality of adult chaparral shrubs in an extreme drought year in California. **Aliso: A Journal of Systematic and Evolutionary Botany**, v. 31, n. 1, p. 49-57, 2013.

PEREIRA, V.M.R. **Análogo elétrico da pressão de turgescência em células guarda de *vicia faba*: modelo científico e conceitual**. 2013. 66 p. (Mestrado em Física Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade de Mato Grosso.

PEREIRA, V.M.R. **Análogo elétrico da dinâmica estomática em função da radiação solar e potencial hídrico atmosférico**. Cuiabá. 2016. 70 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

PILLAR, V. D. Clima e vegetação. **Clima. UFRGS, Departamento de Botânica. Disponível em: <http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br>**, 1995.

PIMENTEL, C. A relação da planta com a água. **Seropédica: Edur**, 2004.

PHILIP, J. R. Plant water relations: Some physical aspects. **Annu. Rev. Plant Physiol.** 17, 245-268. ,1966.

POCKMAN, WILLIAM T.; SPERRY, JOHN S. Freezing-induced xylem cavitation and the northern limit of *Larrea tridentata*. **Oecologia**, v. 109, n. 1, p. 19-27, 1996.

PRATT, R. B.; JACOBSEN, A. L.; EWERS, F. W.; DAVIS, S. D. Relationships among xylem transport, biomechanics and storage in stems and roots of nine Rhamnaceae species of the California chaparral. **New Phytologist**, v. 174, n. 4, p. 787-798, 2007.

RAMAKRISHNA, A.; TAM, H. M.; WANI, S. P.; LONG, T. D. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. **Field Crops Research**, v. 95, n. 2, p. 115-125, 2006.

RICE, K. J.; MATZNER, S. L.; BYER W.; BROWN, J. R. Patterns of tree dieback in Queensland, Australia: the importance of drought stress and the role of resistance to cavitation. **Oecologia**, v. 139, n. 2, p. 190-198, 2004.

ROELFSEMA, M.R.G; HEDRIC, R. In the light of stomatal opening: new insights into 'the Watergate'. **New Phytologist**, vol. 167, pp 665 – 691, 2005.

SALINAS, S. R. A. Introdução à Física Estatística EdUSP. **São Paulo**, 2005.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W.; AMAN, R.; MOHAMED, H; NOOR, N. M. **Fisiology tumbuhan**. Dewan Bahasa dan Pustaka, 1992.

SCHREIBER, S. G.; HACKE, U. G.; CHAMBERLAND, S.; LOWE, C. W.; KAMELCHUK, D.; BRÄUTIGAM, K.; THOMAS, B. R. Leaf size serves as a proxy for xylem vulnerability to cavitation in plantation trees. **Plant, cell e environment**, v. 39, n. 2, p. 272-281, 2016.

SCORDILIS T.; BRINSON M.; KRAUT G.; JAHN S.; PITCHER, C. **Workbook of QUCS**. 2007.

SEIXAS, G.B. **Determinação da transpiração em plantas de nim indiano (*Azadirachta indica*. Juss) utilizando métodos de estimativa de fluxo de seiva**. 2009. 71 f, Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2009.

SILVA, F. M. D. C.; APOLINARIO, M. D. F.; SIQUEIRA, A. M. D. O.; CANDIAN, A. L. M.; MOREIRA, L. A. F.; SARTI, M. R. Experimento didático de reynolds e conceitos básicos em mecânica dos fluídos. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 3, n. 3, p. 346-357, 2017.

SILVEIRA, F. Anatomia vegetal. **Curvelo: Faculdade de Ciências de Curvelo. Departamento de Ciências Biológicas**, 2004.

SIQUEIRA, W. L. C. **Modelagem das vias de transporte hídrico da raiz em plantas vasculares - análogo elétrico**. Cuiabá. 2014. 64f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

SPERRY, J.S.; MEINZER, F. C.; MCCULLOH, K. A. Safety and efficiency conflicts in hydraulic architecture: scaling from tissues to trees. **Plant, Cell e Environment**, v. 31, n. 5, p. 632-645, 2008.

SPERRY, J. S.; HACKE, U. G.; PITTERMANN, J. Site and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. **American Journal of Botany**, 2006.

