

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

ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO CAULE DE *Phaseolus vulgaris* L. COM CAPACITÂNCIA HÍDRICA VARIÁVEL

LUIS PHILIPPE DE ARRUDA LIMA

ORIENTADOR: PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO

Cuiabá, MT

Novembro de 2020

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

ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO CAULE DE *Phaseolus vulgaris* L. COM CAPACITÂNCIA HÍDRICA VARIÁVEL

LUIS PHILIPPE DE ARRUDA LIMA

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

ORIENTADOR: PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO

Cuiabá, MT

Novembro de 2020

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L732a Lima, Luis Philippe de Arruda.
ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO CAULE DE *Phaseolus vulgaris* L. COM CAPACITÂNCIA HÍDRICA VARIÁVEL / Luis Philippe de Arruda Lima. -- 2020
xxii, 75 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Denilton Carlos Gaio.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental, Cuiabá, 2020.
Inclui bibliografia.

1. Capacitor hídrico variável. 2. Modelagem no QUCS. 3.
Dispositivo hídrico do caule. 4. Analogia elétrica de plantas. 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.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO CAULE DE *Phaseolus vulgaris* L. COM CAPACITÂNCIA HÍDRICA VARIÁVEL

AUTOR: DOUTORANDO LUIS PHILIPPE DE ARRUDA LIMA

Tese defendida e aprovada em 11 de novembro de 2020

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio - Orientador – Instituto de Física/UFMT
2. Prof. Dr. Sergio Roberto de Paulo – Examinador Interno – Instituto de Física/UFMT
3. Prof. Dr. Carlos Ralph De Muis – Examinador Interno – Universidade de Cuiabá – UNIC/Cuiabá
4. Prof. Dr. Higo José Dalmagro – Examinador Externo – Universidade de Cuiabá – UNIC/Cuiabá
5. Prof. Dr. Jonathan Willian Zangeski Novais – Examinador Externo – Universidade de Cuiabá – UNIC/Cuiabá

Cuiabá-MT, 11/11/2020



Documento assinado eletronicamente por **Jonathan Willian Zangeski Novais, Usuário Externo**, em 11/11/2020, às 22:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **SERGIO ROBERTO DE PAULO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 11/11/2020, às 22:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLO RALPH DE MUSIS, Usuário Externo**, em 12/11/2020, às 09:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Higo J Dalmagro, Usuário Externo**, em 12/11/2020, às 10:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **DENILTON CARLOS GAIO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 12/11/2020, às 20:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2997121** e o código CRC **FC4DF299**.

Referência: Processo nº 23108.074157/2020-21

SEI nº 2997121

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Suilena e Rogero.
À Kamyla, minha esposa e companheira.
À Silvia, minha irmã.
À Bianca e à Manuela, minhas sobrinhas.*

IN MEMORIAN

*Aos meus avós paternos, Seu Udo e Dona
Nininha, e avós maternos, Seu Pedro e Dona
Maria.*

AGRADECIMENTOS

Nesse período longo de experimentação (coleta de dados) e da elaboração do modelo várias pessoas foram extremamente importantes para que este trabalho pudesse ser realizado da melhor maneira possível e, por isso, merecem o meu agradecimento.

Em especial, agradeço aos meus pais, Suilena e Rogero, pelo amor e carinho, pela demonstração da importância do estudo na vida e por me apresentarem o primeiro livro que aguçou a minha curiosidade em ler (Guia dos Curiosos). Agradeço à minha esposa Kamyra pela nossa cumplicidade, por sempre estar disposta a ajudar, desde uma leitura crítica dos trabalhos até à coleta de dados; pela ajuda nos procedimentos laboratoriais para obtenção dos cortes histológicos do caule e por todo o carinho, toda atenção e todo amor, que é essencial na minha caminhada. Agradeço à minha primeira professora da infância, Silvia, minha irmã, pelo companheirismo e apoio de sempre e ao cunhado Odiley pela torcida e amizade. Agradeço ao Professor Dr. Denilton Gaio, “el maestro”, um amigo que construí na minha caminhada acadêmica; por orquestrar todo o trabalho, da experimentação à modelagem, e por me apresentar a linha de pesquisa de analogia hídrico-elétrica no contínuo SPA, ainda em 2013, quando iniciei a fazer iniciação científica durante a graduação em Física. Agradeço ao mestre Lauro Leocádio (Laurão) pela amizade construída durante esses anos, pelas discussões dos trabalhos, pelas significativas contribuições e por compartilhar boas visões de mundo.

Agradeço a todos os professores do PPFGA que compartilharam conhecimentos e que contribuíram na minha formação. De forma especial, agradeço ao Professor Dr. Sérgio de Paulo, ao Professor Dr. José Nogueira (Paraná) e à Professora Dra. Marta Cristina, pela excelente condução do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental e pela atenção dada em todo esse período. Agradeço ao Professor Dr. Carlo Ralph pelas aulas de estatísticas e inúmeras explicações, pela disponibilidade em ajudar (sempre de prontidão) e pelas excelentes conversas. Agradeço à Professora Luciana Sanches e ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental por ceder o espaço na área de bordadura da Estação Mestre Bombled para realização do experimento. Agradeço ao Cesário pelas boas conversas e pela assistência na secretaria, que, juntamente às contribuições dadas pela Juliana e Soilce, foi essencial em todo o trabalho.

Agradeço à banca examinadora, composta pelos Professores Dr. Sérgio de Paulo, Dr. Carlo Ralph, Dr. Higo Dalmagro e Dr. Jonathan Novais, pelo aceite, pela disposição e pelas contribuições contundentes.

Agradeço aos Senhores Valter e Vanderley pelo espaço e material cedido na área verde do campus para a realização do projeto piloto do experimento e ao Senhor Luisinho pela ajuda na construção das estruturas das mesas, que foram utilizadas no experimento. Agradeço à Mariane Ribeiro (Holly Water) pela participação e contribuição no trabalho. Ao Edney Gomes e à Senhora Zózima Silva, o meu agradecimento pela disposição em ajudar e pela doação das garrafas pet. Pela ajuda imprescindível no dia das medições agradeço à Carolina Moura, à Mariane Moura e ao Lucas Jairo.

Agradeço a todos os meus familiares pelo apoio e pelas manifestações de carinho. Agradeço à senhora Maria da Conceição, ao senhor Geraldo Neto e família, pelo apoio e pela torcida. Agradeço aos meus queridos colegas do PPGFA pela boa convivência durante esses anos.

Agradeço à Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), instituição na qual pude, com imenso prazer, conviver durante boa parte da minha vida, onde pude ampliar meu horizonte de pensamentos científico e social, onde pude construir amizades e aprender a metodologia científica.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, desde uma conversa de incentivo a uma discussão sobre a transformação da planta em circuito elétrico na hora do *coffee break*.

A todos, o meu muito obrigado!!!!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

EPÍGRAFE

*“Nenhuma grande descoberta foi feita
jamais sem um palpite ousado”*

*Isaac Newton
Cientista britânico nascido no século XVII,
uma das maiores mentes de todos os
tempos.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura dos elementos de vaso com diferentes placas de perfuração.	7
Figura 2. Parênquima do xilema.	8
Figura 3. Cavitação em elementos de vaso empilhados (vaso).....	9
Figura 4. Resistores em série.	11
Figura 5. Símbolo representativo do circuito de resistores em série (capsula).....	11
Figura 6. Esquemático da análise paramétrica no QUCS.	12
Figura 7. Modelo hídrico-elétrico de Gaio (2011) para o sistema Solo-Planta-Atmosfera.	12
Figura 8. Circuito do caule.....	13
Figura 9. Esquemático com o dispositivo EDD e suas propriedades.	15
Figura 10. Sistema vaso-tórus (traqueídes).....	17
Figura 11. Circuito hídrico de caule da espécie <i>Tsuga Canadensis</i>	18
Figura 12. Circuito hídrico do elemento de vaso da camada externa, à esquerda, e símbolo representativo, à direita.	19
Figura 13. Circuito hídrico do elemento de vaso da camada intermediária, à esquerda, e símbolo representativo, à direita.	20
Figura 14. Circuito hídrico do elemento de vaso da camada interna, à esquerda, e símbolo representativo, à direita.	20
Figura 15. Conjunto de 5x5 de elementos de vaso representativos da camada externa.	21
Figura 16. Circuito do tecido xilemático de angiospermas, com conexões das camadas externa, intermediária e interna.	23
Figura 17. Lisímetros de pesagem.	25
Figura 18. Mesa A utilizada no experimento.	26
Figura 19. Esquemático do VWC (capacitor hídrico variável) e de suas propriedades.	32
Figura 20. Fontes de tensão alternada e de tensão contínua.	34
Figura 21. Circuito dos elementos de vaso da camada externa (A) e seu símbolo representativo (B).....	35
Figura 22. Circuito dos parênquimas (A) e seu símbolo representativo (B).....	36

Figura 23. Módulo PVS para a camada externa.....	36
Figura 24. Camada externa com módulos PVS.	37
Figura 25. Símbolo representativo da camada externa (camada 1).	38
Figura 26. Circuito dos elementos de vaso das camadas intermediárias (A) e seu símbolo representativo (B).	39
Figura 27. Módulo PVS para a camada intermediária.	39
Figura 28. Camada intermediária com módulos PVS.	40
Figura 29. Símbolo representativo da camada intermediária (camada 2).	41
Figura 30. Circuito dos elementos de vaso da camada interna (A) e seu símbolo representativo (B).	42
Figura 31. Módulo PVS para a camada interna.	42
Figura 32. Camada interna com módulos PVS.	43
Figura 33. Símbolo representativo da camada interna (camada 3).	44
Figura 34. Resistor intercamadas (A) e seu símbolo representativo (B).	45
Figura 35. Circuito para simulação do fluxo hídrico volumétrico no caule de planta de feijão	46
Figura 36. Esquemático com o circuito geral dos elementos de vaso (A) e a partição dos valores de resistências sobre o valor total (B).	48
Figura 37. Déficit de pressão de vapor no dia 20 de abril de 2018, das 8 às 16 horas, em Cuiabá-MT.	50
Figura 38. Potencial hídrico do ar no dia 20 de abril de 2018, das 8 às 16 horas, em Cuiabá-MT.	51
Figura 39. Valores máximos de taxa de transpiração x θ_{solo}	52
Figura 40. Seção transversal de elementos de vaso do caule de uma planta de feijão (corte transversal).	53
Figura 41. Curva entre quantidade de água no caule (m^3) e potencial hídrico do solo (MPa).	55
Figura 42. Circuito PVS para simulação da capacitância variável em função da variação do potencial hídrico.	56
Figura 43. Capacitância hídrica em função da variação do potencial no xilema do caule de plantas de feijão, durante 24 horas (86 400 segundos).	58

Figura 44. Correlação entre os dados de fluxo hídrico volumétrico experimental e fluxo hídrico volumétrico <i>in silico</i> (simulados no QUCS), em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	60
Figura 45. Tendência de queda do fluxo hídrico volumétrico conforme a diminuição da PLC.....	61
Figura 46. Tendência de queda do fluxo hídrico volumétrico conforme a diminuição da PLC.....	61
Figura 47. Caminho 1 para o fluxo hídrico na camada externa.	64
Figura 48. Caminho 2 para o fluxo hídrico na camada externa.	65
Figura 49. Caminho 3 para o fluxo hídrico na camada externa.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Analogia entre grandezas elétricas e hídricas.....	10
Tabela 2. Valores de quantidade de água no solo e tratamentos correspondentes....	26
Tabela 3. Quantidade de água no caule, por grupo, em cm ³	54
Tabela 4. Relação entre o índice de ligados e a perda de condutividade hidráulica...60	
Tabela 5. Desvio absoluto entre os fluxos simulados no caminho 1, caminho 2 e caminho 3, para cada perda de condutividade hidráulica (PLC), referente ao caule da planta A1,1.	62
Tabela 6. Desvio absoluto entre os fluxos simulados no caminho 1, caminho 2 e caminho 3, para cada perda de condutividade hidráulica (PLC), referente ao caule da planta A5,10.	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Fases vegetativa e reprodutiva em um ciclo de cultivo de feijoeiro comum.....	16
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

SPA	Contínuo Solo-Planta-Atmosfera
QUCS	<i>Quite Universal Circuit Simulation</i> (Simulador de Circuito Totalmente Universal)
EDD	<i>Equation Defined Device</i> (Dispositivo Definido por Equação)
EPMA	Erro Percentual Médio Absoluto
EMA	Erro Médio Absoluto
ψ	Potencial hídrico da água
ψ_s	Potencial hídrico de soluto
ψ_p	Potencial hídrico de pressão
ψ_g	Potencial hídrico gravitacional
ψ_m	Potencial hídrico matricial
μ	Potencial químico da água no estado considerado
μ_0	Potencial químico da água à altura de referência
V_m	Volume parcial molar de água pura
VT	Sistema vaso-tórus
C^j	Capacitância total
M	Massa molar da água
g	Campo gravitacional da terra
z	Altura a partir de uma altura de referência
z_0	Altura de referência
R	Constante dos gases
T	Temperatura em Kelvin
C	Concentração de solutos
θ_{solo}	Quantidade de água no solo
DPV	Déficit de Pressão de Vapor
ψ_{ar}	Potencial hídrico do ar
VWC	<i>Variable Water Capacitor</i> (Capacitor hídrico variável)
PLC	Porcentagem de perda de condutividade hidráulica
R_D	Resistência de descarregamento
$\Delta\psi_{xrf}$	Diferença de potencial hídrico entre xilema da raiz e da folha

RESUMO

LIMA, L.P.A.; **Análogo hídrico-elétrico do caule de *Phaseolus vulgaris* L. com capacitância hídrica variável.** Cuiabá. 2020. 97 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

No contexto da analogia hídrico-elétrica, as capacitâncias hídricas são tratadas como constantes em todo o contínuo Solo-Planta-Atmosfera (SPA). Em especial, sobre o caule, resultados de estudos experimentais que investigaram a dinâmica de armazenamento de água indicam que há variações em relação ao tempo nesse estoque e no potencial hídrico do xilema, o que pode vir a influenciar nos valores finais de capacitância. Dessa forma, com intuito de aprimorar o desempenho dos análogos hídrico-elétricos, este trabalho teve como objetivo desenvolver em ambiente QUCS (Simulador de Circuito Totalmente Universal) um circuito elétrico análogo à capacitância hídrica variável do caule de *Phaseolus vulgaris* L. Para isso, utilizou-se um dispositivo não linear definido por equação (EDD), no qual o volume foi expandido por uma função polinomial e a capacitância foi definida como uma função da variação do potencial hídrico no caule. Para calibração do modelo desenvolveu-se um experimento com lisímetros de pesagem adaptados para plantas de pequeno porte com intuito de obter dados de fluxo hídrico volumétrico e de quantidade de água armazenada no caule de plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Para o desenvolvimento do modelo foram construídos 3 diferentes cenários *in silico* com módulos denominados PVS (Sistema Elemento de Vaso-Parênquima); o 1º, para a simulação da capacitância hídrica variável; o 2º, para a simulação do fluxo hídrico volumétrico; o 3º, para a simulação e avaliação da cavitação. Obteve-se um comportamento oscilatório para a capacitância hídrica do caule, que para a planta pode ser um dos reflexos da variação do diâmetro do caule, que está relacionada com as diferenças entre as taxas de transpiração e de absorção de água pela raiz. Para o fluxo hídrico volumétrico, verificou-se uma alta correlação entre os dados simulados e experimentais (ρ de Spearman igual a 0,99), com 17% de erro percentual médio absoluto (EPMA) e $8,75 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de erro médio absoluto (EMA). Quanto à análise da cavitação, para um mesmo valor de PLC (perda de condutividade hidráulica do xilema), os diferentes caminhos de passagem de água interferiram os valores finais dos

fluxos, o que pode significar uma dependência entre o fluxo hídrico no xilema com a geometria da rota de água decorrente das embolias nas células. Os resultados obtidos neste trabalho se assemelham com os obtidos pela literatura e potencializam a utilização da modelagem análoga hídrico-elétrica como uma técnica eficiente no estudo da dinâmica hídrica no caule.

Palavras-chave: Capacitor hídrico variável; Modelagem no QUCS; Dispositivo hídrico do caule; Analogia elétrica de plantas.

ABSTRACT

LIMA, L.P.A.; **Hydric-electric analog of the stem of *Phaseolus vulgaris* L. with variable hydric capacitance.** Cuiabá. 2020. 97 f. Thesis (Doctorate degree in Environmental Physics), Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

In the context of the hydric-electric analogy, hydric capacitances are treated as constant throughout the soil-plant-atmosphere continuum (SPAC). In particular, on the stem, results from experimental studies that investigated the water storage dynamics indicate that there are variations in time in this stock and in the xylem water potential, which may influence the final capacitance values. Thus, in order to improve the performance of the hydric-electric analogues, this work had the objective of developing an electric circuit analogous to the variable hydric capacitance of the stem of *Phaseolus vulgaris* L. in the software QUCS (Quit Universal Circuit Simulator). For this, a non-linear device defined by equation (EDD) was used, in which the volume was expanded by a polynomial function and the capacitance defined as a function of the hydric potential variation in the stem. To calibrate the model, an experiment with weighing lysimeters adapted to small plants was developed to obtain volumetric flow data and amount of water stored in the bean stem (*Phaseolus vulgaris* L.). For the development of the model 3 different *in silico* scenarios were built with modules called PVS (Parenchyma-Vessel Element System); the first, for the simulation of variable hydric capacitance; the second, for simulate the volumetric flow of water; the third, for simulation and evaluation of cavitation. Oscillatory behavior was obtained for stem hydric capacitance, which for the plant may be one of the reflexes of stem diameter variation, which is related to the differences between transpiration and absorption rates of water at the root. For volumetric water flow, there was a high correlation between simulated and experimental data (Spearman's correlation = 0.99), with a mean absolute percentage error of 17% (MAPE) and a mean absolute error of $8.75 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (MAE). As for the cavitation analysis, for one same PLC value (Percentage Loss in Conductivity) the different water crossing paths interfered the final values of the flows, which may mean a dependence between the water flow in the xylem and geometry of the water pathway due to cell embolism. The results obtained in this work are similar to those obtained in the literature and potentiate the use of hydric-electric modeling as an efficient technique in the study on stem hydric dynamics.

Keywords: Variable hydric capacitor; Modeling in QUCS; Stem hydric device; Electrical analog of plants.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Problemática	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos.....	3
2. Revisão bibliográfica	4
2.1 Movimento da água no contínuo Solo-Planta-Atmosfera (SPA).....	4
2.1.1 Potencial Hídrico	4
Potencial de soluto ψ_s	4
Potencial de pressão ψ_p	5
Potencial gravitacional ψ_g	5
Potencial matricial ψ_m	5
2.1.2 Tecido xilemático	6
Cavitação.....	8
2.2 Leis Análogas	9
2.3 Software de simulação de circuitos	10
2.4 Circuito básico do caule.....	12
2.5 Capacitância hídrica variável.....	13
2.6 Característica do feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	15
2.7 Trabalhos desenvolvidos anteriormente	16
Circuito do caule de coníferas.....	16
Circuito do caule de angiospermas	19
3. Material e métodos	24
3.1 Dados experimentais.....	24
Tratamentos (Quantidade de água no solo, θ_{solo}).....	26

Medições e ensaios destrutivos	27
Diâmetros de elementos de vaso do xilema	28
Comportamento das variáveis meteorológicas	28
3.1.1 Análise estatística dos dados experimentais.....	29
3.2 Modelagem no Qucs	30
3.3 Capacitor hídrico variável.....	30
Coeficientes de ajuste da expressão	32
Cálculo das resistências	33
Fonte de tensão e simulação	34
3.4 Fluxo hídrico volumétrico <i>in silico</i> no caule	34
Valores de resistências hídricas	47
Validação estatística do modelo.....	48
Cavitação.....	49
4. Resultados.....	50
4.1 Dados experimentais.....	50
Caracterização das variáveis meteorológicas.....	50
Transpiração.....	51
Diâmetros de elementos de vaso	52
Quantidade de água armazenada no caule	53
4.2 Capacitância hídrica variável.....	54
4.3 Fluxo hídrico volumétrico <i>in silico</i>	59
4.4 Cavitação <i>in silico</i>	60
5. Conclusão.....	67
6. Referências bibliográficas.....	70

1. Introdução

1.1 Problemática

Com a utilização da analogia hídrico-elétrica em softwares de simuladores de circuitos, que são asseguradas pelas leis de Kirchhoff Análogas (GAIO, 2011), é possível modelar a dinâmica hídrica no xilema considerando as funções, a anatomia das células e os fenômenos ocorrentes nesse tecido (modelagem *in silico*¹). Nessa linha de pesquisa o caule tem sido tratado como dispositivos hídricos formados com capacitores lineares, sem a consideração da influência das variações do estoque de água e do potencial hídrico no xilema nos valores de suas capacitâncias. No entanto, a ocorrência dessas variações em relação ao tempo é observada experimentalmente, sendo então comum na realidade da planta, e isso não pode ser modelado com capacitâncias constantes.

Para calibração e validação de modelos ambientais fazem-se necessários dados experimentais. No caso deste estudo de modelagem hídrico-elétrica do caule, dados relativos ao fluxo hídrico de plantas vasculares. Normalmente, na literatura, não se tem registros de amplos conjuntos de informações hídricas que possam ser aplicados no contexto da analogia hídrico-elétrica, tão pouco sobre espécies típicas de biomas brasileiros ou que apresentem relevância no cenário nacional. Encontram-se, com mais facilidade, dados experimentais sobre resistências e capacitâncias hídricas de caules de plantas genéricas ou típicas do hemisfério norte, como de espécies pertencentes ao grupo das coníferas (ELLERBY e ENNOS, 1998; LANCASHIRE et al., 2002). No entanto, nos últimos 5 anos, o grupo de pesquisadores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental² dedicou-se em um experimento para obter um conjunto de informações sobre fluxo e armazenamento hídrico em espécies de plantas importantes no cotidiano brasileiro.