SPERRY, J. S.; IKEDA, T. Xylem cavitation in roots and stems of Douglas-fir and white fir. **Tree Physiology**, v. 17, n. 4, p. 275-280, 1997.

STEUDLE, E.; PETERSON, C. A. How does water get through roots?. **Journal of experimental Botany**, v. 49, n. 322, p. 775-788, 1998.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters**. John Wiley e Sons, 2012.

SUN, Z.; JIN, X.; ALBERT, R.; ASSMANN, S.M. Multi-level Modeling of Light-Induced Stomatal Opening Offers New Insights into Its Regulation by Drought. **PLoS Computational Biology** vol.10, n.11, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre:Artemed, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. trad. SANTARÉM, ER et. al, v. 4, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Universitat Jaume I, 2006.

TEARE, I. D.; PEET, M. M. Crop-water relations. **Wiley**, 1983.

TSEKLEEV, G.; BOYADJIEVA, N.; SOLAKOV, Y. Influence of photo-selective mulch films on tomatoes in greenhouses. **Plasticulture**, Paris, v.95, p.45-49, 1993.

TYREE, M. T.; EWERS, F. W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. **New Phytologist**, v. 119, n. 3, p. 345-360, 1991.

TORRES-RUIZ, J. M., COCHARD, H., CHOAT, B., JANSEN, S., LÓPEZ, R., TOMÁŠKOVÁ, I., LENOIR, N. Xylem resistance to embolism: presenting a simple diagnostic test for the open vessel artefact. **New Phytologist**, 2017.

VAN DEN HONERT, T. H. Water transport as a catenary process. **Faraday Soc. Discuss.** 1948.

VENTURAS, M. D.; RODRIGUEZ-ZACCARO, F. D.; PERCOLLA, M. I.; CROUS, C. J.; JACOBSEN, A. L.; PRATT, R. B. Single vessel air injection estimates of xylem resistance to cavitation are affected by vessel network characteristics and sample length. **Tree physiology**, v. 36, n. 10, p. 1247-1259, 2016.

VIEIRA, E. L.; SOUZA, G. S.; SANTOS, A. R. S; SILVA, J.S. **Manual de Fisiologia Vegetal**. São Luís: EDUFMA, 2010.

VIEIRA, C.; JÚNIOR, T.J.P; BORÉM, A. Feijão. 2ª edição. **Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa**, 2006.

WESTERHOF, N.; STERGIOPULOS, N.; NOBLE, M. IM. **Snapshots of hemodynamics: an aid for clinical research and graduate education**. Springer Science e Business Media, 2010.

WHEELER, J. K., SPERRY, J. S., HACKE, U. G., HOANG, N. Inter-vessel pitting and cavitation in woody Rosaceae and other vesselled plants: a basis for a safety versus efficiency trade-off in xylem transport. **Plant, Cell e Environment**, v. 28, n. 6, p. 800-812, 2005.

WHEELER, E. A. Vessels per square millimetre or vessel groups per square millimetre?. **IAWA Journal**, v. 7, n. 1, p. 73-74, 1986.

ZHANG, Y. J., ROCKWELL, F. E., GRAHAM, A. C., ALEXANDER, T., e HOLBROOK, N. M. Reversible leaf xylem collapse: a potential 'circuit breaker' against cavitation. **Plant physiology**, p. pp. 01191.2016, 2016.

ZHUANG, J; YU, G.R; NAKAYAMA, K. A Series RCL Circuit Theory for Analyzing Non-Steady-State Water Uptake of Maize Plants. **Scientific reports**, v. 4, 2014.

APÊNDICE A

Seguem os resultados dos volumes para os circuitos de elementos de vaso de 410 μm com placa simples (Figura 51), de 1090 μm com placa simples (Figura 52), de 1090 μm com placa escalariforme (Figura 53) e de 410 μm com placa escalariforme (Figura 54). A figura 55 trata da curva de crescimento de valores de armazenamento de água (m^3) em função da região do caule (representada pelos valores da abscissa de 1 a 5).

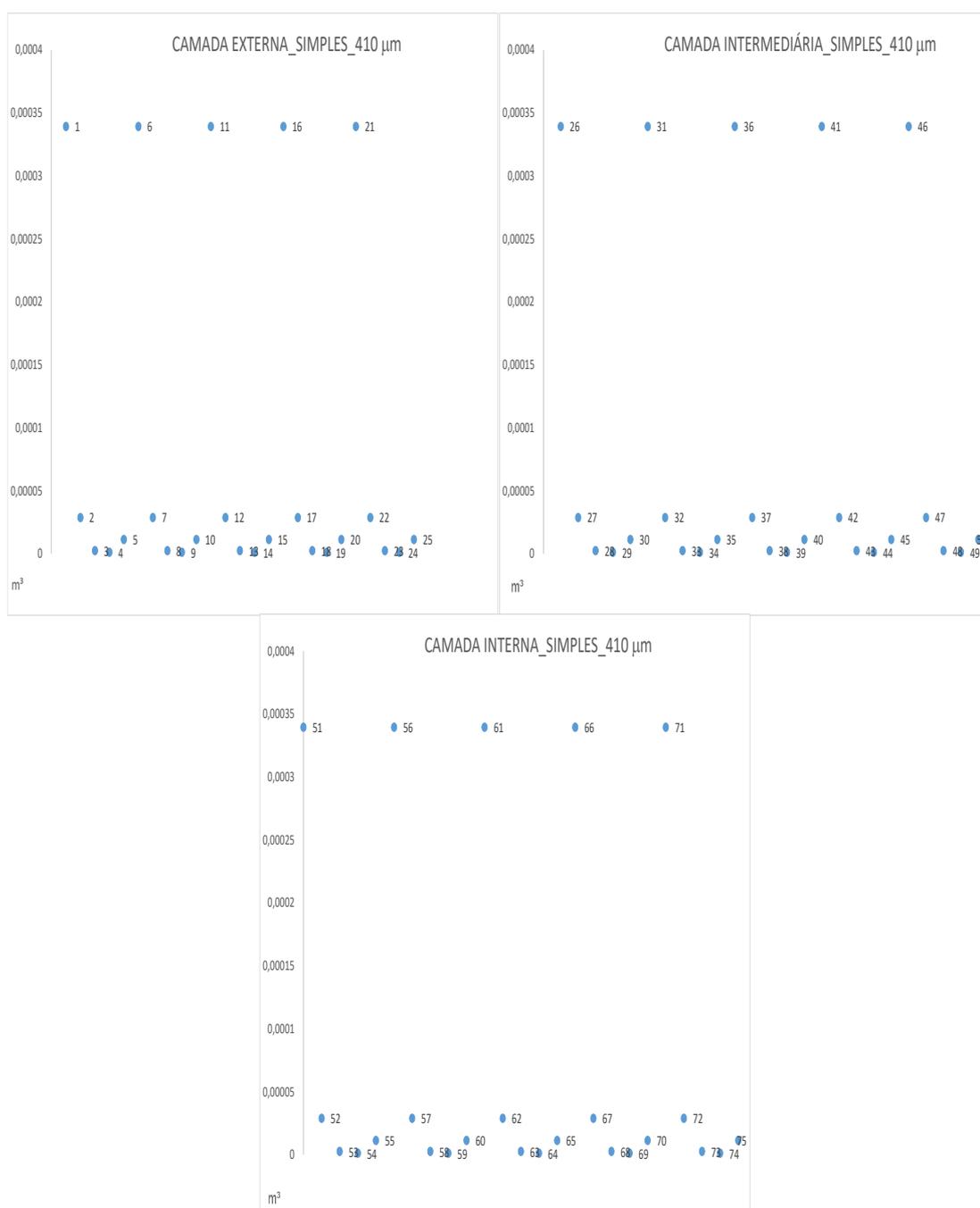


Figura 51. Elementos de vaso de comprimento 410 μm com placa simples. Gráficos de dispersão de volume, m³, em função da posição da célula no circuito da completo incluindo as camadas externa, intermediária e interna.

O maior e o menor valor de volume obtido para as células desse circuito foram, respectivamente, $3,39 \times 10^{-4}$ m³ e $1,16 \times 10^{-6}$ m³. Apesar das células apresentarem valores de volumes diferentes, a soma total dos volumes das células das camadas externa, intermediária e interna não se diferiram (valor de $3,39 \times 10^{-3}$ m³).