Esse experimento está sendo realizado na estação meteorológica “Mestre Bomble”, pertencente à Universidade Federal de Mato Grosso, e trata-se da aplicação

¹ Modelagem *in silico* é caracterizada por ser a modelagem de processos naturais, ou laboratoriais, em softwares computacionais.

² Este grupo de pesquisa, do qual faço parte, analisa a dinâmica hídrica e o fluxo de calor no sistema Solo-Planta-Atmosfera com a utilização de software de simulação de circuitos elétricos.

da técnica de lisimetria para obtenção de dados experimentais sobre informações hídricas de caules de plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

1.2 Justificativa

A motivação deste estudo está no desafio de se utilizar componentes elétricos que permitam a modelagem de um capacitor variável. Esse componente é um dispositivo definido por equação em que a capacitância é definida como uma função explícita da variação de potencial hídrico no caule, desenvolvido em ambiente QUCS (Simulador de Circuito Totalmente Universal). Optou-se por cultivar feijão para obter dados de calibração do modelo pelo fato principal de a espécie apresentar um ciclo que permite análises em curto período, além da grande importância socioeconômica que o grão apresenta e por ser uma planta de pequeno porte, o que permite o cultivo de grande número de amostras.

O trabalho se faz possível porque a relação entre potencial hídrico e fluxo hídrico obedece à mesma formalidade da relação entre potencial elétrico e corrente elétrica. São as leis mais gerais da Física (de conservação – simetria) que dão suporte a essa analogia. A importância deste trabalho está na possibilidade de sofisticação do dispositivo hídrico do caule visando ampliar a eficácia e o aprimoramento dos modelos análogos hídrico-elétricos, adotando e criando dispositivos hídricos que apresentem propriedades semelhantes às características da planta. Esta tese de doutoramento vem dar continuidade a essa linha de estudos iniciada, de modo geral, por Gaio (2011) e, posteriormente, aplicada em gimnospermas, em meu TCC (LIMA, 2015) e, por fim, aplicada em angiospermas com a construção de malha tridimensional de células, em minha dissertação (LIMA, 2017)³.

Além disso, com o acoplamento dos esquemas desenvolvimentos no software QUCS, espera-se que futuramente haja a possibilidade da construção de uma planta eletrônica, considerando também o circuito proposto neste estudo. Essa planta eletrônica pode representar uma gama de possibilidades em torno de temas sobre utilização de água, uma vez que, neste momento, há uma crescente preocupação com

³ Na seção 2.7, o Trabalho de Conclusão de Curso (LIMA, 2015) e a Dissertação (LIMA, 2017) serão resumidamente descritos.

o uso consciente dos recursos hídricos. Entender o fluxo hídrico em plantas é fundamental visto que está inserido no ciclo hidrológico.

1.3 Objetivos

Com base nesse contexto, este trabalho teve como objetivo geral construir um modelo análogo hídrico-elétrico do caule de *Phaseolus vulgaris* L. com capacitância hídrica variável, em ambiente QUCS. De modo a satisfazer o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram cumpridos:

- a) construir o experimento para obtenção de dados de fluxo e de armazenamento hídrico em caules de plantas de feijão;
- b) medir os dados de transpiração e de quantidade de água no caule;
- c) desenvolver o modelo análogo hídrico-elétrico do caule com capacitância hídrica variável no software QUCS (modelo *in silico*);
- d) calibrar o modelo com dados experimentais;
- e) simular a capacitância hídrica variável em função da variação do potencial hídrico no xilema;
- f) simular o fluxo hídrico volumétrico nas plantas de feijão e validar o modelo;
- g) simular e avaliar a cavitação hídrica.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Movimento da água no contínuo Solo-Planta-Atmosfera (SPA)

2.1.1 Potencial Hídrico

A dinâmica hídrica nas plantas depende diretamente da existência de diferenças não nulas de potenciais hídricos (ψ) em suas estruturas. Ou seja, um gradiente de potencial hídrico deve existir para que, pelas raízes das plantas, o processo de sucção de água do solo possa começar. O Potencial Hídrico em um ponto (ψ) é definido como a razão entre o potencial químico da água nesse ponto (μ)—contado a partir do potencial químico da água pura a altura de referência (μ_0)—e o volume parcial molar de água pura (V_m), conforme a Equação 1.

$$\psi = \frac{\mu - \mu_0}{V_m} \quad \text{Equação 1}$$

O potencial químico da água é uma expressão da energia livre a ela associada (TAIZ et al., 2017). No sistema, a direção de movimento da água acontece a partir dos locais onde se tem os maiores potenciais hídricos para os locais de menores potenciais hídricos, representando, assim, o status de água no contínuo Solo-Planta-Atmosfera (LAMBERS, 2008; BARBOSA, 2017).

A energia livre da água pode ser reduzida ou aumentada, principalmente, pela concentração de materiais dissolvidos (efeito do soluto na água), pela pressão hidrostática que a água exerce sobre o sistema, pela ação gravidade e pela adsorção da água às paredes celulares. Assim, o potencial hídrico pode ser descrito pelo somatório das componentes: potencial de soluto (ψ_s), potencial de pressão (ψ_p), potencial gravitacional (ψ_g) e potencial matricial (ψ_m), conforme a Equação 2.

$$\psi = \psi_s + \psi_p + \psi_g + \psi_m \quad \text{Equação 2}$$

Potencial de soluto (ψ_s)

Devido ao efeito da entropia, quanto maior for a quantidade de soluto dissolvido na água, maior será a diminuição de sua energia livre. Assim, a sua capacidade de realização de trabalho também será diminuída (SALISBURY e ROSS,

2013). Por isso, o potencial osmótico sempre será negativo (BARBOSA, 2017) e pode ser estimado pela equação de Van't Hoff (Equação 3). O potencial de soluto, nesta equação, é definido como o produto entre a constante dos gases (R), cujo valor é de $8,32 \text{ mol K}^{-1} \text{ L}^{-1}$, a temperatura absoluta do sistema (T), em K, e a concentração de solutos (C), em mol L^{-1} .

$$\psi_s = -RTC \quad \text{Equação 3}$$

Potencial de pressão (ψ_p)

A contribuição do potencial de pressão ao somatório dos componentes do potencial hídrico (Equação 1) pode ser negativa ou positiva. Pode existir potencial hídrico de pressão positivo no interior das células vivas. Quando há hidratação do protoplasto, ele é empurrado contra as paredes celulares, que resiste ao estiramento mecânico (pressão de turgor). As pressões negativas acontecem no xilema, por exemplo, no processo de transpiração: a atmosfera exerce sucção sobre os estômatos das folhas, o que acarreta a formação de uma coluna contínua de água em todo vegetal (tensão).

Potencial gravitacional (ψ_g)

O potencial gravitacional tem maior influência no deslocamento de água em vegetais de grandes portes, por isso, geralmente, o termo ψ_g pode ser desprezado. O potencial gravitacional cresce $0,0098 \text{ MPa}$ por metro de ascensão vertical e é expresso como a energia potencial gravitacional por unidade de volume molal da água pura (NOBEL, 2009), conforme a Equação 4.

$$\psi_g = \frac{Mgz}{V_m} \quad \text{Equação 4}$$

Nessa equação, M é a massa molar da água, g é o campo gravitacional da Terra, z é a altura a partir de uma altura de referência z_0 .

Potencial matricial (ψ_m)

No transporte de água, em especial, nos tecidos xilemáticos, devido à polaridade, a água é adsorvida às paredes celulares. Essa atração entre as moléculas

faz com que haja redução na energia livre da água e, conseqüentemente, no potencial hídrico. Por isso, o potencial matricial é geralmente negativo (LACERDA, 2007). Além das células do xilema, pode-se ter adsorção da água a outras superfícies sólidas, por exemplo, a partículas do solo e a macromoléculas coloidais (LACERDA, 2007; LAMBERS, 2008).

2.1.2 Tecido xilemático

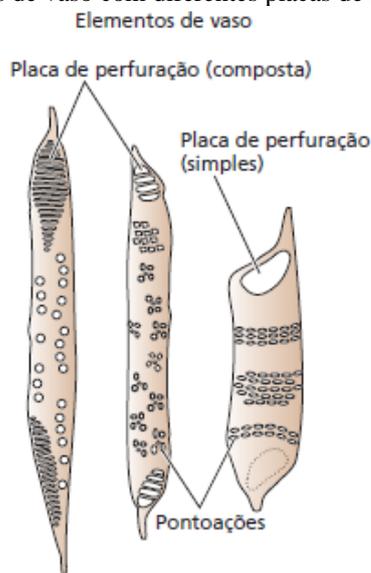
A teoria da tensão-coesão-adesão, inicialmente desenvolvida por Dixon e Joly (1894), descreve o movimento de ascensão da água nos tecidos condutores de plantas vasculares. Devido ao fenômeno da transpiração estomática, a água é submetida a uma forte tensão. Devido às pontes de hidrogênio, que mantém unidas as moléculas de água, forma-se uma coluna contínua que se estende por toda a planta. O transporte de água da raiz até a copa dos vegetais se dá através de finas células tubulares. O conjunto complexo dessas células tubulares forma o xilema que, além do transporte hídrico de longa distância, apresenta funções de armazenamento de água e de suporte mecânico à planta (PRATT et al., 2007).

As células xilemáticas condutoras de água, traqueídes e elementos de vaso, são células mortas e possuem anatomia especializada para o transporte hídrico. As traqueídes são células condutoras mais primitivas e podem ser encontradas tanto em gimnospermas como em algumas angiospermas⁴, são alongadas, ocas, e com as extremidades mais estreitas que o centro (fusiformes). As pontuações laterais, que são regiões sem parede secundária (Figura 1), permitem a passagem de água e, quando duas pontuações estão adjacentes, formam os pares de pontuações, que são regiões de menores resistências ao fluxo (TAIZ et al., 2017). Os elementos de vaso são células típicas de angiospermas e possuem características anatômicas diferentes das traqueídes. Costumam ser mais curtos e mais largos que as células primitivas e permitem a passagem de água pelas extremidades, além das pontuações laterais (TAIZ et al., 2017).

⁴ As gimnospermas são vegetais que não possuem frutos, diferentemente das angiospermas que apresentam flores, frutos e sementes (NOGUEIRA, 2012). As gimnospermas e as angiospermas também são conhecidas como plantas superiores.

Originadas em processos de dissolução da parede terminal dos elementos de vaso, as placas de perfuração podem ser do tipo simples ou composta (Figura 1). As primeiras estão presentes na maioria dos vegetais, em quase 80% das espécies de grande porte (WHEELER, 1986). Entre as compostas, está a escalariforme que apresenta forma de degraus (JUDD et al., 2009). Em especial, considerar a anatomia dessas células no contexto da modelagem hídrico-elétrica do xilema significa, principalmente, associá-las aos diferentes valores de resistências hídricas no circuito, devido à possibilidade de diferentes caminhos que a água pode percorrer no tecido.

Figura 1. Estrutura dos elementos de vaso com diferentes placas de perfuração.



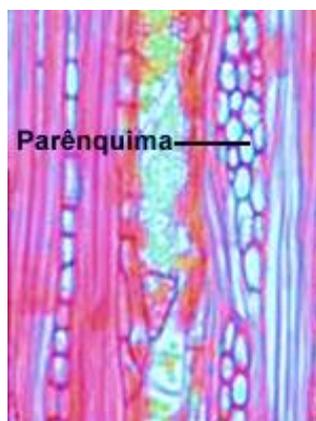
Elementos de vaso com placas de perfuração composta (lado esquerdo) e simples (lado direito). Além das pontoações, as placas de perfuração são regiões de abertura que permitem ascensão do fluxo, sendo uma rota de menor resistência que as pontoações.

Fonte: Taiz et al. (2017).

As células parenquimáticas estão envolvidas no processo de armazenamento de água e substâncias (Figura 2), podendo assessorar na emissão de água ao interior das células condutoras de água quando essas sofrem lesões, por exemplo⁵. O estoque de água nos tecidos é um fator que pode contribuir na relação hídrica da planta, bem como na regulação da transpiração estomática (MEINZER et al., 2008; DINIZ, 2009).

⁵ As informações sobre o parênquima do xilema também estão disponíveis em: http://www.anatomiavegetal.ib.ufu.br/Xilema_texto.htm.

Figura 2. Parênquima do xilema.



Fonte: <http://www.inea.uva.br/servi%C3%A7os/histologia/%20xilema.htm>.

Na analogia hídrico-elétrica, o volume de água armazenado que pode ser descarregado dos tecidos submetidos a uma diferença unitária de potencial hídrico entre dois pontos do sistema nos dá a capacitância hídrica do circuito. Na seção 2.2, serão descritas, de forma mais detalhada, as relações analógicas entre as grandezas elétricas e hídricas adotadas neste trabalho.

Presente também no xilema, as fibras são as células alongadas e resistentes que apresentam função de suporte mecânico à planta (TAIZ et al., 2017). No entanto, neste trabalho, consideraram-se somente as funções de condução e armazenamento de água. Também, não foram consideradas as diferenças entre as anatomias específicas do xilema primário e secundário.

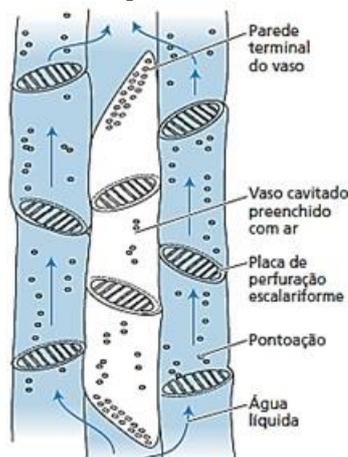
Cavitação

Por estar em um estado metaestável⁶, a água, dentro dos tecidos xilemáticos, está propensa ao fenômeno de cavitação (NARDINI et al., 2011). Podendo ser uma consequência dos estresses causados por seca ou pela baixa disponibilidade de água no solo (LI et al., 2009; CHOAT et al., 2012), a cavitação pode levar à formação de bolhas (Figura 3) e, conseqüentemente, à obstrução dos vasos, impedindo a ascensão de água (TAIZ et al., 2017). Quando isso acontece, há redução da condutância

⁶ Diz-se que o estado de um sistema é metaestável quando ele está em qualquer estado diferente do estado de equilíbrio mais estável.

hidráulica do xilema, o que pode levar ao fechamento estomático parcial ou total e à redução da atividade fotossintética (BRODRIBB, 2009).

Figura 3. Cavitação em elementos de vaso empilhados (vaso).



Quando há embolia, isto é, formação de bolhas em uma das células que está interconectada com uma série de outras células adjacentes, a água pode desviar do elemento de vaso embolizado e seguir nova rota. Os pequenos diâmetros das pontoações ajudam no impedimento da propagação da bolha.

Fonte: adaptado de Taiz et al. (2017).

Nos análogos hídrico-elétricos, a obstrução dos vasos vem sendo modelada como a ruptura dos fios entre os circuitos representativos das células, sendo, assim, uma técnica não invasiva para estudo desse fenômeno (conforme a Seção 2.7).

2.2 Leis Análogas

De mesma forma que a resistência elétrica é definida pela lei de Ohm, em circuitos elétricos com um único resistor, a lei de Ohm análoga (GRADMANN, 1928; VAN DEN HONERT, 1948) estabelece de forma simplificada que a razão entre a diferença de potencial hídrico entre dois pontos e o fluxo hídrico é a resistência do condutor hídrico, sem considerar o armazenamento.

Quando se trata de circuitos hídricos complexos formados por resistores e capacitores hídricos, por exemplo, as leis análogas de Kirchhoff permitem a análise do circuito, ao gerar um sistema de equações a ser resolvido (GAIO, 2011). A lei análoga das malhas diz que, em um circuito fechado, a diferença de potencial hídrico é nula; por fim, a lei análoga dos nós diz que há conservação de volume em quaisquer pontos do circuito (GAIO, 2011). De qualquer modo, a analogia é assegurada pelas leis de conservação de energia e de carga (circuito elétrico) e, analogamente, de energia e

volume (circuito hídrico). A partir dessas grandezas, faz-se possível estabelecer relações entre outras grandezas do circuito, como o realizado por Molz e Ferrier (1982) e Hunt Jr (1991), conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Analogia entre grandezas elétricas e hídricas.

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

Tipicamente, nesse contexto, a unidade para expressar o potencial hídrico é o MPa, devido à unidade Pa ser pequena em se tratando do estado do fluxo hídrico nos vegetais (HUNT JR, 1991).

Fonte: adaptado de Hunt Jr (1991).

2.3 Software de simulação de circuitos

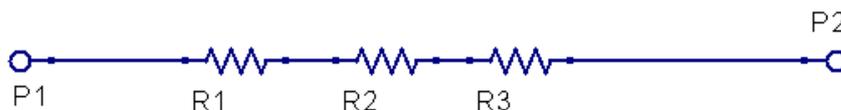
Os simuladores de circuitos oferecem boa quantidade de dispositivos e permitem a utilização dos mesmos em diferentes arranjos, possibilitando o cálculo de diversas propriedades presentes nos circuitos. Nesse contexto, destaca-se o Simulador de Circuitos Totalmente Universal- QUCS, do inglês “*Quite Universal Circuit Simulator*”. Em desenvolvimento desde 2004 (SCORDILIS et al., 2007), o QUCS é um software com Licença Pública Geral (GNU GPL) e disponibiliza uma gama de dispositivos lineares e não-lineares para simulações de diversos tipos, como as de regimes de fluxo contínuo e transiente⁷, por exemplo.

Além disso, o software permite o encapsulamento de circuitos por meio de símbolos representativos. Essa característica é fundamental na modelagem do SPA, pois facilita a simulação de um grande número de circuitos que podem representar uma comunidade de plantas (PEREIRA, 2016) ou uma comunidade de células, como os análogos elétricos à dinâmica hídrica nos tecidos xilemáticos, que é o tema tratado

⁷ Contínuo é o regime em que não há variação do fluxo hídrico, em relação ao tempo, para qualquer ponto do circuito. Transiente é o regime em que o sistema tende a um valor constante do fluxo (regime contínuo), mas que ainda não o alcançou, por exemplo, nos casos de carga ou descarga de capacitores.

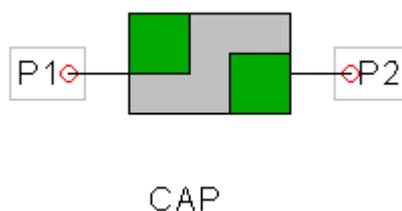
neste trabalho. Como exemplo, na Figura 4, tem-se um circuito de resistores em série com duas portas de conexões. O uso de seu símbolo (Figura 5) permite simplificar a representação, sem perda das características do circuito.

Figura 4. Resistores em série.



As portas de conexão P1 e P2 permitem a conexão com outros circuitos ou dispositivos.

Figura 5. Símbolo representativo do circuito de resistores em série (cápsula).

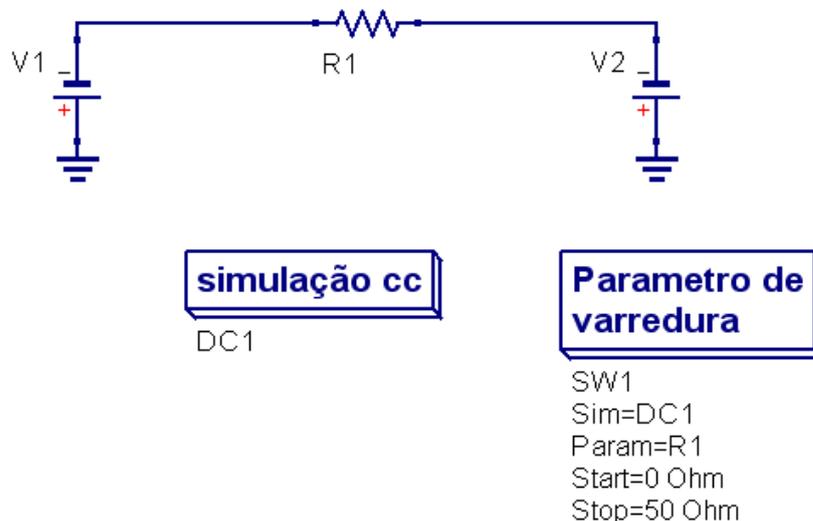


As portas de conexão P1 e P2 permitem a conexão com outros circuitos ou dispositivos.

Além da gama de dispositivos ofertados, o QUCS obtém as soluções das equações diferenciais que resolvem o circuito proposto, informando, assim, valores de variáveis do circuito, como a corrente elétrica, por exemplo. Nesse sentido, a utilização do QUCS no cálculo do fluxo hídrico de várias partes do SPA foi feita primeiramente por Gaio (2011) e, posteriormente, por Pereira (2013; 2016) e Siqueira (2014).

Além das simulações citadas, outra importante simulação disponibilizada pelo QUCS é a análise paramétrica (varredura de parâmetro), que pode realizar verificação do comportamento de algum parâmetro do circuito. Como exemplo, na Figura 6, tem-se um esquemático do QUCS no qual está sendo realizado uma varredura da resistência imposta pelo resistor R1 (de 0 a 50 ohm). Conforme Bonfim (2009), para realizar a “varredura de parâmetro” deve-se primeiro definir o tipo de simulação e, posteriormente, definir o parâmetro desejado, os valores iniciais e finais, o número de passos da varredura ou o número de pontos (Figura 6).

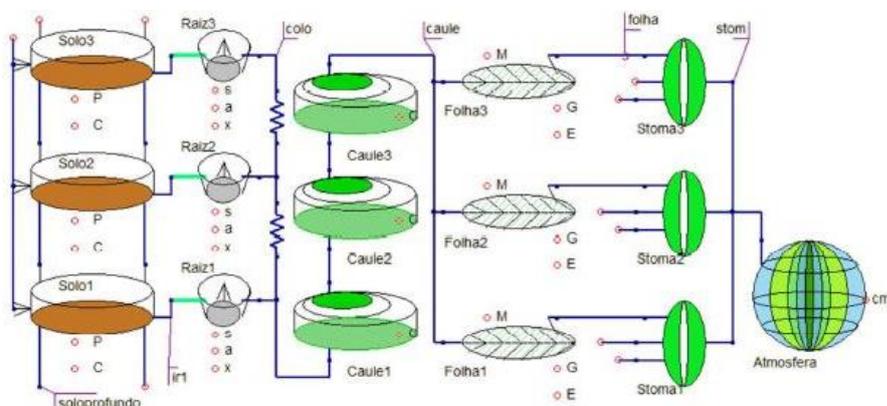
Figura 6. Esquemático da análise paramétrica no QUCS.