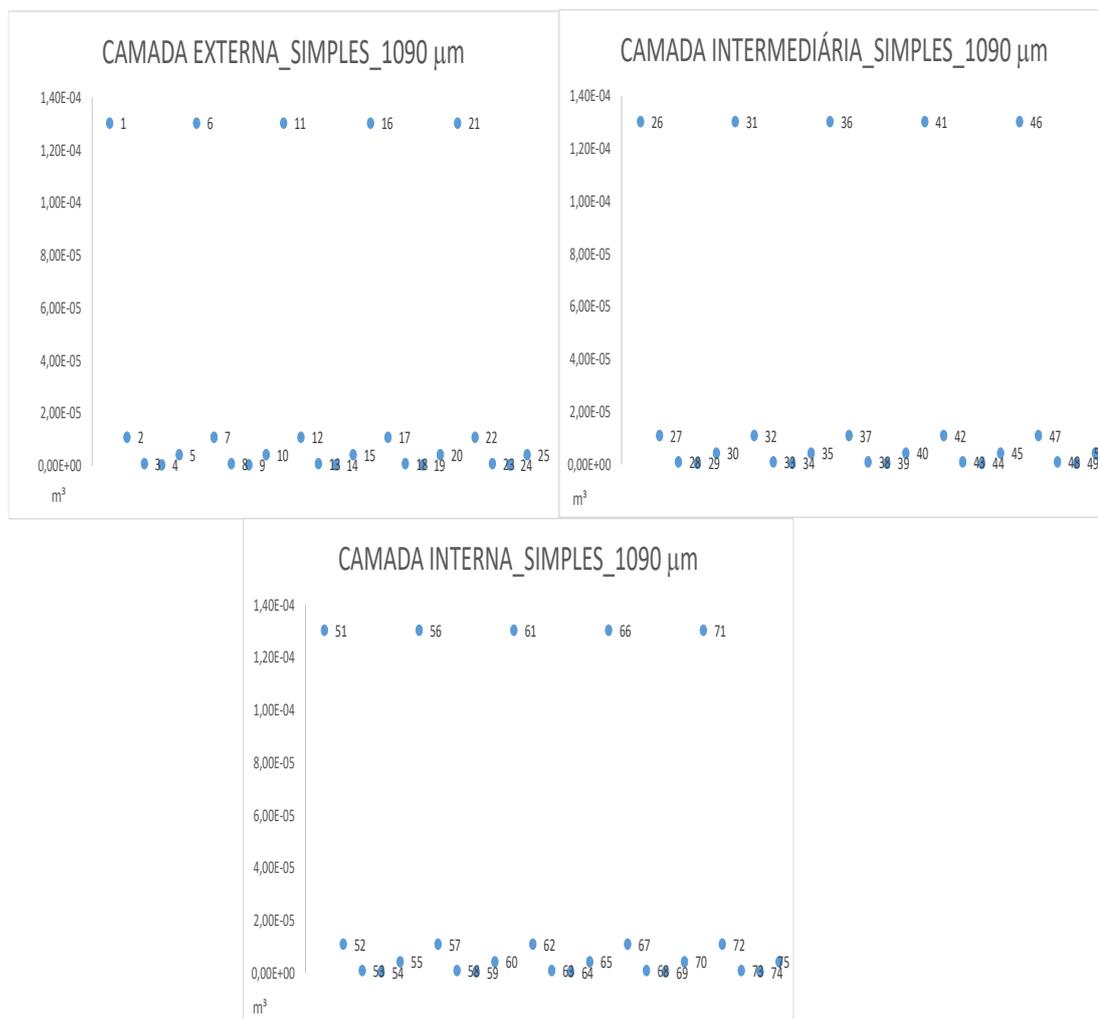


Figura 52. Elementos de vaso de comprimento 1090 μm com placa simples. Gráficos de dispersão de volume, m³, em função da posição da célula no circuito da completo incluindo as camadas intermediária, interna e externa.

O maior e o menor valor de volume obtido para as células desse circuito foram, respectivamente, $1,30 \times 10^{-4}$ m³ e $4,39 \times 10^{-7}$ m³. Nesse caso, também, a soma total do volume das células das camadas externa, intermediária e interna não se diferiram (valor de $7,35 \times 10^{-4}$ m³). O valor de armazenamento das células com comprimentos de 1090 μm foi 38% em média menor que o valor de armazenamento das células com comprimentos de 410 μm.

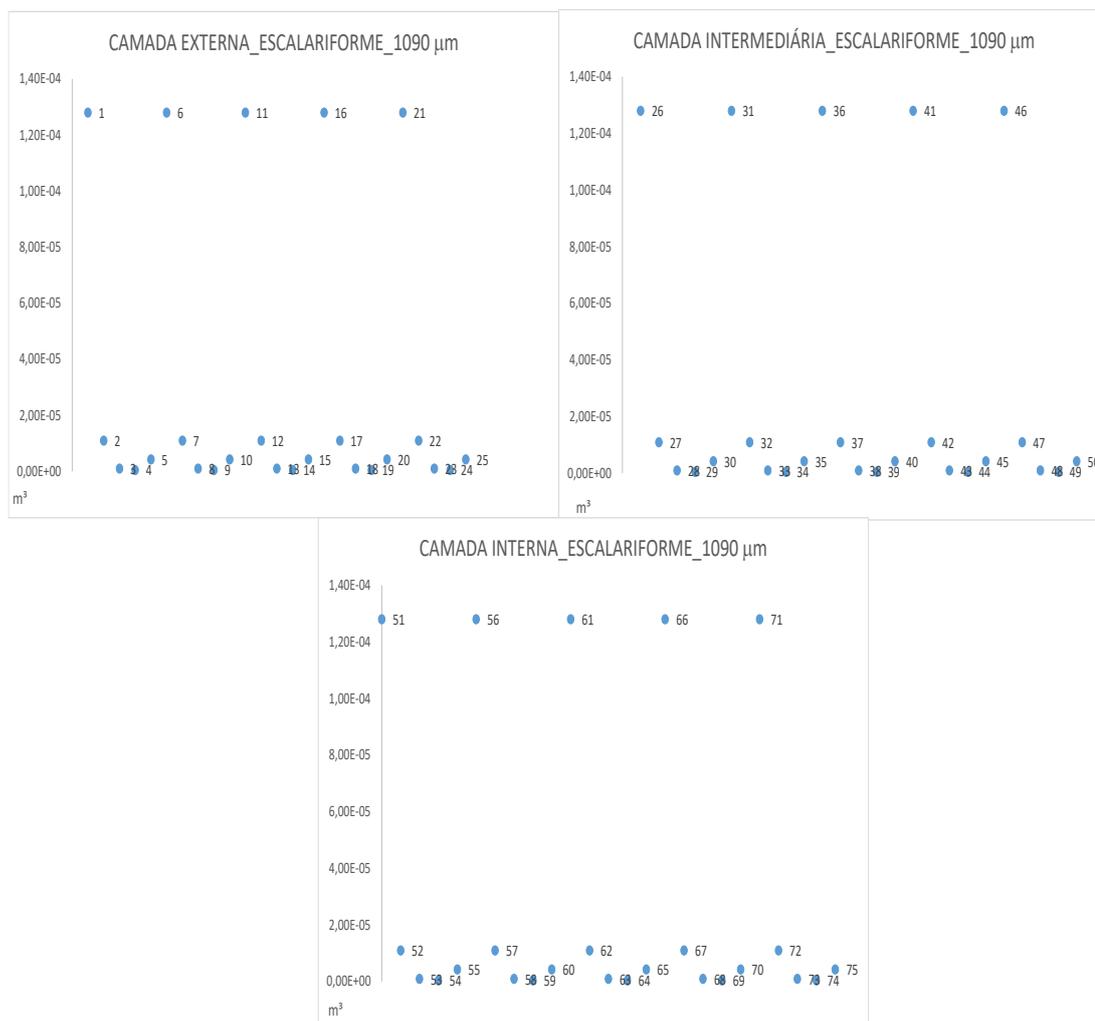


Figura 53. Elementos de vaso de comprimento 1090 μm com placa escalariforme. Gráficos de dispersão de volume, m^3 , em função da posição da célula no circuito da completo incluindo as camadas externa, intermediária e interna.

O maior e o menor valor de volume obtido para as células desse circuito foram, respectivamente, $1,28 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ e $4,44 \times 10^{-7} \text{ m}^3$. O volume total envolvendo as células das camadas externa, intermediária e interna não se diferiram (valor de $7,23 \times 10^{-4} \text{ m}^3$). O valor de armazenamento das células com comprimentos de 1090 μm foi 38% em média menor que o valor de armazenamento das células com comprimentos de 410 μm .