2.4 Circuito básico do caule

O caule já foi modelado como um único resistor (EWERS e CRUIZIAT, 1990; TYREE e EWERS, 1991). No entanto, a característica de armazenamento de água implica na existência de capacitor, como nos modelos de Lang et al. (1969), Johnsson e Prytz (2002) e Nobel (2009). Gaio (2011) modelou o sistema SPA com três módulos dos circuitos do caule (Figura 7).

Figura 7. Modelo hídrico-elétrico de Gaio (2011) para o sistema Solo-Planta-Atmosfera.

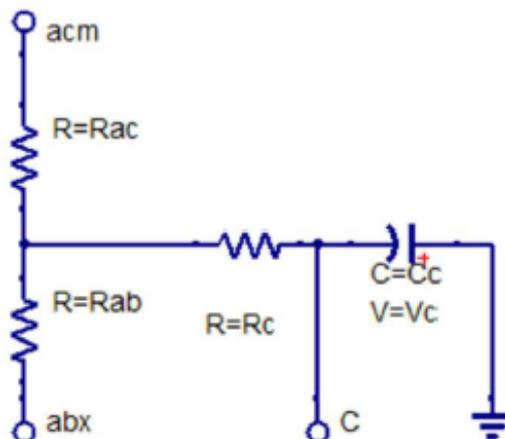


Gaio (2011) modelou o sistema SPA com 3 módulos de solo, raiz, caule, folha e estômato e 1 módulo de atmosfera. Cada símbolo representativo representa um módulo.

Fonte: Gaio (2011).

Cada módulo do caule, cujo símbolo representativo está na Figura 7, refere-se a um circuito dessa parte da planta (Figura 8).

Figura 8. Circuito do caule.



Os resistores R_{ac} e R_{ab} representam, respectivamente, a resistência de entrada e saída do caule, o resistor R_c está associado ao descarregamento do capacitor C_c (armazenamento) e, por fim, a porta C é a sonda do capacitor, que permite medir o potencial no terminal do dispositivo.

Fonte: Gaio (2011).

Nesse circuito, os resistores R_{ab} e R_{ac} impõem resistências ao fluxo de entrada e saída para outro módulo de caule, conectados pelas portas abx e acm . Associada à capacitância do capacitor C_c , está a resistência de descarregamento (resistor R_c), que apresenta valor de 20% da resistência total do caule, conforme a relação proposta por Nobel (2009). Gaio (2011) calculou as resistências e a capacitância por meio das soluções das equações diferenciais obtidas com aplicação das leis análogas de Kirchhoff no circuito, considerando também os valores constantes de potencial hídrico estimados por Nobel (2009).

2.5 Capacitância hídrica variável

Pode haver armazenamento de água em várias partes das plantas. Em especial, no caule, considerando um arranjo em paralelo para o caminho do fluxo hídrico, a capacitância total (C) pode ser obtida pela soma das capacitâncias de cada parte do circuito (C^i), conforme a Equação 5, proposta por Nobel (2009).

$$C = \sum C^i \quad \text{Equação 5}$$

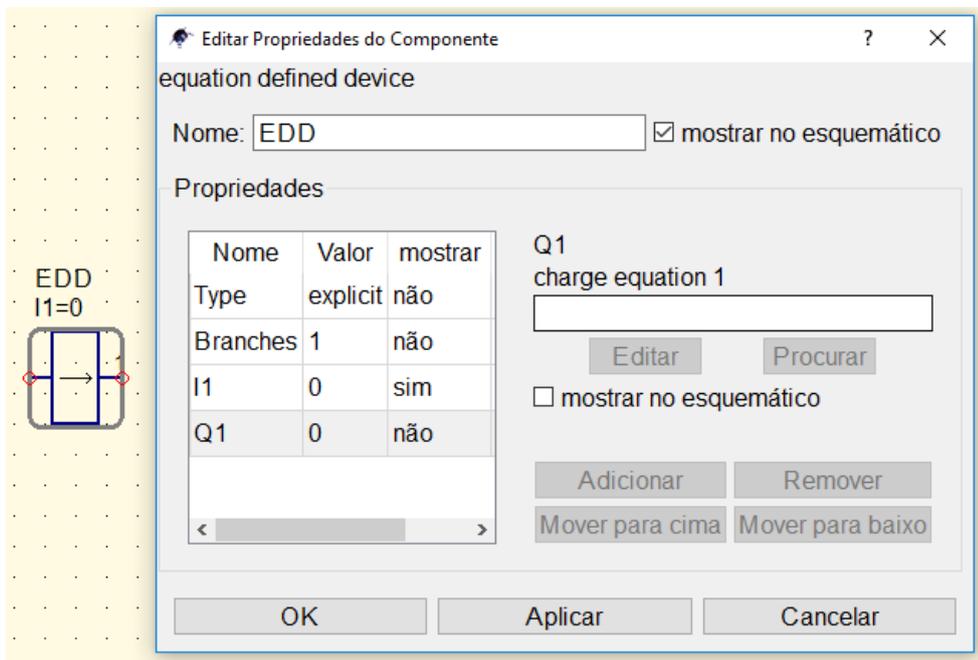
Essa expressão é válida quando o potencial hídrico é considerado constante ao longo de todo o caminho. No entanto, a utilização de capacitância variável como método de investigação da variação do estoque de água em vegetação vem sendo utilizada por autores como Mirfenderesgi et al. (2016). Esses pesquisadores obtiveram bons resultados sobre a transpiração e fluxo de calor latente de ecossistema utilizando uma metodologia numérica baseada em diferenças finitas para obter soluções de equações que relacionam o potencial hídrico do xilema com a condutância estomática. Nesse caso, considerando o eixo vertical, a expressão da mudança de potencial hídrico no xilema utilizada foi a Equação 6.

$$C(z, t)^{(c)} \frac{\partial \Phi(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Phi(z, t))^{(c)} \left(\frac{\partial \Phi(z, t)}{\partial t} - \rho g \right) \right] - \frac{El_c(z, t)}{\Delta z} \quad \text{Equação 6}$$

Nessa expressão, $K(\Phi(z, t))^{(c)}$ e $C(z, t)^{(c)}$ são a condutividade e capacitância específica do xilema, g é aceleração da gravidade, ρ é a densidade da água e o termo $\frac{El_c(z, t)}{\Delta z}$ é a transpiração simulada de cada camada vertical de uma copa de árvore na altura z e no instante de tempo t .

No QUCS, a capacitância hídrica variável do xilema pode ser modelada com a utilização do “*Equation Defined Device*” (EDD) cujo significado em português é Dispositivo Definido por Equação. Esse componente não linear permite a construção de diversos modelos de dispositivo hídrico a partir de equações derivadas das propriedades físicas que as caracterizam (BRISON, 2007). O EDD possibilita que suas correntes de terminal sejam funções de tensão e a carga armazenada seja função da tensão e da corrente (Figura 9).

Figura 9. Esquemático com o dispositivo EDD e suas propriedades.



No lado esquerdo, tem-se o dispositivo EDD, com duas portas de conexão com outros dispositivos. No lado direito, têm-se as propriedades do dispositivo com as entradas das funções de quantidade de carga armazenada e de corrente.

2.6 Característica do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.)

Além do aspecto econômico, a importância do feijão está na segurança alimentar e nutricional da população de diversos países, sendo, historicamente, um dos alimentos mais mundialmente consumidos (BARBOSA e GONZAGA, 2012). Para 2020, por exemplo, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a estimativa para produção nacional do grão é de 3,07 milhões de toneladas, sendo 1,9% superior ao obtido na safra 2018/2019.

Espécie de angiosperma com presença de dois cotilédones, a planta de feijão possui caule herbáceo, cilíndrico, do tipo haste (VIEIRA et al., 2006; ALMEIDA e ALMEIDA, 2014). Há uma grande variedade em se tratando da cor das sementes, do ciclo e do tamanho que a planta, quando adulta, pode atingir (VIEIRA et al., 2006). Essa variabilidade deve-se, além da variedade genética, à diversidade de ambientes onde o feijão é cultivado (FANCELLI e DOURADO NETO, 1997).

O ciclo de produção do feijão é de aproximadamente 90 dias (BARBOSA e GONZAGA, 2012). Esse ciclo é subdividido em 5 etapas para a fase vegetativa e 5 etapas para a fase reprodutiva, totalizando assim 10 etapas (Quadro 1). A fase

vegetativa vai da germinação, denominada como fase V0, até o desenvolvimento da planta com a terceira folha trifoliada totalmente aberta, denominada como fase V4. A fase reprodutiva começa na prefloração (R5) e termina na maturação (R9), quando há a secura total da planta (FERNÁNDEZ DE CÓRDOVA et al., 1986). O Quadro 1 traz a descrição das fases vegetativa e reprodutiva com as siglas correspondentes.

Quadro 1. Fases vegetativa e reprodutiva em um ciclo de cultivo de feijoeiro comum.

<i>Estádio</i>	<i>Fase vegetativa</i>	<i>Estádio</i>	<i>Fase reprodutiva</i>
V0	Germinação	R5	Botões florais
V1	Cotilédones ao nível do solo	R6	Abertura da primeira flor
V2	Folhas primárias expandidas	R7	Aparecimento das primeiras vagens
V3	Primeira folha trifoliada	R8	Primeiras vagens cheias
V4	Terceira folha trifoliada	R9	Ponto de maturidade fisiológicas

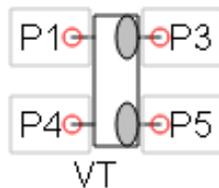
Fonte: adaptado de Fernández de Córdoba (1986).

2.7 Trabalhos desenvolvidos anteriormente

Circuito do caule de coníferas

Em meu TCC (LIMA, 2015) o caule de coníferas pertencentes ao grupo de gimnospermas foi modelado considerando a anatomia própria de suas células condutoras de água. As traqueídes foram modeladas como um sistema VT (vaso-tórus), com a utilização do circuito básico do caule (GAIO, 2011) e de resistores, representando o tórus, ligando extremidades do VT cujo símbolo está na Figura 10. Localizados nas membranas de pontoações, os tórus são espessamentos centrais que impõem resistências ao fluxo hídrico, além disso, agem como válvulas impedindo a propagação de bolhas (TAIZ et al., 2017). Nesse caso, os valores de resistência e de capacitância utilizados foram baseados em valores experimentais para a espécie *Tsuga Canadensis* (LANCASHIRE et al., 2002).

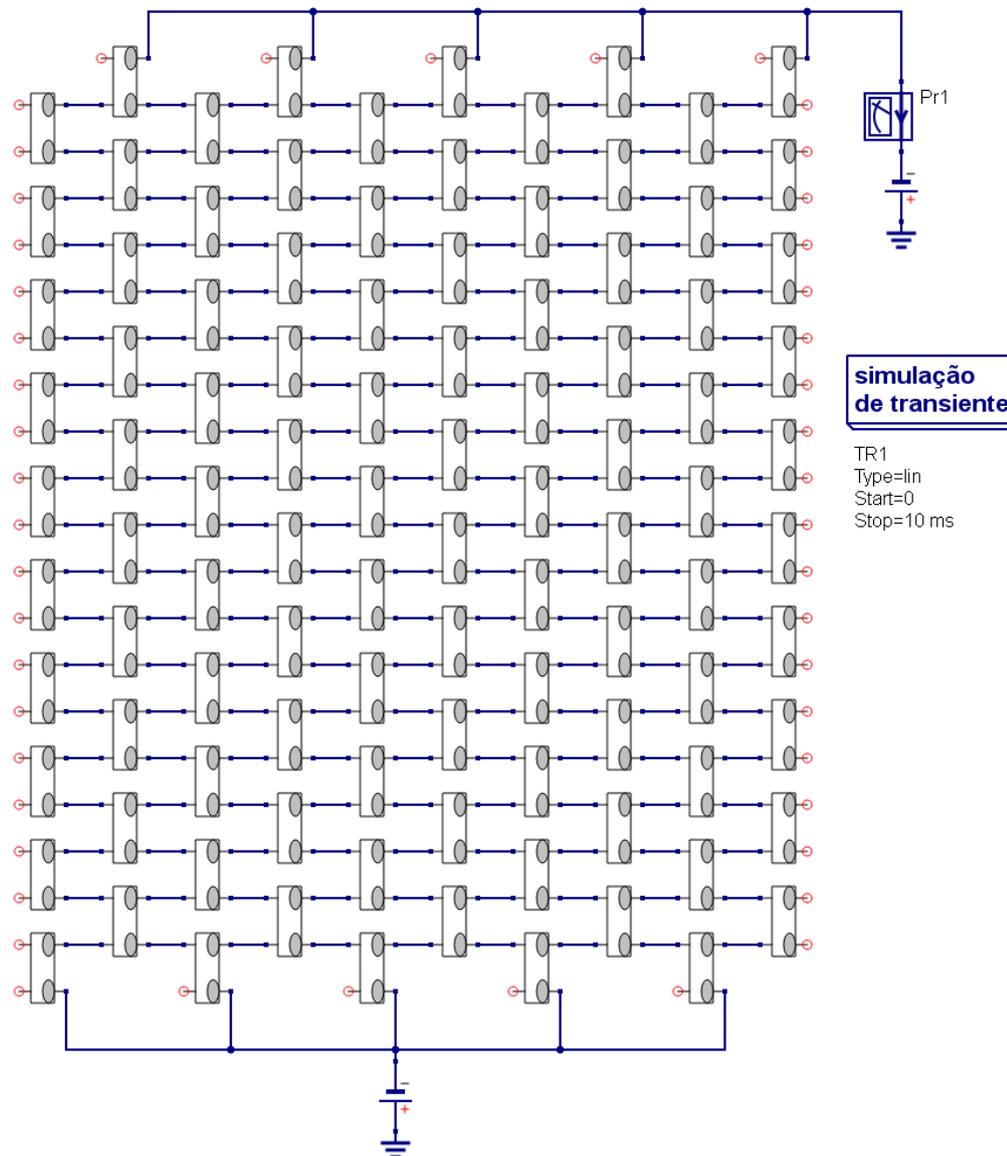
Figura 10. Sistema vaso-tórus (traqueídes).



O sistema vaso-tórus é composto pelo circuito básico do caule (GAIO, 2011) e resistores, que representam a resistência imposta pelo tórus. As portas P1, P3, P4 e P5 permitem a passagem de fluxo hídrico somente pelas laterais, não havendo comunicação pelas extremidades.

De modo a representar a dinâmica hídrica no tecido, em ambiente QUCS, simulações transientes foram realizadas em um conjunto de 100 VT conectados (Figura 11).

Figura 11. Circuito hídrico de caule da espécie *Tsuga Canadensis*.



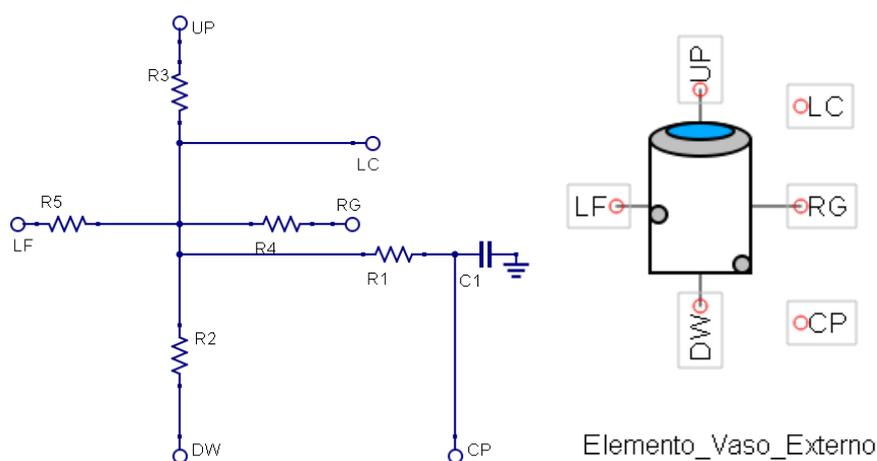
Este circuito representa 100% dos traqueíde-tórus totalmente ligados.

No âmbito desse trabalho, definiu-se uma variável importante no estudo da cavitação. O índice de ligados representa a quantidade de VT totalmente ligados por fios, sendo que cada ruptura de fio representa um vaso embolizado. Obteve-se decaimento polinomial (grau 2) para as médias dos fluxos conforme a diminuição do índice de ligados. Esse foi um importante resultado obtido nesse trabalho, tornando assim uma técnica não invasiva de estudo da cavitação por meio de modelagem *in silico*.

Circuito do caule de angiospermas

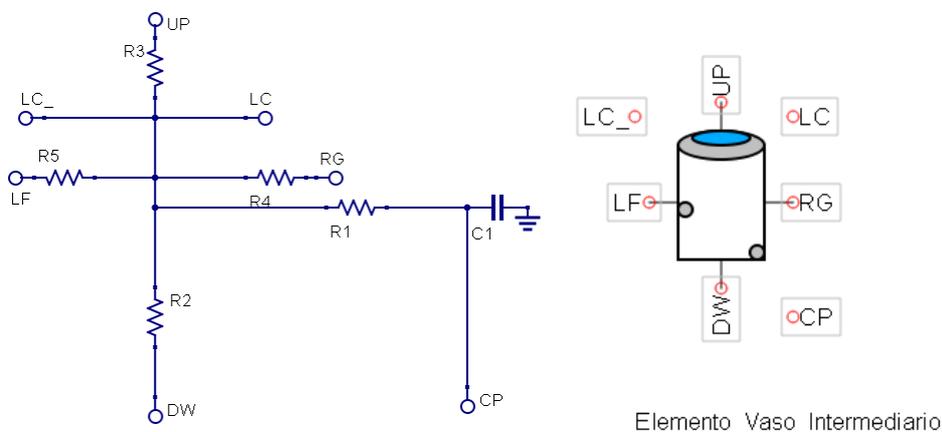
Em minha dissertação (LIMA, 2017), a modelagem do caule de angiospermas foi baseada no circuito básico do caule (GAIO, 2011). Esse trabalho trouxe, no entanto, uma nova roupagem nessa linha de pesquisa, devido à configuração tridimensional das conexões celulares. Nesse modelo, o caule foi tratado como um cilindro concêntrico com camada externa, intermediária e interna, sendo cada uma delas formada por um conjunto de 25 elementos de vaso, em uma configuração matricial 5x5. O circuito dos elementos de vaso das camadas externa (Figura 12) e interna (Figura 14) se diferiram da camada intermediária (Figura 13) pela quantidade de portas LC (do inglês “*layer connection*”), que permitem as conexões intercamadas por meio de resistores.

Figura 12. Circuito hídrico do elemento de vaso da camada externa, à esquerda, e símbolo representativo, à direita.



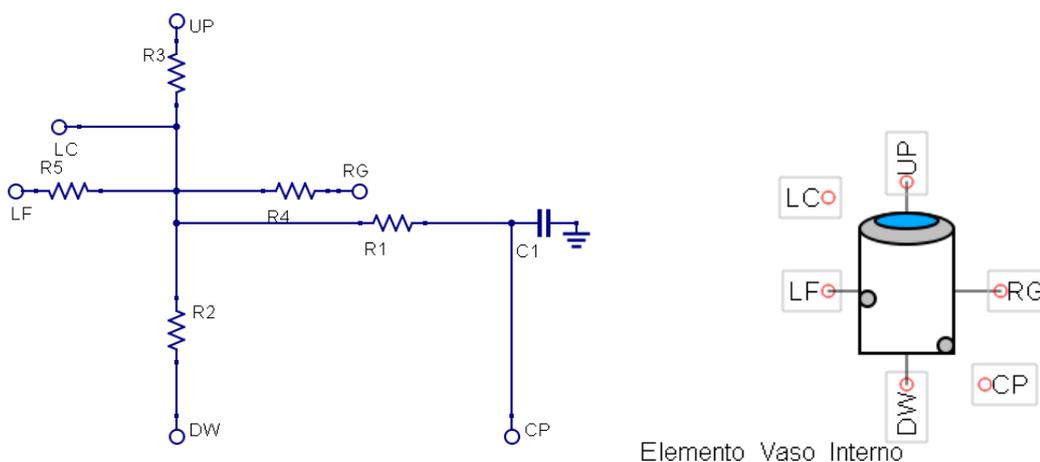
As diferenças entre o circuito modelado nesta situação com o circuito de Gaio (2011) é, além da conexão intercamadas, a conexão intracamada com as células vizinhas, denotadas pelas portas RG (conexão com a célula esquerda) e LF (conexão com a célula direita). Os resistores R2 e R3 representam a resistência de entrada na célula e de saída para as células acima (“*up*”). O resistor R1 está associado ao capacitor (C1), onde se denomina região de armazenamento. Os resistores R4 e R5 impõem resistência ao fluxo lateral e a sigla “CP” é a sonda do capacitor.

Figura 13. Circuito hídrico do elemento de vaso da camada intermediária, à esquerda, e símbolo representativo, à direita.



A diferença deste circuito com os de outras camadas é a presença de duas portas que possibilitam as conexões intercruzadas, denotadas pelas siglas “LC₋” e “LC”. Os resistores R2 e R3 representam a resistência de entrada na célula e de saída para as células acima (“up”), respectivamente. O resistor R1 está associado ao capacitor (C1), onde se denomina região de armazenamento. Os resistores R4 e R5 impõem resistência ao fluxo lateral e a sigla “CP” é a sonda do capacitor.

Figura 14. Circuito hídrico do elemento de vaso da camada interna, à esquerda, e símbolo representativo, à direita.

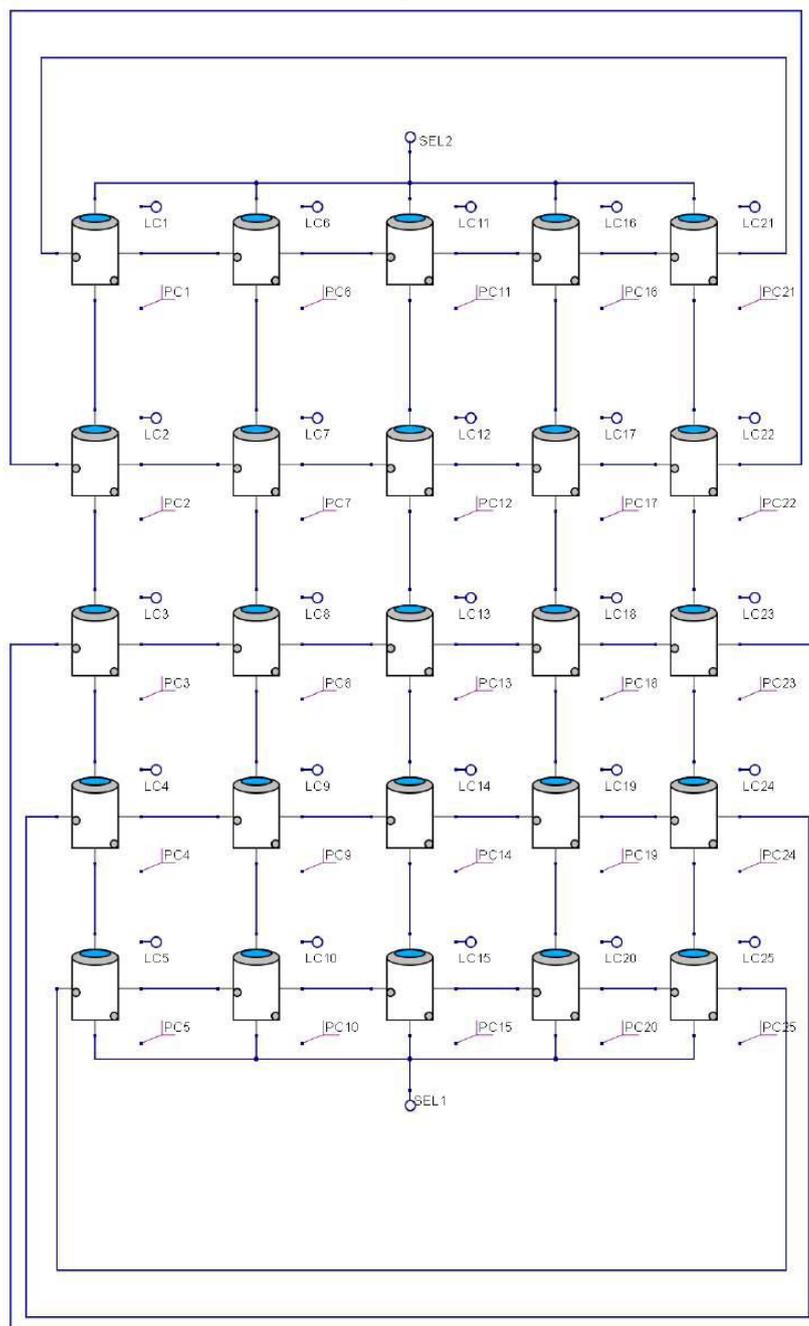


Este circuito é semelhante ao circuito da camada externa. Os resistores R2 e R3 representam a resistência de entrada na célula e de saída para as células acima (“up”), respectivamente. O resistor R1 está associado ao capacitor (C1), onde se denomina região de armazenamento. Os resistores R4 e R5 impõem resistência ao fluxo lateral e o círculo denotado pela sigla CP é o ponto onde se pode conectar uma sonda para conhecer o potencial do capacitor.

Diferentemente do circuito das coníferas, no circuito das angiospermas, as células das extremidades de uma mesma camada foram conectadas, impondo, assim, condição de contorno periódica. Na Figura 15, tem-se a camada externa formada por

25 elementos de vaso. Essa configuração foi a mesma das outras camadas. A conexão das três camadas resultou no circuito da Figura 16.

Figura 15. Conjunto de 5x5 de elementos de vaso representativos da camada externa.



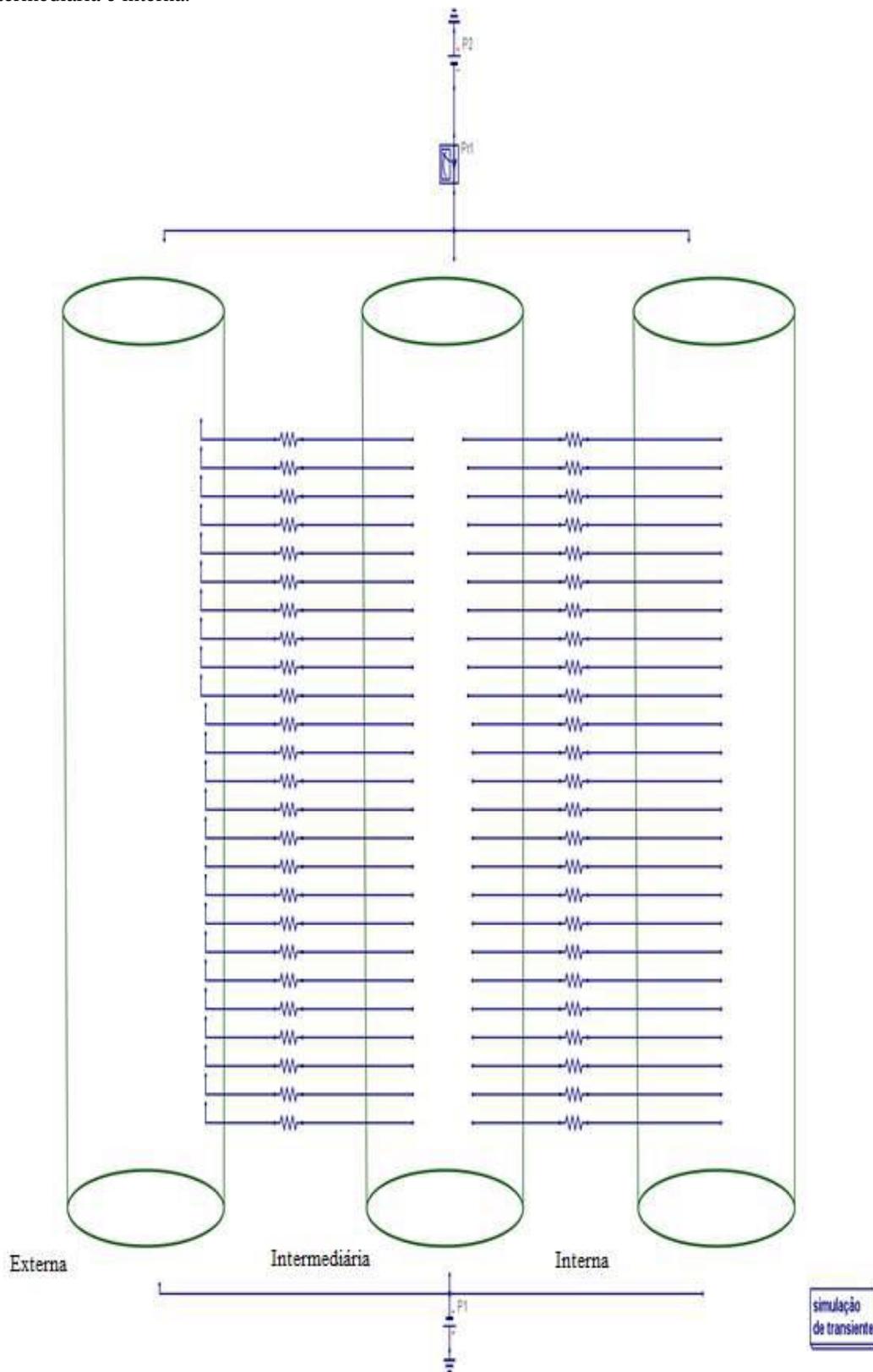
As siglas PC indicam a presença da sonda do capacitor. As portas SEL 1 e SEL 2 são destinadas às conexões das fontes de tensão.

Nessa ocasião, um experimento foi construído com intuito de obter dados para calibração o modelo. Os fluxos e os armazenamentos hídricos em caules de plantas de

feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) foram analisados com a utilização de lisímetros de pesagem no período de estação seca em Cuiabá-MT. As resistências e as capacitâncias foram calculadas utilizando os valores experimentais de fluxo (transpiração), obtido pelo método de balanço de massas, e a quantidade de água armazenada no caule, obtida pela diferença entre massas úmidas e massas secas do caule, considerando também os valores constantes de diferença de potencial hídrico entre o xilema da raiz e o xilema da folha.

Dois importantes resultados foram obtidos nesse trabalho. Sobre o primeiro resultado, foi verificada uma alta correlação entre os dados *in silico* (simulados no QUCS) e dados experimentais de fluxo hídrico volumétrico (ρ de Spearman igual a 0,8). Sobre o segundo resultado, em relação ao volume de água nas células; a região que apresentou maior armazenamento hídrico foi a parte superior do caule (próxima das folhas), o que ser uma das consequências da função regulativa desse órgão sobre a planta (GOLDSTEIN et al., 1998).

Figura 16. Circuito do tecido xilemático de angiospermas, com conexões das camadas externa, intermediária e interna.



3. Material e métodos

Este trabalho foi desenvolvido em quatro distintos passos: obtenção dos dados experimentais do fluxo e armazenamento hídrico no caule de plantas de feijão; modelagem no QUCS; cálculo das propriedades dos circuitos do xilema e, por fim, simulações *in silico* da capacitância hídrica variável, do fluxo hídrico volumétrico, com respectiva validação estatística, e da cavitação hídrica.

3.1 Dados experimentais

O experimento desenvolvido neste trabalho teve como base a pesquisa de Denmead e Shaw (1962), que investigaram a relação entre a transpiração de plantas de milho e a umidade do solo a diferentes condições atmosféricas. Desenvolveu-se o experimento durante o final da estação chuvosa e início de transição chuvosa-seca de 2018 (fevereiro a abril) em uma área da bordadura da estação meteorológica “Mestre Bomblet”. Esse local está situado na Universidade Federal de Mato Grosso, campus Cuiabá, a uma altitude aproximada de 180 m, centrada nas coordenadas 15° 36’ S de latitude e 56° 03’ W de longitude.

A técnica utilizada para medir a transpiração das plantas de feijão foi a de lisimetria de pesagem, que é considerada o padrão de medida dentre os métodos que determinam a evapotranspiração de uma cultura ou a evaporação do solo (MARTINS et al., 2018). Construiu-se um conjunto de 198 lisímetros adaptados com garrafa pet na base para haver controle de água, caso houvesse excesso decorrente de rega ou de precipitação pluviométrica. Vasos, com volume máximo de 1,7 litros, com 8,9 cm de diâmetro de base e 20,7 cm de altura, foram preenchidos com aproximadamente 1900g de solo (Figura 17). Sem solo, a estrutura total dos lisímetros teve, em média, massa de 74 g com desvio padrão de 4 g. Colocados em três mesas (Figura 18) com 11 filas e 6 colunas, os lisímetros foram identificados com numeração matricial Mij, em que M é a mesa (A, B e C) e i e j são os índices correspondentes às filas e às colunas, respectivamente. Colocou-se tela sombrite (70%) sobre as mesas para que tivesse atenuação da radiação solar, que, em excesso, prejudica o desenvolvimento das plantas.

Figura 17. Lisímetros de pesagem.



Os lisímetros eram consistidos por vasos, com vedação nas laterais (parte superior), e bases de garra pet de 2 ou 2,5 litros (parte inferior). No primeiro experimento (estação seca de 2017), descrito na minha dissertação (seção 2.7) e em Lima et al. (2020), para permitir a medida do volume de água nas bases dos lisímetros foi adicionado um pequeno cano, que foi vedado com rolha. Na segunda etapa, realizada neste trabalho, cano e rolha foram substituídos por papel adesivo para facilitar os procedimentos de retirada de água, já que houve um número elevado de eventos de precipitação durante o cultivo.

O solo utilizado foi preparado a partir de terra preta de viveiros. Quanto à textura, a proporção dos componentes areia, silte e argila foi de 62,3%, 14,6% e 23,1%, respectivamente. Esses valores são resultados da análise granulométrica (amostra de 1 kg) feita pelo laboratório AgroAnálise-Laboratórios Integrados em Cuiabá-MT, que é certificado pelo Programa de Análise de Qualidade de Laboratórios de Fertilidade (PAQLF), coordenado pela Embrapa Solos. O método utilizado foi do densímetro (análise física), no qual o hidróxido de sódio ($NaOH$) foi utilizado como dispersante químico. Sementes comerciais tipo 1 de feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.) foram utilizadas no plantio, que durou cerca de 45 dias até o dia de medições e ensaios destrutivos.

Figura 18. Mesas utilizadas no experimento.



As mesas construídas para o experimento consistiram em armações de madeira e ferro, de modo que existissem 66 lugares para que os lisímetros pudessem ser colocados (totalizando assim 198 lugares). As mesas foram nomeadas como A, B e C.

Tratamentos (quantidade de água no solo, θ_{solo})

Durante quase todo o plantio, regaram-se as plantas diariamente de modo a garantir o igual desenvolvimento a todas as amostras. Na semana que antecedeu o dia de medições, essas quantidades de rega foram rearranjadas para que existissem diferentes quantidades de água no solo (θ_{solo}).

Houve perda de algumas plantas decorrente, provavelmente, do excesso de chuva. Por isso, do total de 198 amostras, foram utilizadas 156. Sendo assim, foram obtidos treze diferentes tratamentos, sendo cada tratamento correspondente à duas filas com seis lisímetros cada (13 tratamentos x 12 amostras). Paralelamente ao rearranjo de água, o solo dos lisímetros foi coberto com plástico para reduzir a evaporação (RAMAKRISHNA et al., 2006). Os valores médios de quantidade de água no solo com os respectivos tratamentos estão na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios de quantidade de água no solo (θ_{solo}) e tratamentos correspondentes.

Tratamento	θ_{solo}	Desvio padrão
1	10,6%	1,4%
2	11,1%	1,4%
3	13,8%	2,2%
4	12,7%	0,3%
5	14,3%	1,5%
6	15,1%	0,3%
7	16,2%	0,2%

8	17,4%	0,5%
9	19,2%	3,6%
10	19,8%	0,7%
11	21,3%	0,5%
12	22,6%	0,5%
13	23,5%	0,6%

Ao final do experimento, as plantas estavam em estágio de desenvolvimento v4, pois apresentaram uma terceira folha trifoliada (FERNÁNDEZ DE CÓRDOVA et al., 1986). Pode-se dizer que determinado plantio está num estágio de desenvolvimento se mais de 50% das plantas estão nesse estágio (NEUMAIER et al., 2000).

Medições e ensaios destrutivos

No dia 20 de abril, as pesagens dos lisímetros foram feitas em 3 diferentes horários (8, 12, 16 horas) para que os valores de quantidades de água no solo pudessem ser ajustados até a penúltima medida, para, na última, serem realizados os cortes destrutivos. Realizaram-se cortes destrutivos para separação das raízes, folhas e caules, que foram levados à estufa em temperatura de 60 ± 5 °C (até peso constante). A quantidade de água armazenada no caule foi obtida pela diferença entre as massas no momento dos cortes e após secagem (esses valores foram convertidos em volume, cm^3). As pesagens dos lisímetros e caules foram realizadas em balanças digitais de precisão de 1g e 0,1g, respectivamente.

Para plotar a curva da taxa de transpiração versus quantidade de água no solo, calculou-se a transpiração (mm s^{-1}) a partir da razão entre a diferença das massas dos lisímetros nos dois últimos horários de pesagem e o intervalo de tempo entre as duas medidas. Para obtenção da lâmina d'água transpirada, em mm, dividiram-se os valores de massa convertidos em volume (mm^3) pela área da base do vaso (em mm^2). Calculou-se a quantidade de água no solo a partir da divisão da massa de água contida no solo dos lisímetros pela massa seca de solo correspondente (em %), conforme Claessen (1997).

Os fluxos hídricos volumétricos utilizados nos cálculos das propriedades dos circuitos foram também obtidos a partir da divisão entre a diferença das massas dos lisímetros nos dois últimos horários de pesagem e o intervalo de tempo entre as

medidas. Nessa situação, diferentemente do cálculo da lâmina d'água, mantiveram-se os valores de massa convertidos em volume (m^3) para obtenção do fluxo em $m^3 s^{-1}$.

Diâmetros de elementos de vaso do xilema

Realizaram-se procedimentos laboratoriais para a obtenção de lâminas permanentes com intuito de calcular o diâmetro real de elementos de vaso. Para tanto, foram realizados cortes longitudinais em um caule de planta de feijão. Logo após, as amostras de caule foram fixadas em solução de F.A.A. (ácido acético glacial-formaldeído-álcool etílico 70%) e, após 48 horas, foram conservadas em álcool etílico 70%. Em seguida, as amostras foram desidratadas, em uma sequência crescente de álcool etílico (50% a 100%), incluídas em parafina para obtenção de cortes histológicos semisseriados de 7 μm de espessura (em micrótomo) e, por fim, coradas para identificação e melhor visualização das células. A técnica utilizada para obtenção das lâminas baseou-se em Kraus e Arduin (1997) e Johansen (1940)⁸.

Após a confecção das lâminas, realizou-se a fotodocumentação em microscópio *Leica ICC50 E*, que, posteriormente, foram utilizadas na medição de diâmetro de 10 elementos de vaso com a utilização do software *ImageJ* (domínio público). Os procedimentos laboratoriais citados acima foram realizados em laboratórios da Faculdade de Agronomia e Zootecnia (FAAZ) da Universidade Federal de Mato Grosso. Embasaram-se em fotomicrografias de Reis et al. (2011) para identificações das células xilemáticas (elementos de vaso).

Comportamento das variáveis meteorológicas

Para a caracterização das variáveis meteorológicas foram utilizados dados horários de temperatura do ar e de umidade relativa do ar, oriundos de estações automáticas pertencentes ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), disponibilizados na plataforma eletrônica do Instituto. Esses dados correspondem à faixa de horários das 8 às 16 horas, do dia 20 de abril de 2018. O déficit de pressão de vapor (DPV) foi calculado por meio da diferença entre a pressão de vapor de saturação (e_s), Equação 7, e a pressão parcial de vapor d'água (e_a), Equação 8.

⁸ A técnica utilizada para obtenção de lâminas de anatomia vegetal também foi consultada no site do Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), disponível em <http://laveg.paginas.ufsc.br/roteiro-ilustrado/material-e-metodos/>.

Calculou-se a pressão de vapor de saturação com a utilização da equação de Tetens (1930). Nesta (Equação 7), e_s é a pressão de vapor de saturação, em kPa, e T é a temperatura do ar em °C.

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{7,5 T}{237,5 + T}\right) \quad \text{Equação 7}$$

Calculou-se a pressão parcial de vapor com a utilização da Equação 8, em que e_a é a pressão parcial de vapor d'água, em kPa, e UR é a umidade relativa em %.

$$e_a = \frac{e_s UR}{100} \quad \text{Equação 8}$$

Por fim, calcularam-se os potenciais hídricos do ar, em MPa, por meio da Equação 9 (NOBEL, 2009).

$$\psi_{ar} = \frac{RT}{V} \ln\left(\frac{UR}{100}\right) \quad \text{Equação 9}$$

Nessa expressão, R é a constante universal dos gases cujo valor utilizado foi de $8,31 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ MPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$; V é o volume parcial molar da água cujo valor utilizado foi de $1,807 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$; T é a temperatura do ar em Kelvin e UR é a umidade relativa do ar (%).

3.1.1 Análise estatística dos dados experimentais

Os dados de transpiração e de quantidade de água armazenada no caule foram submetidos a uma análise exploratória para verificação de outliers e, posteriormente, aos testes de aderência de normalidade de Shapiro-Wilk e de Kolmogorov-Smirnov (ambos a um nível de significância de 5%). Para a comparação entre tratamentos, no caso da transpiração, aplicou-se a análise de variância (dados normais), e no caso da quantidade de água armazenada aplicou-se o teste U de Mann-Whitney (dados não normais), sendo ambos a um nível de significância de 5%.

Para aplicação desse último, os 13 tratamentos foram divididos em 2 grupos. Devido à diferença entre os valores de θ_{solo} ser pequena, agruparam-se os tratamentos utilizando a análise de cluster do tipo k-média (não hierárquico). Dessa forma, os grupos formados para aplicação do teste U de Mann-Whitney sobre os dados de

quantidade de água armazenada foram: grupo 1 (do tratamento 1 ao tratamento 7) e grupo 2 (do tratamento 8 ao tratamento 13).

3.2 Modelagem no Qucs

Considerando as funções de condução e armazenamento de água, modelou-se o caule por meio de módulos do Sistema Elemento de Vaso-Parênquima, denominados como PVS (“*Parenchyma-Vessel Element System*”).

Foram construídos três diferentes cenários para as simulações *in silico*. O primeiro cenário foi utilizado para a simulação da capacitância hídrica variável; o segundo, para a simulação do fluxo hídrico volumétrico no caule de feijão; o terceiro, para a simulação da cavitação. No primeiro cenário (seção 3.3), realizou-se uma simulação com um módulo PVS com dados médios dos caules (do conjunto total de tratamentos). No segundo cenário (seção 3.4), utilizou-se um conjunto de 100 módulos PVS, de forma a representar o tecido xilemático para a simulação do fluxo hídrico volumétrico. Nesse caso, cada simulação correspondeu a um caule de planta de feijão, totalizando assim 156 simulações, que foi o número final de plantas utilizadas nas medições. Por fim, no terceiro cenário (seção 3.4), para a simulação da cavitação, utilizou-se o mesmo circuito desenvolvido na simulação dos fluxos hídricos volumétricos máximos e mínimos.