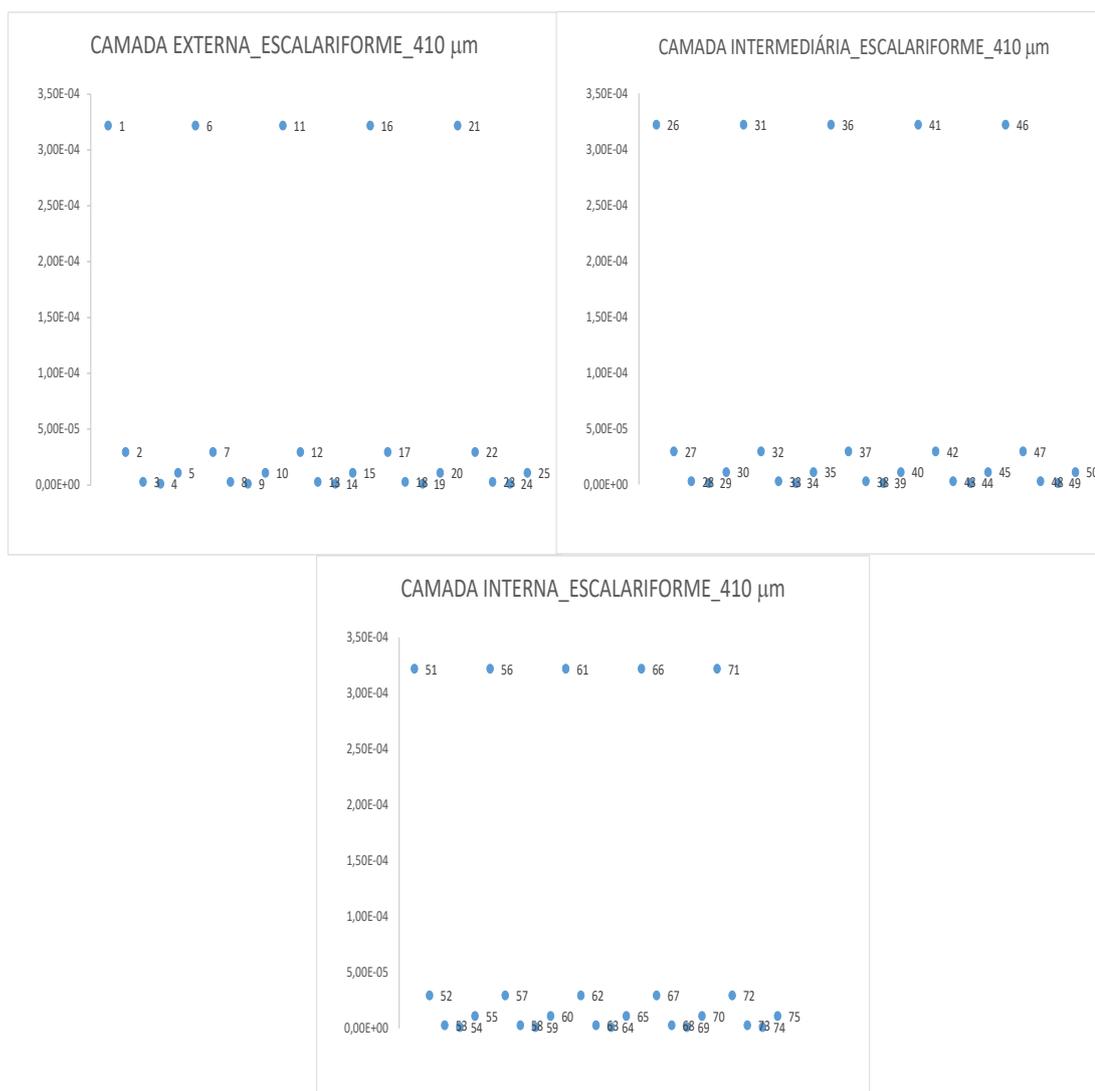


Figura 54. Elementos de vaso de comprimento 410 μm com placa escalariforme. Gráficos de dispersão de volume, m^3 , em função da posição da célula no circuito da completo incluindo as camadas externa, intermediária e interna.