3.3 Capacitor hídrico variável

A capacitância hídrica variável foi modelada com a utilização do EDD que substituiu os capacitores hídricos convencionais nos circuitos básicos desenvolvidos no TCC (Figura 10) e na dissertação (Figuras 12, 13 e 14). A partir da definição de capacitância hídrica (Equação 10), obteve-se a expressão do volume de água no capacitor hídrico (Equação 14).

$$\Delta w = C^* \Delta \psi \quad \text{Equação 10}$$

Nessa expressão, que é análoga à expressão para o cálculo da capacitância elétrica, o termo Δw é a variação do volume de água no parênquima e C^* é a capacitância escrita como função da variação do potencial hídrico entre dois pontos na célula ($\Delta \psi$). Conforme a Equação 11, a capacitância C^* foi definida como um coeficiente de ajuste da expressão (C_1) mais o produto entre um segundo coeficiente

de ajuste da expressão (C_2) e a variação de potencial hídrico. No caso, C_1 tem unidade de medida de capacitância hídrica ($\text{m}^3 \text{MPa}^{-1}$) e C_2 tem unidade de medida específica ($\text{m}^3 \text{MPa}^{-2}$).

$$C^* = C_1 + C_2\Delta\psi \quad \text{Equação 11}$$

Ao substituir a Equação 11 na Equação 10, tem-se a Equação 12.

$$\Delta w = (C_1 + C_2\Delta\psi)\Delta\psi \quad \text{Equação 12}$$

Considerou-se Δw (m^3) como a diferença entre um volume de água armazenado no capacitor (w), quando esse está submetido a uma diferença de potencial $\Delta\psi$, e um volume médio inicial (w_0), quando o capacitor está submetido a uma diferença de potencial nula. Dessa forma, substituindo Δw por $(w - w_0)$ na Equação 12 tem-se a Equação 13.

$$w - w_0 = C_1\Delta\psi + C_2\Delta\psi^2 \quad \text{Equação 13}$$

Ao isolar w , nessa equação, tem-se a expressão polinomial (2º grau) utilizada para o volume de água no capacitor hídrico (Equação 14).

$$w = w_0 + C_1\Delta\psi + C_2\Delta\psi^2 \quad \text{Equação 14}$$

Pensou-se em 3 diferentes possíveis regimes do parênquima como explicação dos coeficientes de ajustes da Equação 14: i) quando a variação do potencial hídrico é nula ($\Delta\psi=0$); ii) quando a variação do potencial hídrico é negativa ($\Delta\psi<0$); iii) quando a variação do potencial hídrico é positiva ($\Delta\psi>0$).

No primeiro regime (item i), considera-se que as paredes do parênquima não estão exercendo pressão positiva ou pressão negativa sobre o sistema, isto é, a célula está em um estado cuja quantidade da água presente é satisfeita. Na Equação 14, considerando $\Delta\psi$ igual a 0, a quantidade água na célula (w) é igual a um valor médio (w_0).

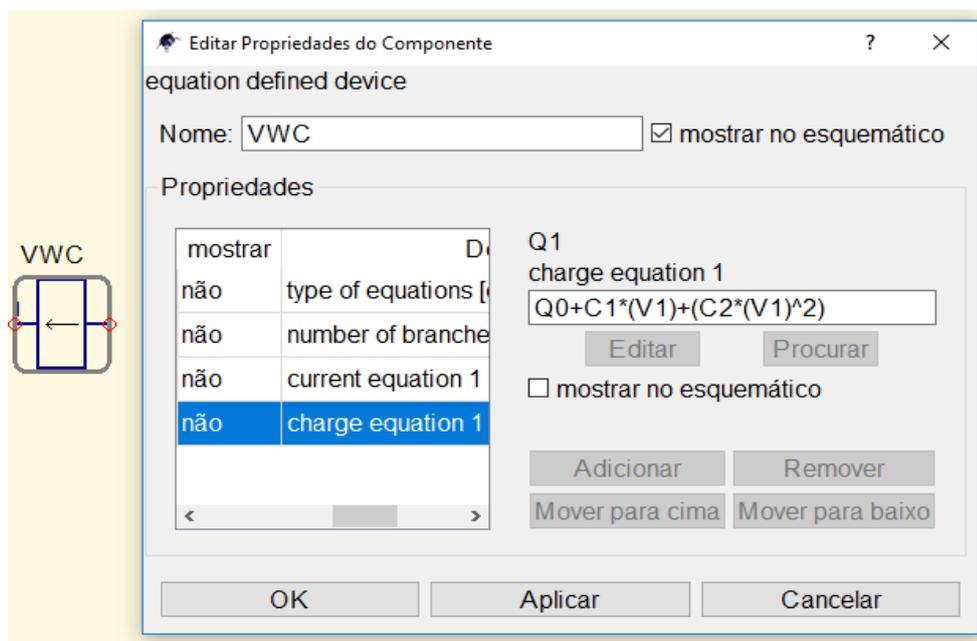
No segundo regime (item ii), quando a variação de potencial é positiva, o valor do volume de água na célula aumentará até atingir um valor máximo (célula túrgida). Nessa situação, as paredes do parênquima relaxam, e o potencial positivo deve-se a pressão exercida pela água sobre as paredes das células túrgidas. Na Equação 14, se

$\Delta\psi$ for maior que 0, o termo $C_1\Delta\psi$ contribuirá com um acréscimo sobre o valor final do volume (w).

No terceiro regime (iii), quando a variação⁹ de potencial é negativa, o valor do volume reduzirá até atingir um valor mínimo (célula plasmolisada). Na Equação 14, se $\Delta\psi$ for menor que 0, o termo $C_1\Delta\psi$ contribuirá com um decréscimo sobre o valor final do volume (w).

O capacitor hídrico VWC (do inglês *Variable Water Capacitor*), cuja sigla traduzida para o português é “capacitor hídrico variável”, sob esquemático do QUCS, está na Figura 19.

Figura 19. Esquemático do VWC (capacitor hídrico variável) e de suas propriedades.



Nota-se que na aba “Q1 charge equation” está a Equação 14. Onde está “Q0” lê-se “ w_0 ”. Onde está “V1” lê-se “ $\Delta\psi$ ”.

Coeficientes de ajuste da expressão

Para obtenção dos coeficientes da Equação 14, ajustou-se uma curva polinomial de grau 2 entre os dados experimentais de quantidade de água armazenada

⁹ O termo variação de potencial hídrico no parênquima também pode ser entendido como diferença de potencial hídrico entre dois pontos nessa célula.

no caule das plantas por tratamento (w) e o potencial hídrico do solo por tratamento (ψ_{solo}).

Os potenciais hídricos do solo (ψ_{solo}) foram estimados considerando Nobel (2009), que faz uma relação entre a quantidade de água no solo (em %) e o potencial hídrico no solo (em MPa). Segundo esse autor, um solo argiloso com quantidade de água igual a 35% apresenta um potencial hídrico de -0,2 MPa e um solo argiloso com 12% apresenta potencial hídrico de -1,5 MPa. Considerando essa relação, fez-se um ajuste linear entre esses dados para obtenção da equação que relaciona o potencial hídrico (ordenada) e a quantidade de água solo (abscissa). Com essa equação, os valores de potencial hídrico no solo foram calculados utilizando as quantidades de água no solo obtidas no experimento (média por tratamento).

A relação de Nobel (2009) permite afirmar que o potencial obtido estará provavelmente muito próximo do que poderia se obter medindo diretamente nos lisímetros. É preciso considerar, sobretudo, que o que se espera é um comportamento dos dados que valide um modelo análogo plausível.

Cálculo das resistências

Rearranjou-se a equação de Gaio (2011) para a estimativa da resistência associada ao capacitor variável (resistência de descarregamento), conforme a Equação 15.

$$R_D = \frac{\bar{w}}{\bar{f}\bar{C}} + \frac{\Delta\psi_{xrf}}{\bar{f}} \quad \text{Equação 15}$$

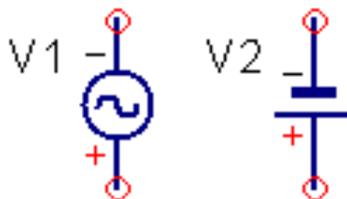
Nessa expressão, R_D é a resistência de descarregamento (MPa s m⁻³), \bar{w} , em m³, é o volume médio de água armazenada nos caules, entre todos os tratamentos (obtido pela diferença entre massa úmida e massa seca dos caules); \bar{f} , em m³ s⁻¹, é o fluxo hídrico volumétrico médio nos caules, entre todos os tratamentos; \bar{C} é a capacitância hídrica média dos caules, entre todos os tratamentos, em m³ MPa⁻¹; por fim, $\Delta\psi_{xrf}$ é a diferença de potencial hídrico entre os xilemas da raiz (-0,6 MPa) e da folha (-0,8 MPa), conforme Nobel (2009). Calculou-se a resistência de descarregamento como 20% da resistência total do caule (elemento de vaso), considerando a relação proposta por Nobel (2009). A partir disso, considerando um possível caminho hídrico,

subdividiram-se¹⁰ os demais valores entre os outros resistores do circuito, conforme o exemplo da Figura 36 (seção 3.4). Os valores de resistência utilizados no circuito do primeiro cenário estão na seção 4.2 (Figura 42).

Fonte de tensão e simulação

Para a simulação, considerou-se uma diferença de potencial de -0,2 MPa no módulo PVS, adotando a diferença entre os valores de potenciais constantes entre o xilema da raiz (-0,8 MPa) e o xilema da folha (-0,6 MPa). De modo a realizar uma pequena variação na tensão ao longo do tempo, além de uma fonte de tensão contínua, utilizou-se uma fonte de tensão alternada. Dessa forma, utilizou-se -0,15 MPa para a fonte de tensão contínua e -0,05 MPa para a fonte de tensão alternada (Figura 20). Na fonte de tensão alternada, a frequência de oscilação adotada foi de $1,16 \times 10^{-5}$ Hz, que é o inverso do total de segundos em um dia civil (24 horas). Utilizou-se uma simulação transiente com tempo de 86 400 segundos (24 horas) com varredura de parâmetro da fonte de tensão alternada (varredura até -0,05 MPa).

Figura 20. Fontes de tensão alternada (V1) e de tensão contínua (V2).



O valor do potencial utilizado na fonte de tensão contínua foi de -0,15 MPa e na fonte de tensão alternada realizou-se a varredura de parâmetro até -0,05 MPa.

3.4 Fluxo hídrico volumétrico *in silico* no caule

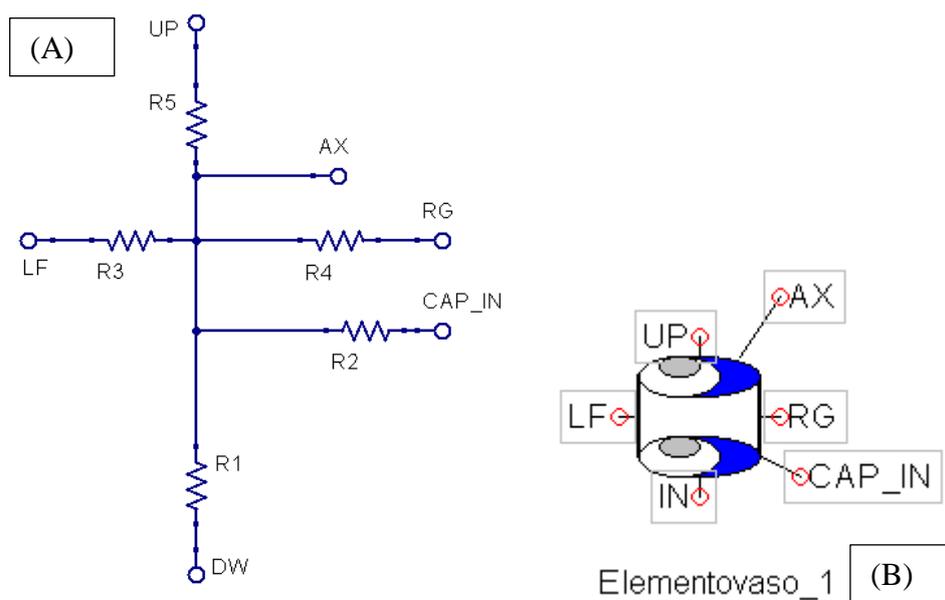
Para a simulação do fluxo hídrico, utilizou-se um circuito semelhante ao utilizado na simulação da capacitância hídrica variável (seção 4.3). No entanto, adicionou-se uma porta para conexão radial (intercamada), visto que há esse tipo de comunicação em células do tecido xilemático (CARLQUIST, 2015). Utilizou-se o

¹⁰ Esta subdivisão das resistências dos elementos de vaso foi utilizada nos 3 cenários *in silico* construídos neste trabalho.

número de 5 camadas¹¹, com 20 módulos PVS em cada uma, sendo uma delas considerada a mais externa, três intermediárias, estabelecendo conexão intercamadas, e uma mais interna. Neste caso, levando em consideração as funções de cada célula, o módulo PVS consistiu na conexão entre o elemento de vaso (resistência à passagem de água, representado pelo conjunto de resistores) e o parênquima (armazenamento de água, representado pelo capacitor hídrico variável), formando, assim, o módulo PVS.

Cada camada foi construída com o mesmo circuito dos elementos de vaso, diferindo-se apenas na quantidade de portas para conexão radial, sendo uma para os circuitos da camada mais externa (Figura 21) e da camada mais interna (Figura 26), e duas para os circuitos das camadas intermediárias (Figura 30).

Figura 21. Circuito dos elementos de vaso da camada externa (A) e seu símbolo representativo (B).

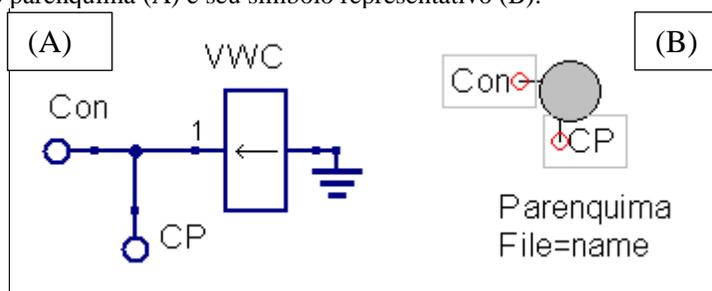


As resistências para entrada e saída de água nos elementos de vaso estão representadas pelos resistores R1 e R5, a resistência de descarregamento associada ao capacitor hídrico variável está representada pelo resistor R2 e as resistências de saída para os elementos de vaso laterais estão representadas pelos resistores R3 e R4. As portas de conexão presentes em cada resistor permitem as conexões com outros módulos PVS. A porta “DW” é a porta para entrada de água, vinda de uma célula abaixo. As portas “UP”, “LF”, “RG” são as portas de conexão para células acima, à esquerda e à direita, respectivamente. As portas “CAP_IN” e “AX” permitem a conexão com o circuito do capacitor hídrico variável e a conexão axial (intercamadas), respectivamente.

¹¹ Um número de 5 camadas, totalizando um amplo conjunto de 100 elementos de vaso e 100 parênquimas (módulo PVS), mostrou-se ser factível no desenvolvimento do trabalho. A consideração do caule como um cilindro concêntrico facilita a construção do arranjo, visto que uma análise transversal se torna inviável devido ao número real de células presentes no tecido xilemático ser bem elevado.

Em cada circuito dos elementos de vaso (de todas as camadas), os capacitores hídricos variáveis (Figura 22) foram conectados pela porta do resistor R2 (descarregamento). O capacitor hídrico variável utilizado foi o mesmo do primeiro cenário. Foram utilizados os mesmos valores de w_0 , C_1 e C_2 para a expressão do volume do capacitor hídrico (seção 3.3).

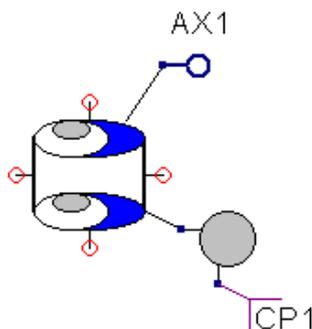
Figura 22. Circuito do parênquima (A) e seu símbolo representativo (B).



Utilizou-se o capacitor hídrico variável como o dispositivo do parênquima. De mesma forma que o cenário 1, utilizou-se a Equação 11 para a carga do capacitor, com os mesmos valores das constantes. O dispositivo apresenta duas portas de conexão, sendo uma para conexão do elemento de vaso (“Con”) e outra para medição do potencial do capacitor (CP). Este dispositivo foi utilizado em todas as camadas.

A conexão do circuito do elemento de vaso e do parênquima forma o módulo PVS, que está na Figura 23.

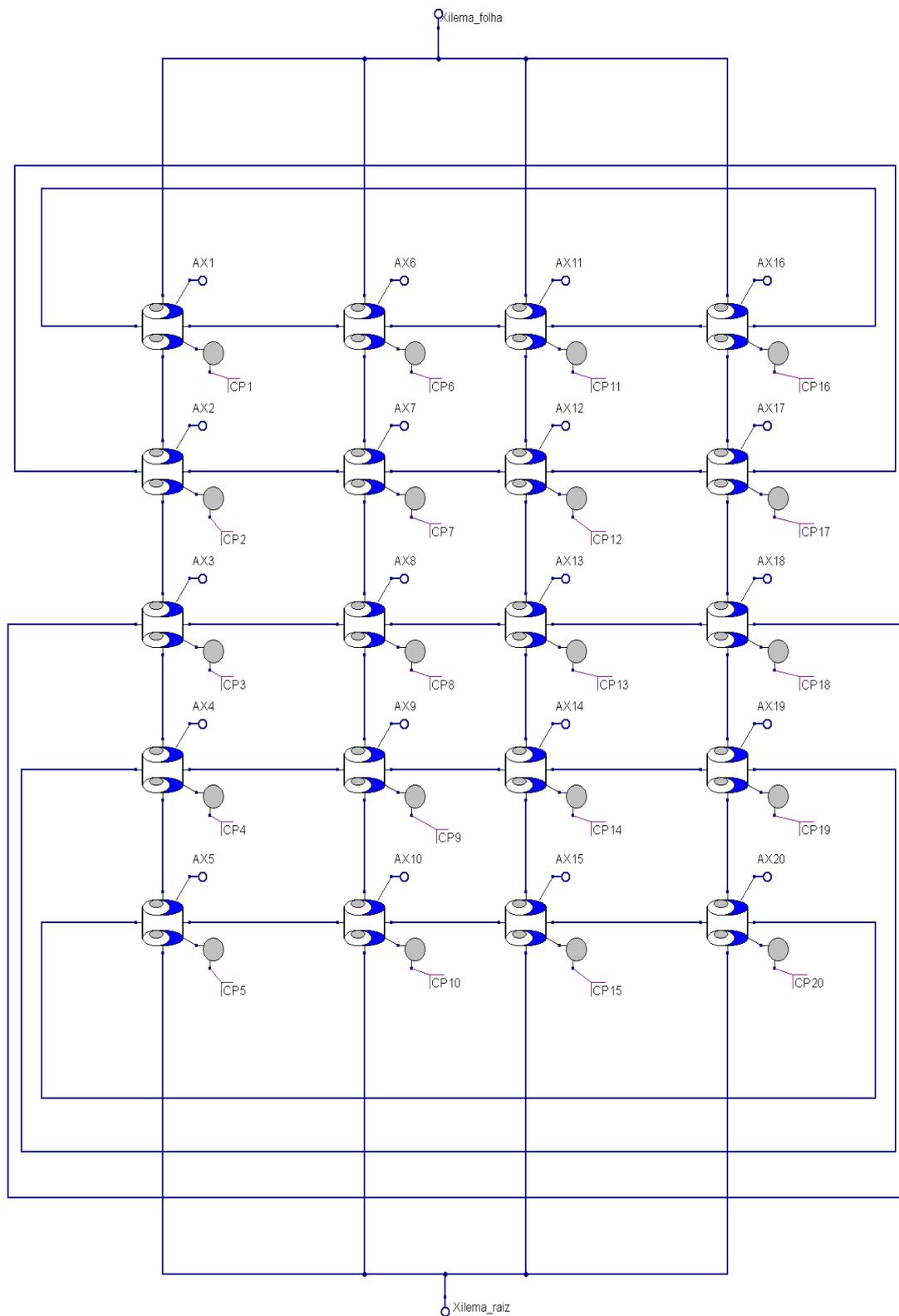
Figura 23. Módulo PVS para a camada externa.



O parênquima foi conectado pela porta “CAP_IN”. “AX” permite a conexão axial (intercamada) e “CP1” é a sonda do capacitor.

O conjunto da camada externa, com 20 células, está na Figura 24. Impuseram-se condições de contorno periódicas, com as conexões das células situadas nas extremidades.

Figura 24. Camada externa com módulos PVS.



As portas Xilema_raiz e Xilema_folha permitem a conexão das fontes de tensão.

O símbolo representativo da camada externa está na Figura 25.

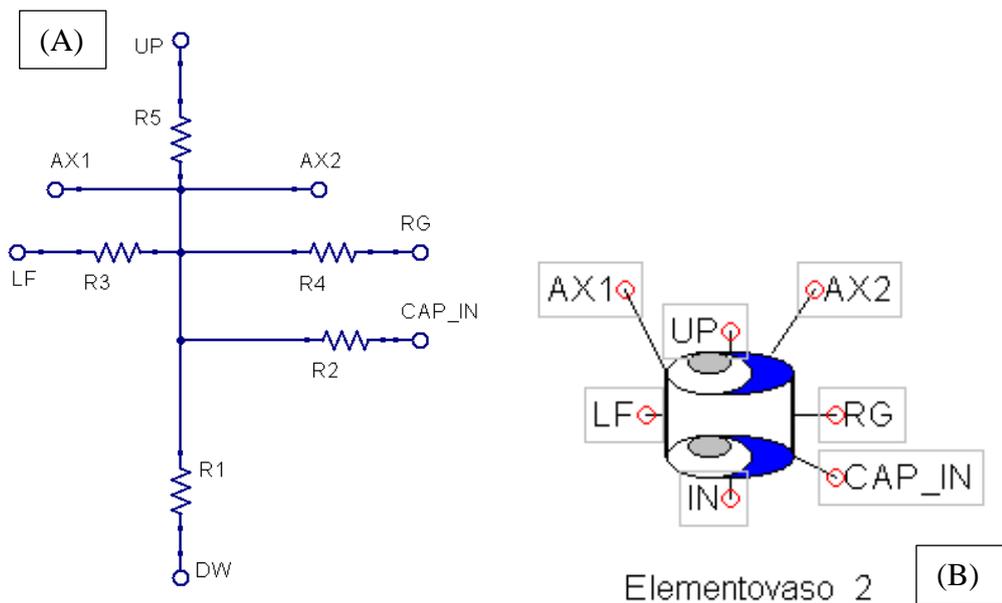
Figura 25. Símbolo representativo da camada externa (camada 1).



As portas Xilema_raiz e Xilema_folha permitem a conexão das fontes de potencial hídrico.

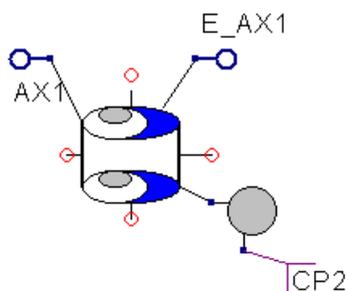
O circuito dos elementos de vaso das camadas intermediárias está na Figura 26 e o módulo PVS (com a conexão do parênquima) está na Figura 27.

Figura 26. Circuito dos elementos de vaso das camadas intermediárias (A) e seu símbolo representativo (B).



As resistências para entrada e saída de água nos elementos de vaso estão representadas pelos resistores R1 e R5, a resistência de descarregamento associada ao capacitor hídrico variável está representada pelo resistor R2 e as resistências de saída para os elementos de vaso laterais estão representadas pelos resistores R3 e R4. As portas de conexão presentes em cada resistor permitem a conexão com outros módulos PVS. A porta “DW” é a porta para entrada de água, vindo de uma célula abaixo. As portas “UP”, “LF”, “RG” são as portas de conexão para células acima, à esquerda e à direita, respectivamente. As portas “CAP_IN” e as portas “AX1” e “AX2” permitem a conexão com o circuito do capacitor hídrico variável e a conexão axial (intercamadas), respectivamente.

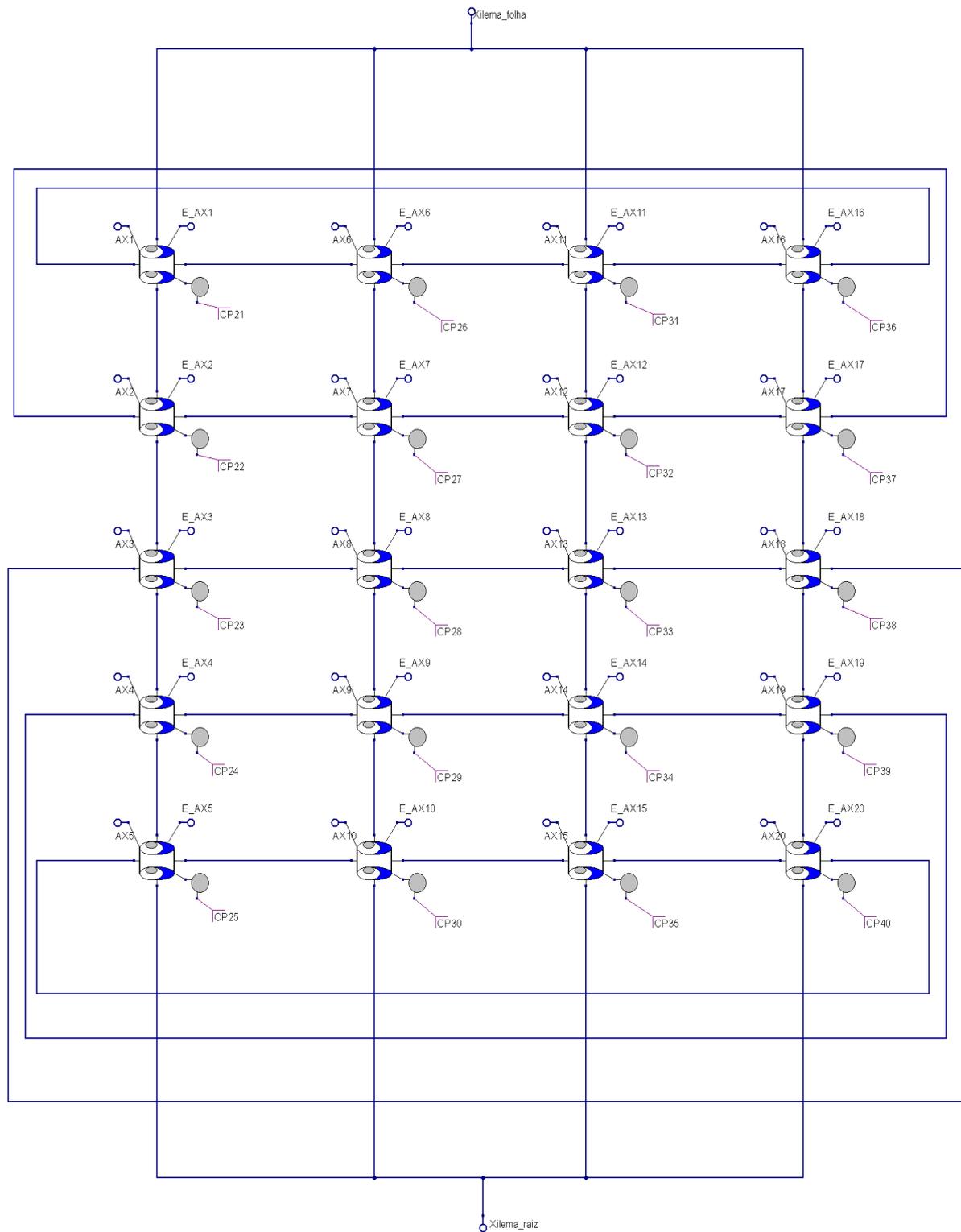
Figura 27. Módulo PVS para a camada intermediária.



O parênquima foi conectado pela porta “CAP_IN”. “AX1” e “E_AX1” permitem a conexão axial (intercamada) e “CP2” é a sonda do capacitor.

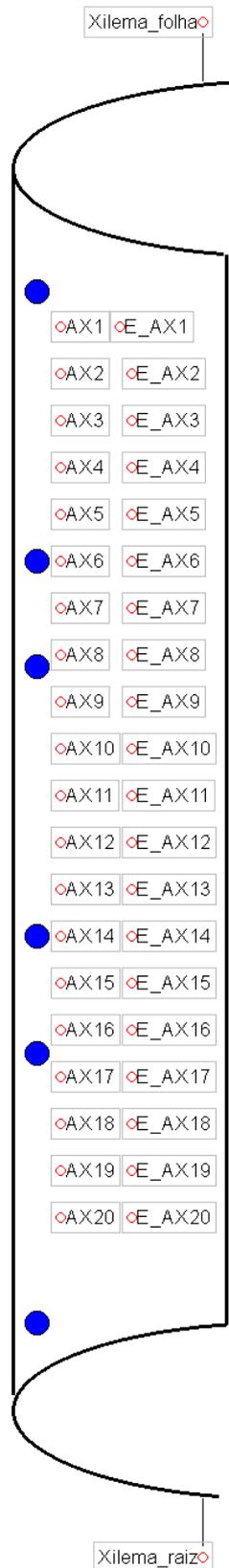
O conjunto da camada intermediária, com 20 células, está na Figura 28 e seu símbolo representativo está na Figura 29.

Figura 28. Camada intermediária com módulos PVS.



As portas Xilema_raiz e Xilema_folha permitem a conexão das fontes de tensão.

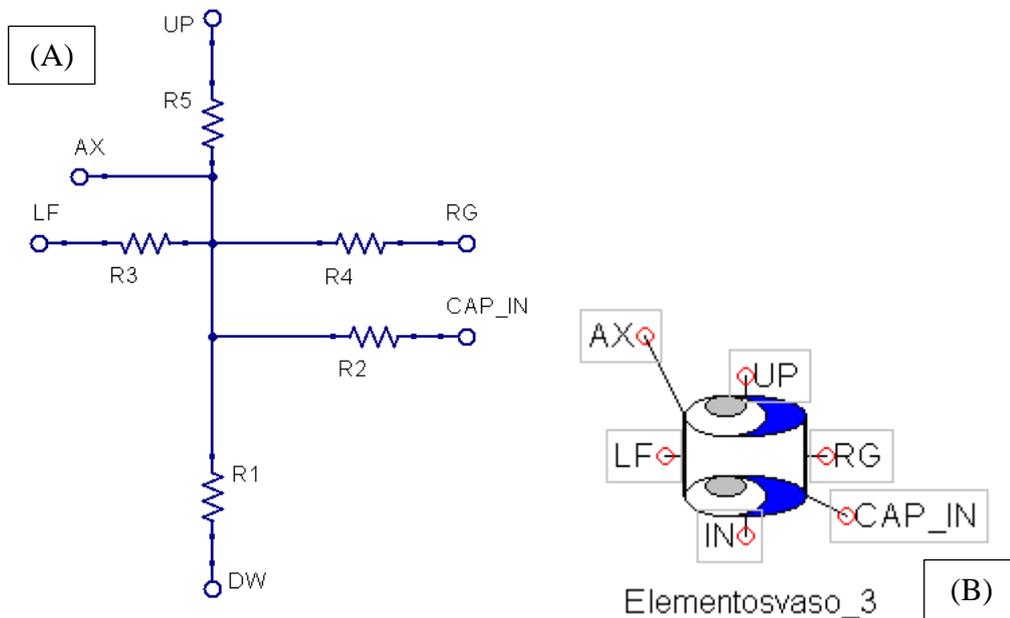
Figura 29. Símbolo representativo da camada intermediária (camada 2).



As portas Xilema_raiz e Xilema_folha permitem a conexão das fontes de potencial hídrico.

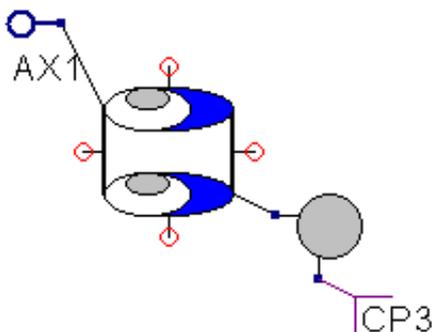
O circuito dos elementos de vaso da camada interna está na Figura 30, e o módulo PVS (com a conexão do parênquima) está na Figura 31.

Figura 30. Circuito dos elementos de vaso da camada interna (A) e seu símbolo representativo (B).



As resistências para entrada e saída de água nos elementos de vaso estão representadas pelos resistores R1 e R5, a resistência de descarregamento associada ao capacitor hídrico variável está representada pelo resistor R2 e as resistências de saída para os elementos de vaso laterais estão representadas pelos resistores R3 e R4. As portas de conexão presentes em cada resistor permitem a conexão com outros módulos PVS. A porta “DW” é a porta para entrada de água, vindo de uma célula abaixo. As portas “UP”, “LF”, “RG” são as portas de conexão para células acima, à esquerda e à direita, respectivamente. As portas “CAP_IN” e a porta “AX” permitem a conexão com o circuito do capacitor hídrico variável e a conexão axial (intercamadas), respectivamente.

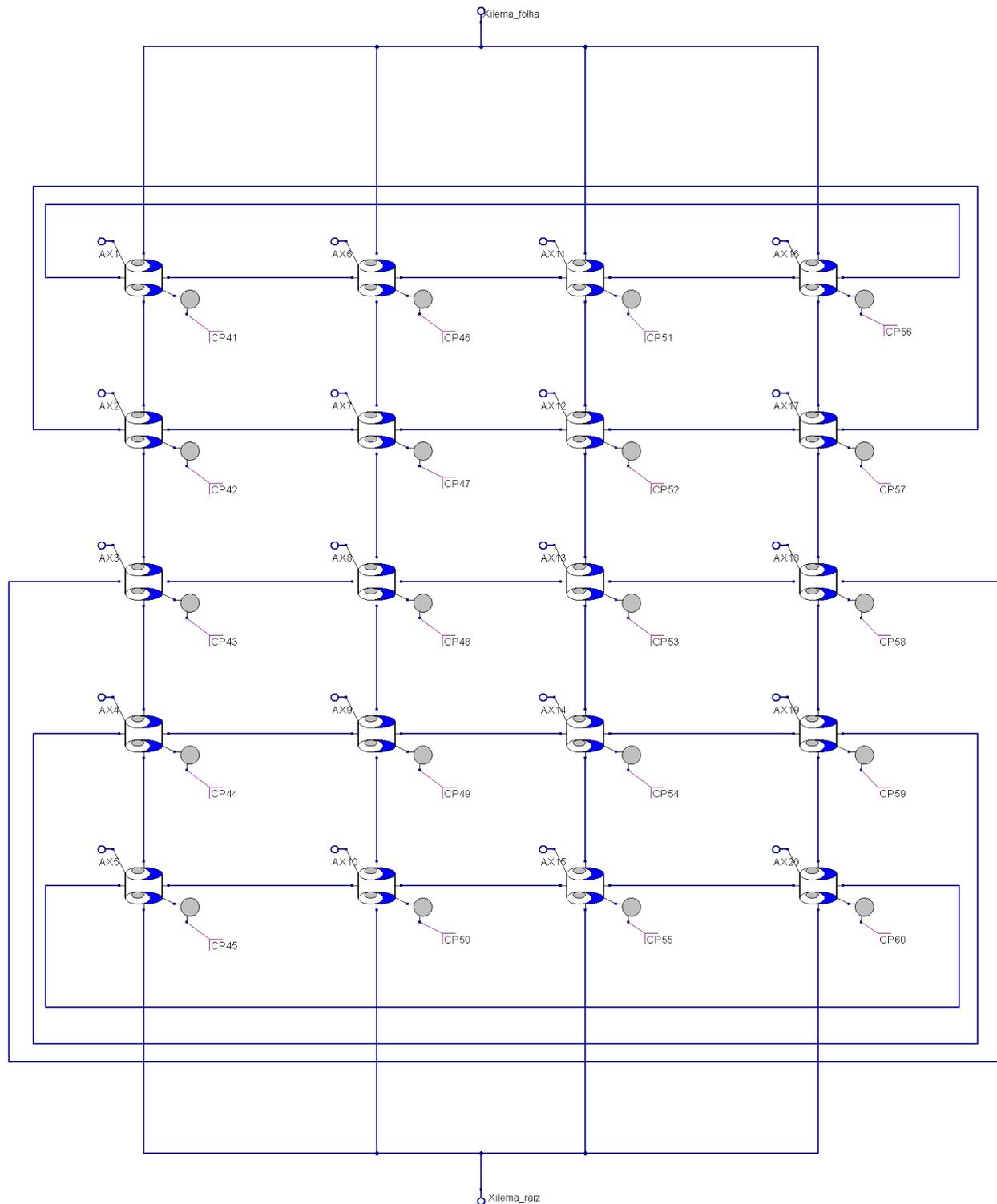
Figura 31. Módulo PVS para a camada interna.



O parênquima foi conectado pela porta “CAP_IN”. “AX1” permite a conexão axial (intercamada) e “CP3” é a sonda do capacitor.

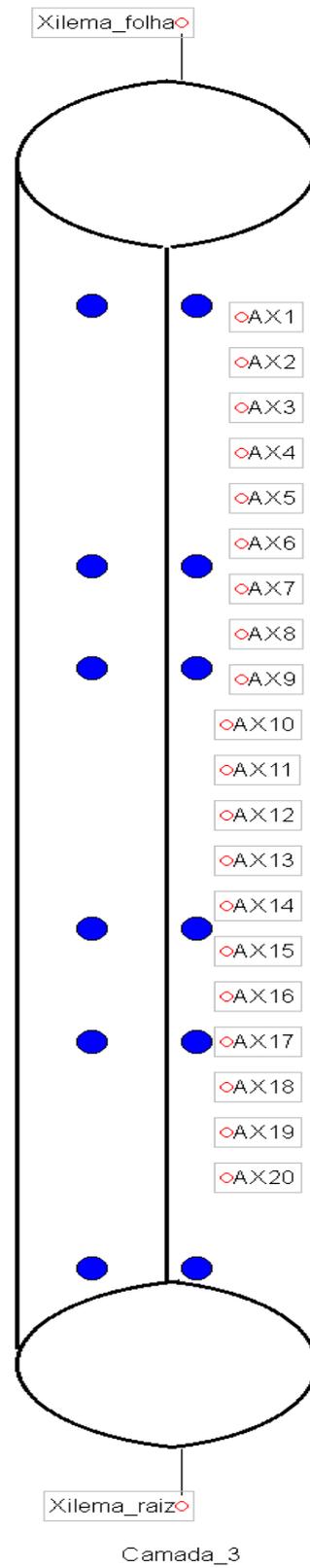
O conjunto da camada interna, com 20 células, está na Figura 32, e seu símbolo representativo está na Figura 33.

Figura 32. Camada interna com módulos PVS.



As portas Xilema_raiz e Xilema_folha permitem a conexão das fontes de tensão.

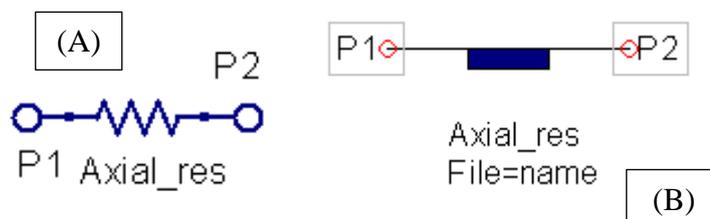
Figura 33. Símbolo representativo da camada interna (camada 3).



As portas Xilema_raiz e Xilema_folha permitem a conexão das fontes de potencial hídrico.

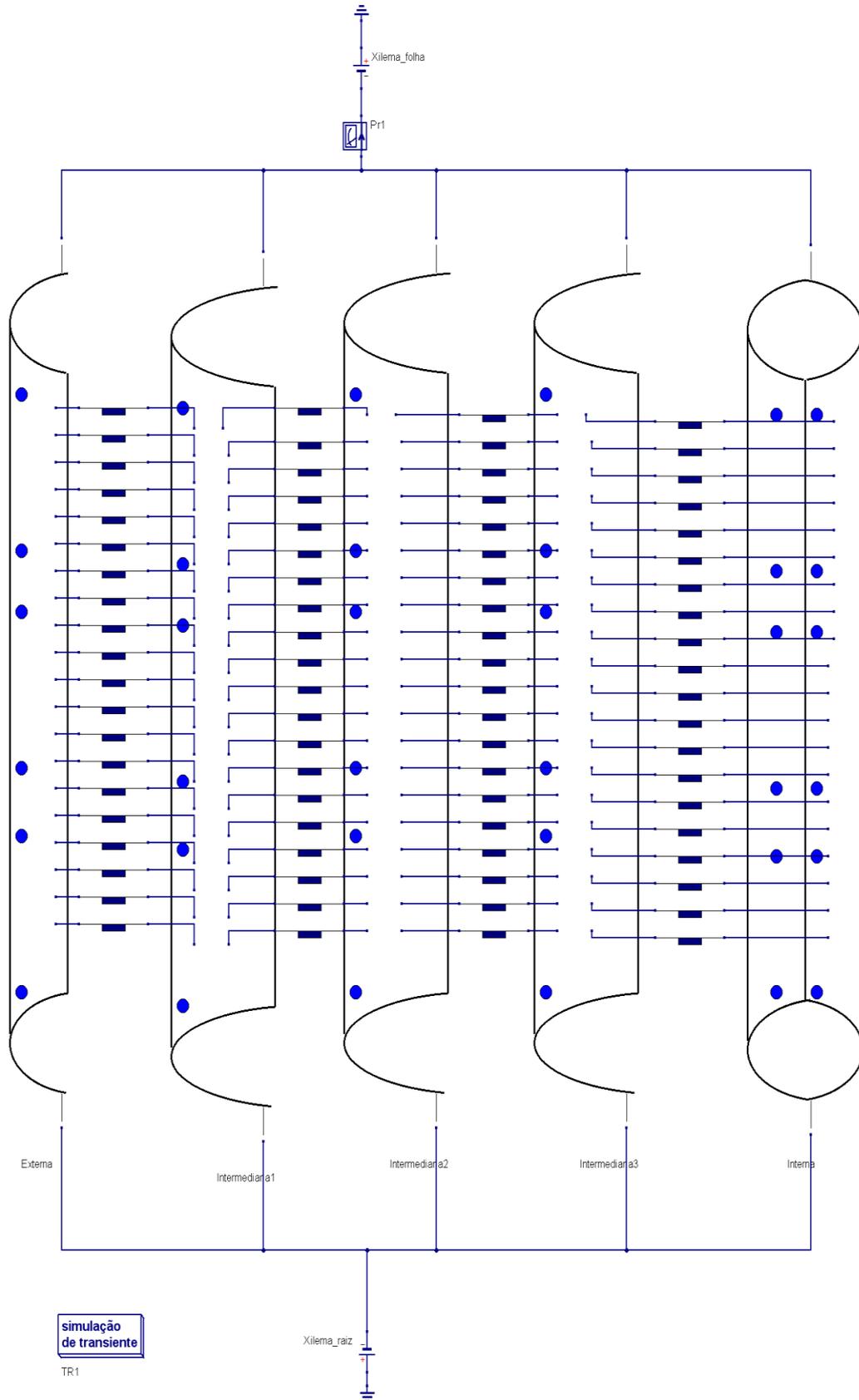
Utilizou-se um resistor para a conexão intercamadas (portas “AX”), conforme a Figura 34.

Figura 34. Resistor intercamadas (A) e seu símbolo representativo (B).