O maior e o menor valor de volume obtido para as células desse circuito foram, respectivamente, $3,22 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ e $1,26 \times 10^{-7} \text{ m}^3$. A soma total do volume das células das camadas externa, intermediária e interna não se diferiram (valor de $1,83 \times 10^{-3} \text{ m}^3$). O valor de armazenamento das células com comprimentos de 410 μm com placa simples foi 5% em média maior que o valor de armazenamento das células com placa escalariforme.

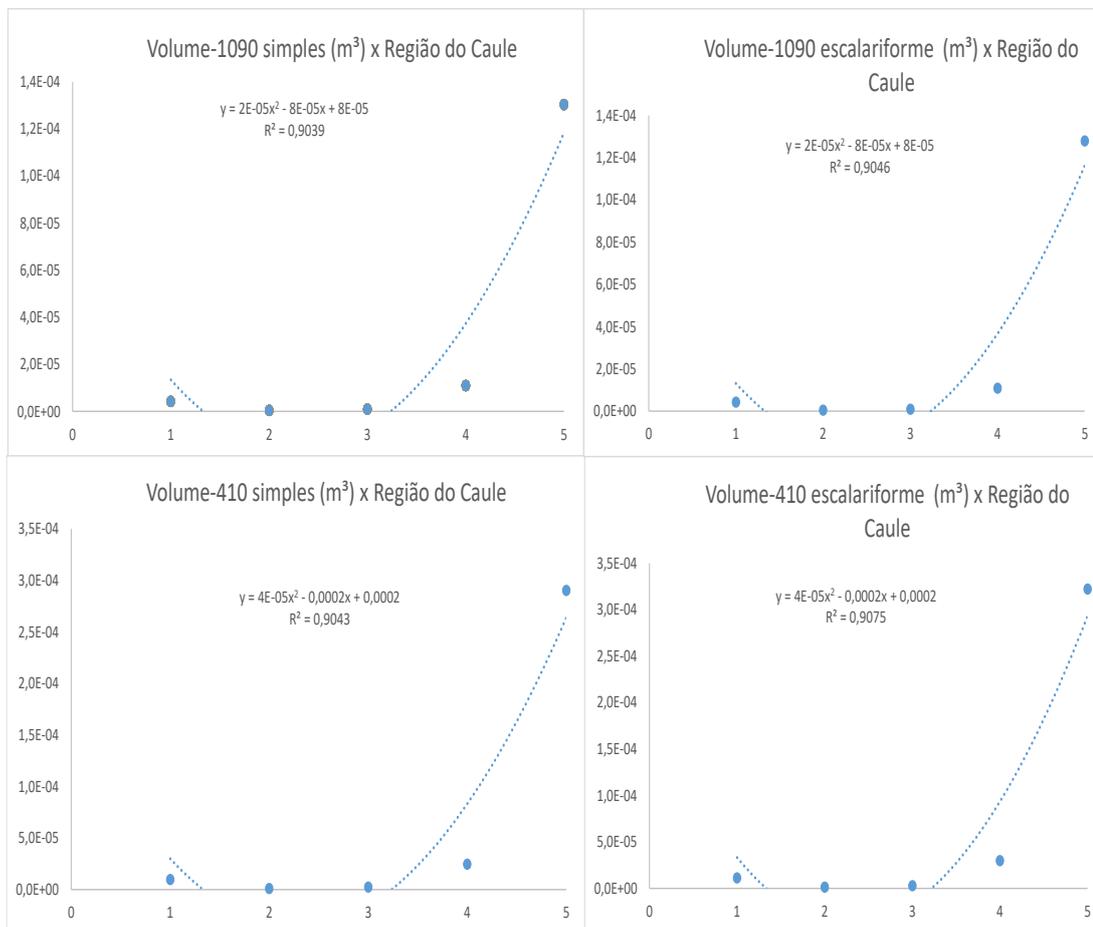


Figura 55. Curvas de crescimento dos valores de armazenamento de água nas células.

O intervalo de 1 a 5 (abscissa) corresponde desde a região do caule mais próxima a raiz (número 1) até à região do caule mais próxima das folhas (número 5), sendo a região intermediária o número 3. Os valores da ordenada correspondem aos valores médios de armazenamento de água (m³) de cada linha.

A curva de crescimento dos valores de armazenamento de água nas células é polinomial (grau 2) para todos os circuitos de elementos de vaso com placas simples e escalariforme (todas as camadas).