A conexão entre as camadas resultou no circuito para a simulação do fluxo hídrico volumétrico no caule de plantas de feijão (Figura 35). Além da imposição de condição de contorno periódica, este circuito apresenta um grande número de módulos que proporciona um elevado número de ligações (220), dos tipos intracamadas e intercamadas, garantindo assim total comunicação entre as células. Por fim, apresenta portas de conexão para fontes de tensão contínua (regime estacionário), correspondentes aos potenciais do xilema da raiz e da folha e uma ponteira para medição do fluxo *in silico*. Realizou-se um total de 156 simulações do tipo transiente para obtenção de valores constantes dos fluxos no final do intervalo das simulações, que foi de 15 500 segundos (tempo médio entre as duas medições das massas dos lisímetros, no dia da coleta de dados).

Figura 35. Circuito para simulação do fluxo hídrico volumétrico no caule de planta de feijão.



Valores de resistências hídricas

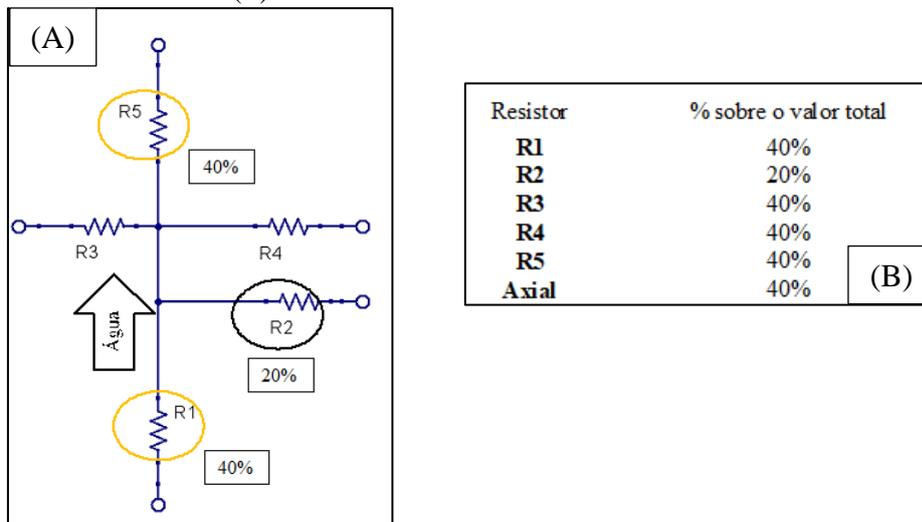
A estratégia utilizada no cálculo das resistências hídricas foi de, primeiramente, calcular a resistência de descarregamento, com base em Gaio (2011), conforme a Equação 16.

$$R_D = \frac{\bar{w}}{f\bar{C}} + \frac{\Delta\psi_{xrf}}{f} \quad \text{Equação 16}$$

Em que R_D é a resistência de descarregamento, em MPa s m⁻³; \bar{w} é o volume médio de água armazenado no caule, por planta, em m³ (obtido pela diferença entre massa úmida e massa seca dos caules); f é o fluxo hídrico volumétrico experimental medido por planta, em m³ s⁻¹; $\Delta\psi_{xrf}$ é a diferença de potencial hídrico entre o xilema da raiz (-0,6 MPa) e o xilema da folha (-0,8 MPa); por fim, \bar{C} é a capacitância média do caule obtida pela razão entre a média de volume de água armazenado por caule (\bar{w}) e a diferença de potencial hídrico entre o xilema da raiz e da folha.

Considerando os valores obtidos para R_D como 20% da resistência total do xilema, estimaram-se os valores das demais resistências como 40% da resistência total (de mesma forma que na seção 4.2). Essa última relação deve-se à consideração dos diferentes caminhos que a água pode realizar nas células, como o exemplo da Figura 36. Somando as resistências decorrentes de um exemplo de caminho hídrico formado pela passagem nos resistores R1 (entrada) e R5 (saída), mais a resistência intrínseca ao descarregamento, dá um total de 100%. Esse exemplo de caminho hídrico e a distribuição de valores em % sobre a resistência total do xilema (100%) estão na Figura 36.

Figura 36. Esquemático com o circuito geral dos elementos de vaso (A) e a partição dos valores de resistências sobre o valor total (B).



Por fim, multiplicou-se por 5 cada resistência do circuito para que a resistência total de um elemento de vaso equivalesse à resistência de 5 células em série. Totalizando uma resistência equivalente à resistência de um conjunto de quinhentas células.

Validação estatística do modelo

Como critério estatístico de validação, de modo a avaliar o grau de ajuste e de proximidade entre os dados de fluxos experimentais e *in silico*, os erros foram medidos por meio das métricas EMA (Erro Médio Absoluto), em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, e EPMA (Erro Percentual Médio Absoluto) em %, conforme as Equações 17 e 18.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^N |S_i - E_i|}{N} \quad \text{Equação 17}$$

$$EPMA = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{S_i - E_i}{E_i} \right|}{N} \times 100 \quad \text{Equação 18}$$

Em ambas as equações, S_i é o valor simulado no QUCS, E_i é o valor experimental e N é o número de observações. Além disso, a correlação entre os dados

foi analisada por meio do coeficiente de correlação dos postos de Spearman (nível de significância de 5%).

Cavitação

Este trabalho tratou o fenômeno da cavitação, no circuito (Figura 36), como sendo a ruptura dos dutos de ligações entre células de mesma ou de camadas diferentes e entre as fontes de tensão e as camadas de células. De modo que cada ruptura nas ligações represente para o caule a propagação de bolha (embolia) na camada de células (não havendo fluxo hídrico volumétrico nessa região). Associaram-se os índices de ligados (IL), que é a porcentagem de ligações, com a porcentagem de perda de condutividade hidráulica (PLC), que é uma estimativa indireta do percentual da cavitação nos vasos do xilema (COCHARD et al., 2000).

A partir do fluxo hídrico com 100% de ligações (IL igual a 1), calculou-se a PLC¹² por meio da Equação 19.

$$PLC = \left(1 - \frac{Fs(IL)}{Fs_{IL=1}}\right) \times 100 \quad \text{Equação 19}$$

Nessa expressão, $Fs(IL)$ é o fluxo simulado correspondente ao circuito com o índice de ligados proposto, $Fs_{IL=1}$ é o fluxo simulado correspondente ao circuito com índice de ligados igual a 1 e PLC é a perda de condutividade hidráulica. Por exemplo, ao simular um fluxo cujo circuito apresente um índice de ligados igual a 0,5 (50%) e que o resultado desse fluxo seja igual à metade do fluxo simulado, desse mesmo circuito com o índice de ligados igual a 1, a PLC nessa situação será de 50%.

Sortearam-se duas plantas com os valores de resistências correspondentes para realizar as simulações do fluxo hídrico volumétrico com índices de ligados variando de 0,5 a 1. Para cada índice de ligados foram sorteados 3 diferentes caminhos de passagem de fluxo e as diferenças entre os valores obtidos nas simulações foram verificadas por meio dos desvios absolutos (em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

¹²Em trabalhos experimentais dentro desse contexto, a PLC é normalmente calculada após a aplicação de técnicas nas quais ramos de plantas são submetidos às diferentes pressões negativas. As curvas de vulnerabilidades são construídas relacionando a perda de condutividade hidráulica do xilema (PLC) às tensões induzidas no xilema.

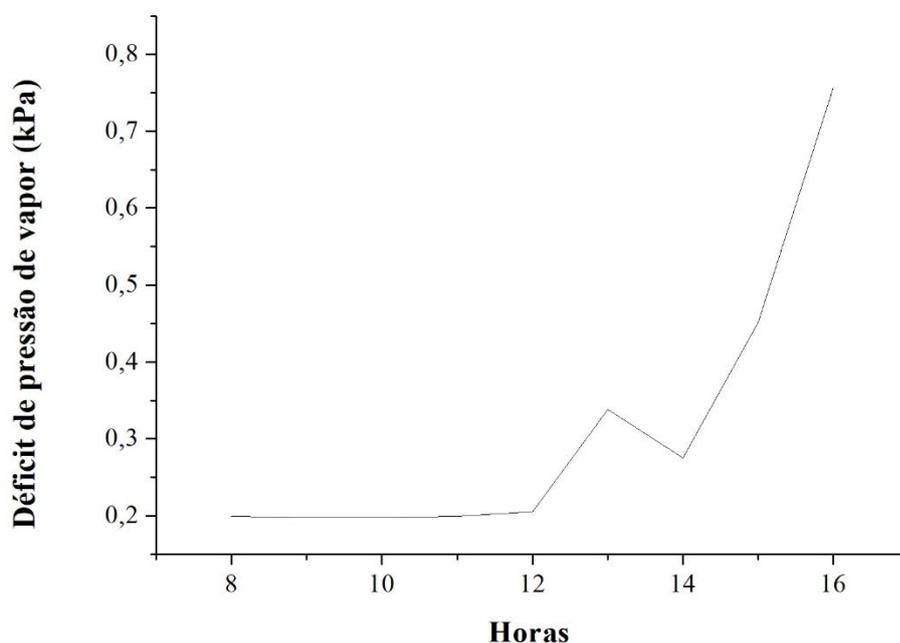
4. Resultados

4.1 Dados experimentais

Caracterização das variáveis meteorológicas

Os elevados valores de umidade relativa do ar, durante o período de medição, implicaram em baixos valores de déficit de pressão de vapor (Figura 37). A demanda evaporativa da atmosfera estava baixa, o que acarretou uma menor atividade da transpiração estomática das plantas (Figura 39). O DPV é uma das variáveis ambientais mais importantes à qual o estômato responde, sendo que quanto maior for a sua magnitude maior será a tendência de a planta perder água (MARRICHI et al., 2009).

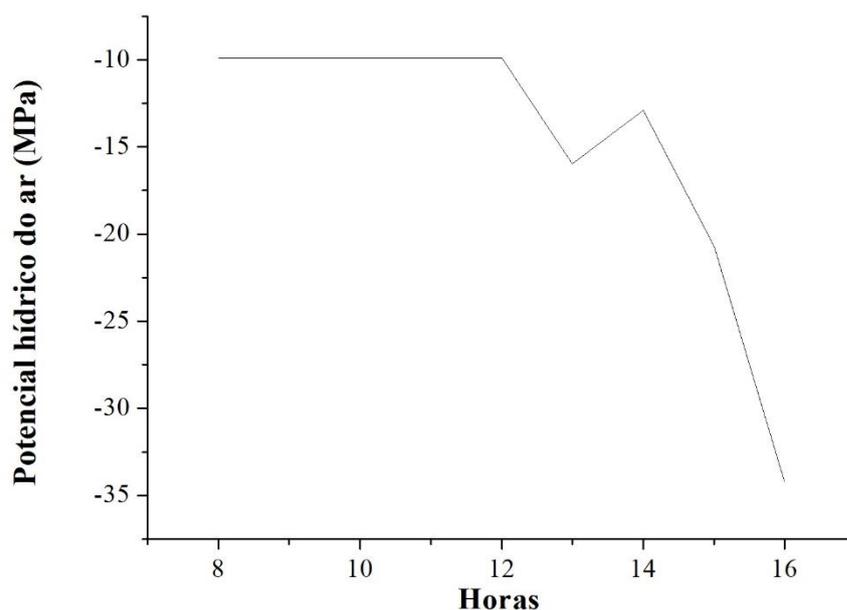
Figura 37. Déficit de pressão de vapor no dia 20 de abril de 2018, das 8 às 16 horas, em Cuiabá-MT.



Os potenciais hídricos do ar (ψ_{ar}) também foram influenciados pela alta umidade presente na atmosfera durante as medições (Figura 38). De mesma forma que o DPV, os valores de ψ_{ar} apresentaram baixa magnitude, não ultrapassando -35 MPa (às 16 horas). A análise do potencial hídrico do ar deve ser feita considerando os valores em módulo, isto é, quanto mais distante de zero maior serão os valores dessa grandeza física e, conseqüentemente, maior será a demanda evaporativa da atmosfera.

Ao comparar o máximo valor de ψ_{ar} (-35 MPa) no dia de medições com o valor apresentado em um dia de seca no município de Cuiabá-MT, esse valor de ψ_{ar} chega a ser seis vezes menor, considerando que esse dia de seca apresentou, em alguma hora, 16% de umidade relativa do ar e 36 °C de temperatura do ar (ROSA, 2020).

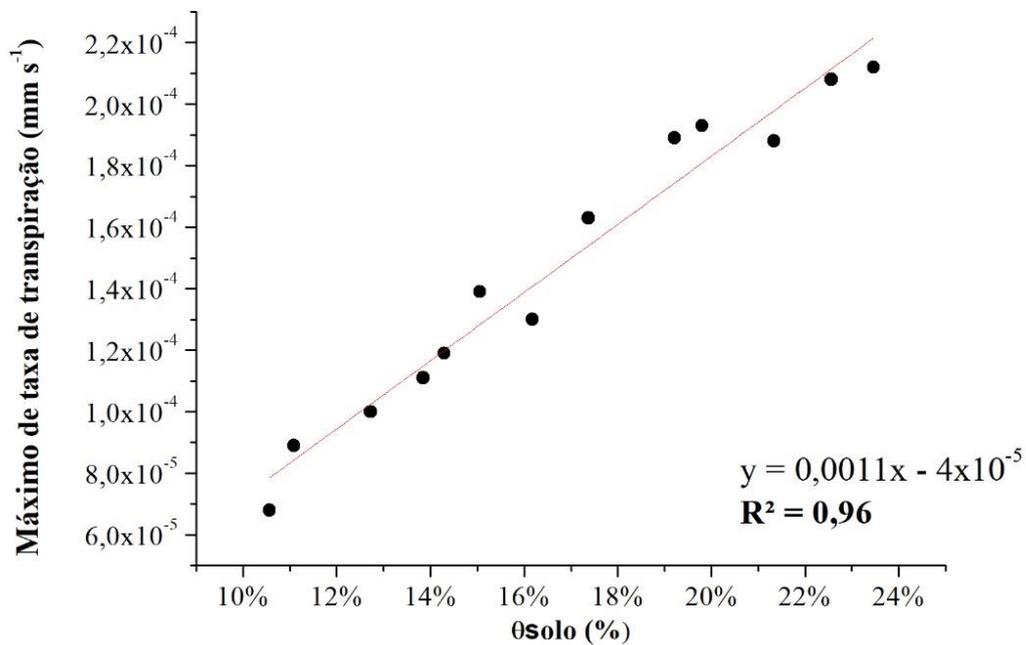
Figura 38. Potencial hídrico do ar no dia 20 de abril de 2018, das 8 às 16 horas, em Cuiabá-MT.



Transpiração

Para a transpiração, conforme a significância dada pela ANOVA (p -valor < 0,05), houve diferença significativa entre os 13 tratamentos. Isto é, as diferentes quantidades de água no solo tiveram influência sobre os valores de transpiração. A transpiração em função da quantidade de água no solo apresentou um comportamento complexo, não sendo possível a separação em regime. Uma curva entre o valor máximo de transpiração por tratamento e a quantidade de água no solo correspondente (Figura 39) obteve um ajuste linear com coeficiente de determinação (R^2) igual a 96%. Isso indica que o crescimento dos valores máximos de transpiração, do tratamento 1 ao tratamento 13, correspondeu de forma proporcional aos acréscimos consecutivos de quantidade de água no solo entre os tratamentos. Estes dados estão em acordo com os resultados de Denmead e Shaw (1962), e indicam que a abertura estomática é fortemente dependente da quantidade de água no solo.

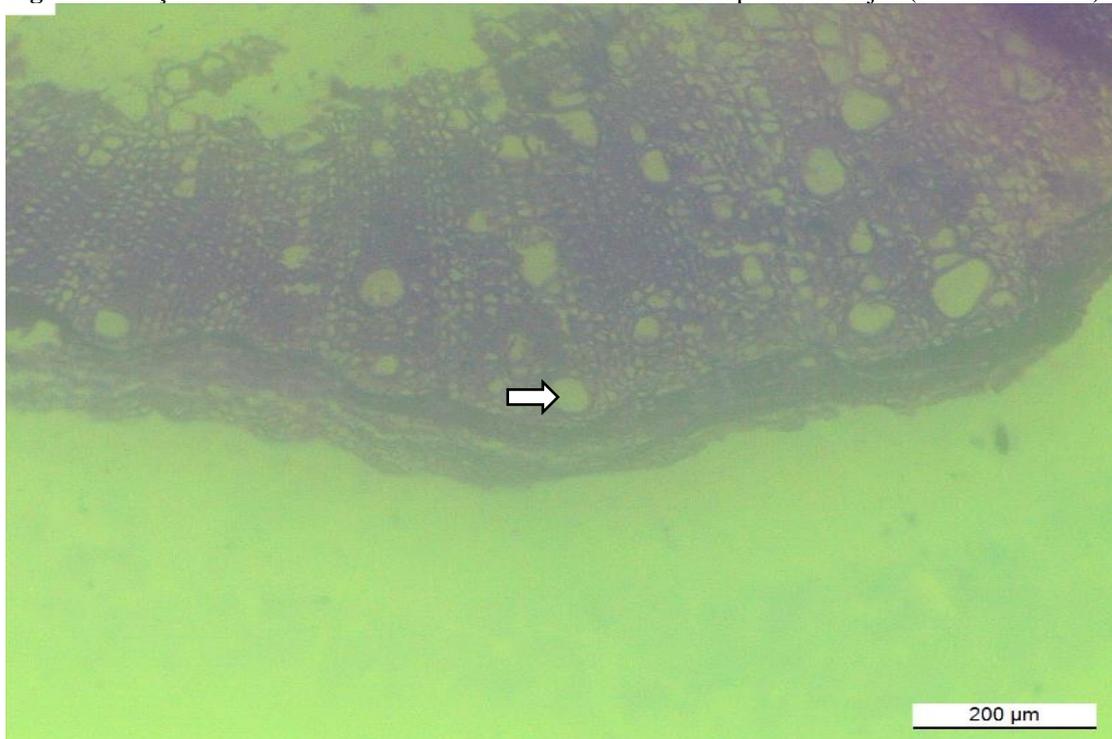
Figura 39. Valores máximos de taxa de transpiração x θ_{solo} (quantidade de água no solo).



Diâmetros de elementos de vaso

Os elementos de vaso apresentaram diâmetro médio de $40,4 \mu\text{m}$ e desvio padrão de $5,8 \mu\text{m}$ (Figura 40).

Figura 40. Seção transversal de elementos de vaso do caule de uma planta de feijão (corte transversal).



Nota-se, na figura, a seta indicando um elemento de vaso. Para auxiliar na identificação dessas células, consultou-se a micrografia obtida por Reis et al. (2011). Esses autores obtiveram fotomicrografia de seção transversal de 7 espécies do gênero *Tachigali Aubl.* (Fabaceae).

Esses valores são menores que os encontrados para diâmetros de elementos de vaso de espécies pertencentes à mesma família do feijão (Fabaceae). Silva et al. (2016), por exemplo, encontraram para a espécie *Andira fraxinifolia* Benth. (Fabaceae) valores médios em torno de 147 e 160 μm . Reis et al. (2011) encontraram para 7 espécies do gênero *Tachigali Aubl.* (Fabaceae) valores em torno de 118,48 μm e 156,20 μm .

Quantidade de água armazenada no caule

Em se tratando da quantidade de água armazenada no caule (Tabela 3), obteve-se diferença significativa entre os grupos, conforme a significância dada pelo teste de U de Mann-Whitney ($p\text{-valor} < 0,05$). A quantidade de água armazenada pelos tratamentos do grupo 2 chegou a ser 40%, em média, maior que as do grupo 1. Considerando o total acumulado por grupo, a diferença entre grupo 2 e grupo 1 foi de 20%. A água armazenada no caule pode auxiliar a planta como uma fonte transitória ou intermediária para a transpiração (SCHOLZ et al., 2011), sendo, assim, uma fonte

interna para esse processo fisiológico. Isto é, a água transpirada pelas plantas pode ter como fonte não só a quantidade de água disponível no solo, mas também a água resultante do processo de armazenamento em várias partes das plantas, estando o caule entre elas (SCHOLZ et al., 2011; KÖCHER et al., 2013).

Tabela 3. Quantidade de água no caule por grupo, em cm³.

Grupos	Tratamento	Quantidade de água por tratamento (cm ³)	Quantidade de água por planta (cm ³)
1 ^A	1	24,1	4,0
	2	27,9	4,7
	3	23,7	4,0
	4	29	4,8
	5	32,6	5,4
	6	40,6	6,8
	7	58,2	9,7
2 ^B	8	42,3	7,1
	9	40,7	6,8
	10	45,2	7,5
	11	53,5	8,9
	12	48,6	8,1
	13	53,5	8,9

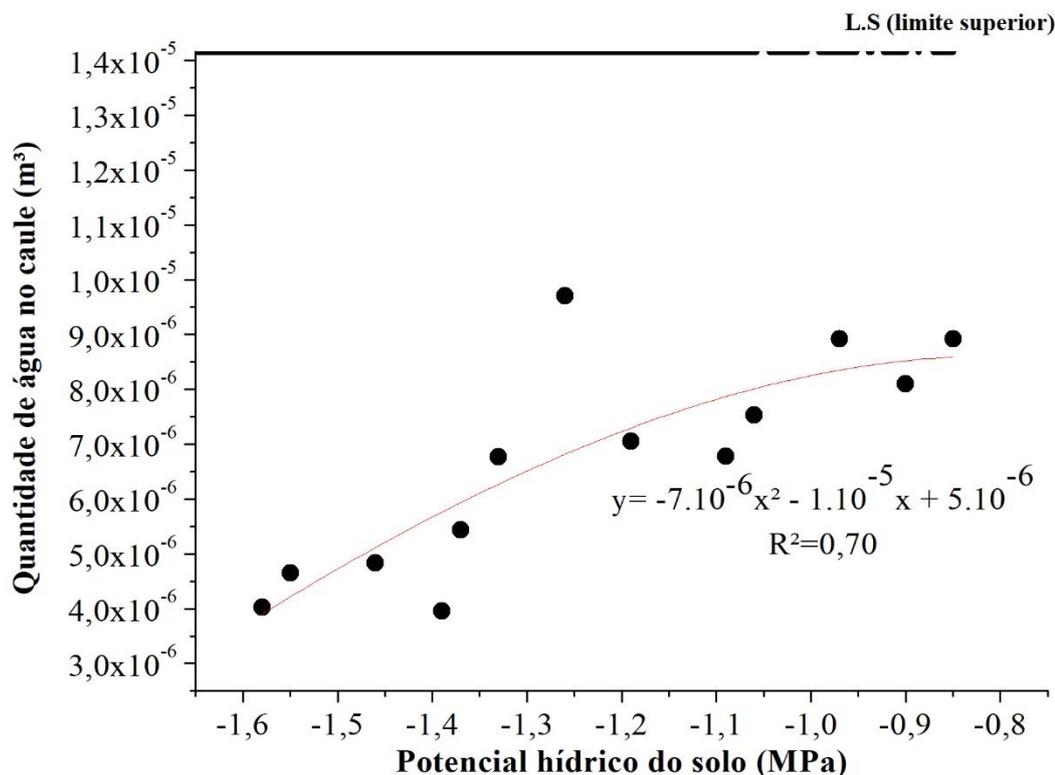
Letras maiúsculas sobre os números indicam diferença significativa entre grupos, conforme significância dada pelo teste de U de Mann-Whitney (p-valor<0,05).

4.2 Capacitância hídrica variável

O ajuste de curva entre os dados de quantidade de água armazenada no caule (m³) e o potencial hídrico do solo (MPa) está na Figura 41. A comparação entre a Equação 14 e a equação de ajuste (Figura 41) permite identificar os valores dos coeficientes considerados. Dessa forma, os valores utilizados¹³ para a expressão da carga (volume) no EDD foram de 5×10^{-6} m³ para w_0 , 1×10^{-5} m³ MPa⁻¹ para C_1 e 7×10^{-6} m³ MPa⁻² para C_2 .

¹³Consideraram-se os valores em módulos, oriundos da equação de ajuste, devido aos coeficientes w_0 e C_1 terem dimensões de volume e de capacitância, respectivamente.

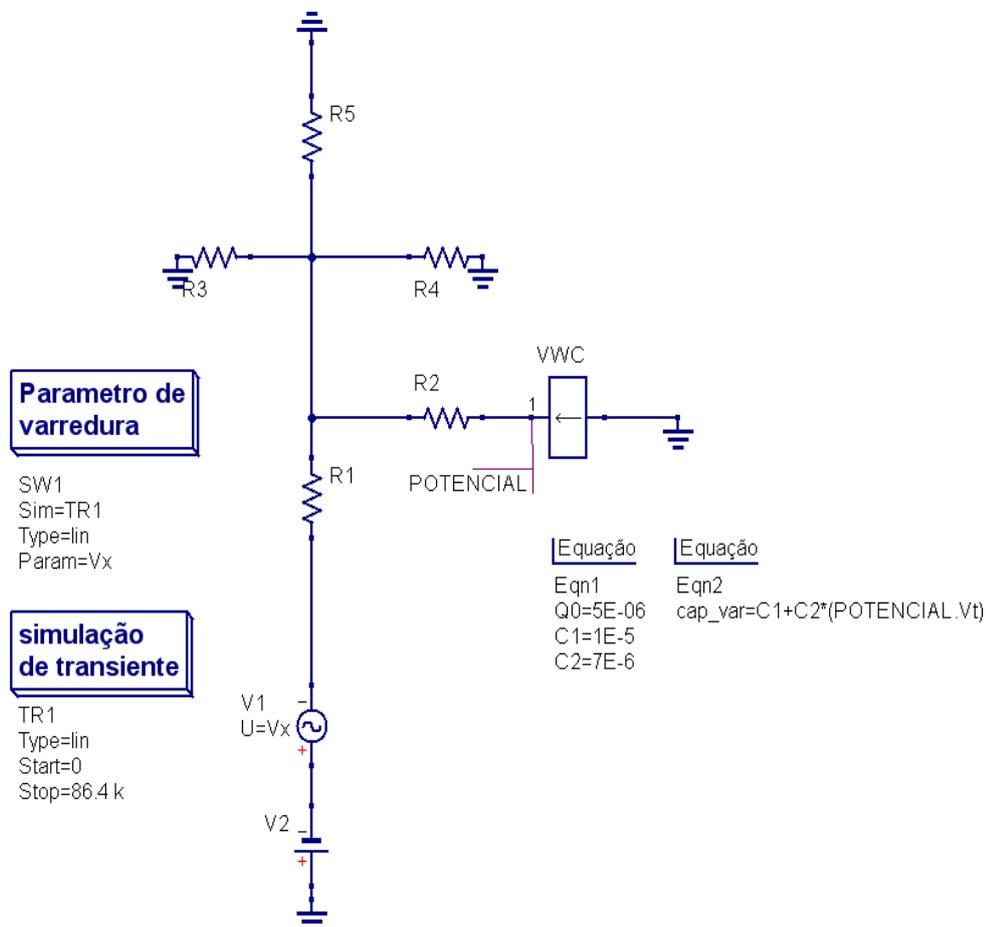
Figura 41. Curva entre quantidade de água no caule (m^3) e potencial hídrico do solo (MPa).



Os potenciais hídricos do solo foram estimados por meio dos valores médios de quantidade de água no solo, através da equação $y=5,66x-2,17$, onde a ordenada é o potencial hídrico e a abscissa é a quantidade média de água solo, por tratamento (%). A faixa de valores obtida foi de -1,58 MPa (tratamento 1) a -0,85 MPa (tratamento 13). Para a quantidade de água armazenada no caule (m^3) foi considerado o valor médio armazenado por planta e por tratamento. Todos os pontos do gráfico estão abaixo do limite superior.

O circuito desenvolvido para a simulação da capacitância hídrica representa um módulo PVS, que é a conexão direta entre um parênquima (lado direito do circuito, VWC e resistor de descarregamento-R2) e um elemento de vaso (lado esquerdo do circuito, resistores-R1, R3, R4 e R5), conforme a Figura 42. Esse circuito é o mesmo que o circuito dos módulos PVS para a simulação do fluxo hídrico volumétrico (seção 3.4), a única diferença é que, neste caso, o parênquima e o elemento de vaso não possuem símbolos representativos. Conectou-se uma sonda para medir o potencial no terminal do capacitor hídrico (descrito pela legenda “POTENCIAL”), que foi utilizado no cálculo da capacitância com a utilização da Equação 11. Essa equação, na Figura 44, está descrita como “Eqn2” e “ $cap_var=C1+C2*(POTENCIAL.Vt)$ ”.

Figura 42. Circuito PVS para simulação da capacitância variável em função da variação do potencial hídrico.



Neste esquemático do QUCS destacam-se os tipos de simulações utilizados: a simulação transiente TR1, com o tempo correspondente de 24 horas (86 400 segundos), e a varredura de parâmetro SW1 para realizar a varredura da tensão alternada (representada pela fonte de tensão alternada). Essa tensão da fonte V1 está descrita como Vx para permitir com que a varredura seja realizada até -0,05 MPa. As resistências para entrada e saída de água nos elementos de vaso estão representadas pelos resistores R1 e R5. A resistência de descarregamento associada ao capacitor hídrico variável está representada pelo resistor R2 e as resistências de saída para os elementos de vaso laterais estão representadas pelos resistores R3 e R4. O valor utilizado na resistência de descarregamento foi igual a 20% da resistência total ($4,03 \times 10^{-8} \text{ MPa s m}^{-3}$) e os valores das resistências dos demais resistores foram iguais a 40% da resistência total ($8,13 \times 10^{-8} \text{ MPa s m}^{-3}$).

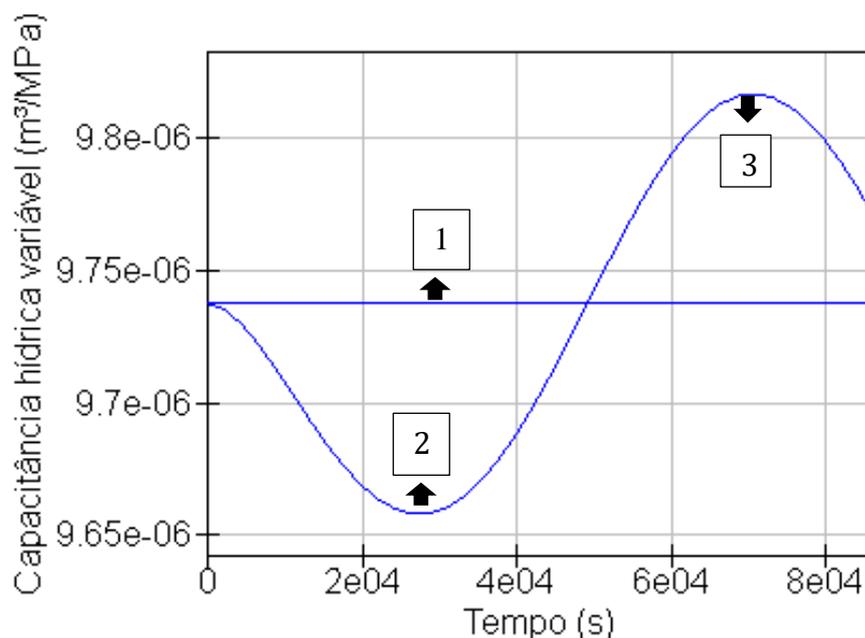
Conforme a Figura 43, foi possível obter duas curvas para duas diferentes situações no tecido xilemático do caule de plantas de feijão: i) um comportamento constante para a capacitância quando a variação da diferença de potencial hídrico no xilema do caule é nula; ii) um comportamento oscilatório para a capacitância quando a variação da diferença de potencial hídrico no xilema do caule é diferente de zero.

Pensando no contínuo solo-planta-atmosfera, em um intervalo de tempo de 24 horas, considerando que não haja reposição de água no solo durante o dia e que o mesmo esteja com quantidade de água próxima à capacidade de campo, é possível discutir um dos motivos que levaria o comportamento descrito por essas curvas na planta.

Quando a variação da diferença de potencial hídrico é igual a zero (número 1 na Figura 43), o volume de água que poderá ser descarregado do caule para atmosfera, por unidade de potencial hídrico, é constante (considerando que haja diferença de potencial entre o xilema do caule e atmosfera).

Quando a variação da diferença de potencial hídrico é diferente de zero, a oscilação na capacitância hídrica do caule seria resultante da diferença entre as taxas de transpiração e de absorção de água pelas raízes. Quando o regime da curva é descendente, até atingir um valor mínimo para a capacitância (número 2 na Figura 43), significa que, nesse momento, a taxa de transpiração da planta é maior que a taxa de captação de água pelo solo. Nessa situação, para o circuito elétrico, considera-se que o capacitor está sendo descarregado até atingir um valor mínimo de quantidade de carga. Quando o regime da curva é ascendente significa que a taxa de transpiração da planta é menor que a taxa de captação de água pelo solo. Essa ascendência acontece até o xilema do caule atingir um valor máximo para a capacitância (número 3 na Figura 43). Nessa situação, para o circuito elétrico, considera-se que o capacitor está sendo carregado até atingir um valor máximo de quantidade de carga. Sendo assim, o resultado obtido pelo modelo desenvolvido neste trabalho concorda com o fato de a anatomia das células xilemáticas impor limites para o armazenamento de água, bem como para o fluxo transpiratório (FRANCO, 2008).

Figura 43. Capacitância hídrica em função da variação do potencial no xilema do caule de plantas de feijão, durante 24 horas (86 400 segundos).



Duas distintas situações estão apresentadas no gráfico. A primeira situação é que, quando a variação da diferença de potencial é nula, a capacitância é uma constante (número 1 sobre a seta de indicação). A segunda situação é que, quando a variação da diferença do potencial é não nula, a capacitância tem um comportamento oscilatório (número 2 e número 3 sobre as setas de indicação), com tempo característico de descarregamento de aproximadamente 7 horas (25 ks).

A variação da capacitância hídrica, no período de 24 horas, pode ser uma das consequências da variação do diâmetro do caule, que é também impulsionada pela mudança do potencial hídrico no xilema (JARVIS, 1975). Um padrão oscilatório para variação do diâmetro do caule, durante um dia, foi encontrado por Fernández e Cuevas (2010), que realizaram medidas experimentais em uma oliveira (“*Manzanilla de Sevilla*”) com utilização de sensor. Além desses autores, Sallo (2017) realizou medidas experimentais do estoque de água armazenada em vegetação de cambrá- *Vochysia divergens*- e também obteve um padrão oscilatório nos dados obtidos. O potencial hídrico do caule é um dos indicadores mais sensíveis às mudanças do estado hídrico da planta, quando, por exemplo, comparado com a condutância estomática. No entanto, as suas medidas não são facilmente automatizadas (MORIANA e FERERES, 2002; FERNÁNDEZ e CUEVAS, 2010). Dessa forma, o modelo mostrou ter capacidade de explicar, não apenas o essencial, mas também pormenores significativos do comportamento das variáveis hídricas do caule das plantas vasculares.

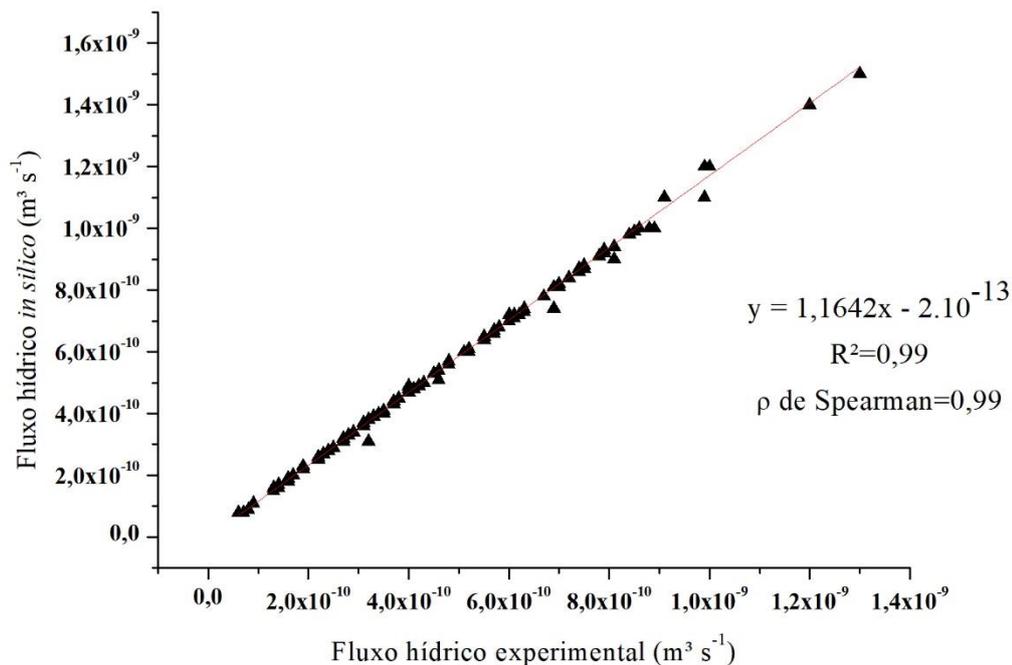
4.3 Fluxo hídrico volumétrico *in silico*

Os valores de média, máximo e mínimo das resistências de descarregamentos utilizados nas simulações foram, respectivamente, $3,87 \times 10^9$ MPa s m⁻³, $1,87 \times 10^{10}$ MPa s m⁻³ e $2,01 \times 10^8$ MPa s m⁻³. Para os demais resistores os valores foram $7,74 \times 10^9$ MPa s m⁻³ (média), $3,74 \times 10^{10}$ MPa s m⁻³ (máximo) e $4,03 \times 10^8$ MPa s m⁻³ (mínimo).

Os valores de fluxos hídricos volumétricos simulados pelo QUCS apresentaram um comportamento semelhante aos dados experimentais, tendo a mediana e média, entre todos os tratamentos, em torno de 5×10^{-10} m³ s⁻¹ e 6×10^{-10} m³ s⁻¹, respectivamente. Os valores experimentais mantiveram mediana e média em torno de 4×10^{-10} m³ s⁻¹ e 5×10^{-10} m³ s⁻¹, respectivamente. Os valores máximos obtidos foram em torno de $1,5 \times 10^{-9}$ m³ s⁻¹ (simulação *in silico*) e $1,3 \times 10^{-9}$ m³ s⁻¹ (dados experimentais) e, os mínimos, em torno de 1×10^{-10} m³ s⁻¹ (tanto para a simulação *in silico* quanto para os dados experimentais). Os valores das métricas estatísticas confirmam essa proximidade entre o resultado do modelo e o resultado observado experimentalmente, com EMA igual a $8,86 \times 10^{-11}$ m³ s⁻¹ e EPMA igual a 17%.

Além disso, obteve-se uma alta correlação entre os dados (Figura 44), com ρ de Spearman igual a 0,99 e coeficiente de determinação (R²) igual a 99%, estando acima da correlação obtida pelo circuito tridimensional das angiospermas, conforme a seção 2.4. Sobretudo, esse resultado significa que o circuito apresentou sensibilidade à mudança dos valores de resistências, confirmando, portanto, a boa adequação das equações utilizadas nos cálculos das resistências de descarregamento e dos valores de potencial hídrico constantes sobre o circuito desenvolvido. Pereira (2016) e Rosa (2020), em desenvolvimento de diferentes análogos hídrico-elétricos para a dinâmica hídrica do estômato e da estrutura foliar, também encontraram concordâncias (fortes correlações) entre os dados medidos e os dados *in silico*, o que também corrobora com o resultado obtido neste trabalho.

Figura 44. Correlação entre os dados de fluxo hídrico volumétrico experimental e fluxo hídrico volumétrico *in silico* (simulados no QUCS), em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.



4.4 Cavitação *in silico*

A relação entre o índice de ligados e a perda de condutividade hidráulica calculada por meio da Equação 19 está na Tabela 4.

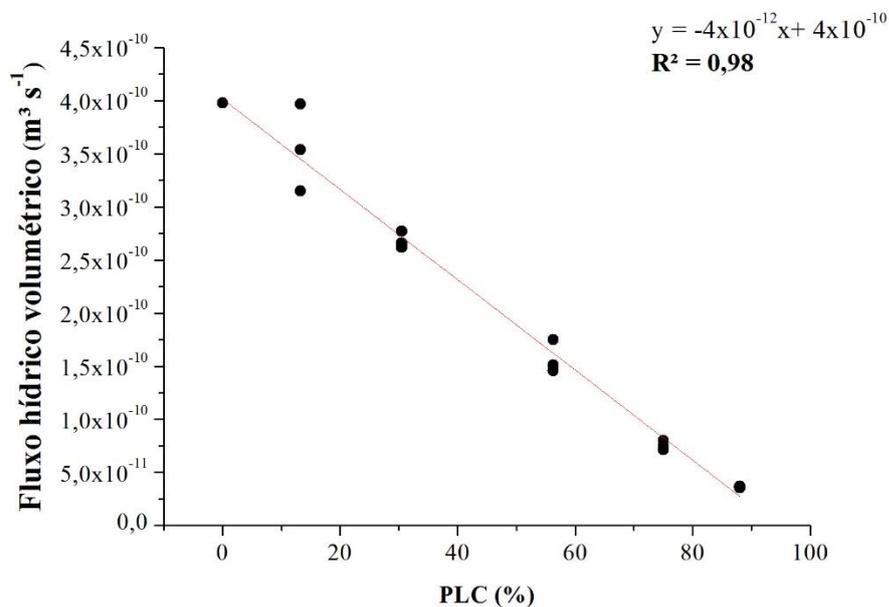
Tabela 4. Relação entre o índice de ligados e a perda de condutividade hidráulica.

Relação índice de ligados x PLC					
Índice de ligados	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
PLC (%)	13	30	56	75	88

A PLC refere-se a média da perda do fluxo hídrico simulado com os dados de resistência das duas plantas sorteadas (A1,1 e A10,5) em relação ao fluxo hídrico máximo, isto é, com 0% de PLC (ou índice de ligados igual a 1).

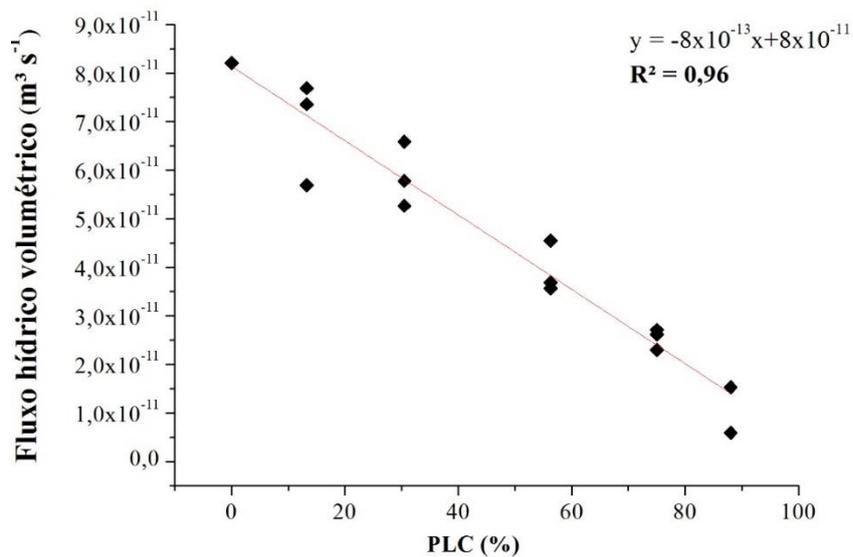
Com o aumento do número de ligações interrompidas no circuito, o valor do fluxo simulado decresceu até atingir um mínimo (PLC próximo de 90%). Os resultados obtidos pelo QUCS, a cada ruptura proposta, mostraram que o sistema de equações reduzia em complexidade, com um aumento, todavia, considerável na resistência equivalente, acarretando diminuição do fluxo hídrico (análise por meio da 1ª Lei de Ohm). Obteve-se uma tendência linear para a queda dos fluxos, com coeficientes de determinação iguais a 98% e 96%, conforme as Figuras 45 e 46.

Figura 45. Tendência de queda do fluxo hídrico volumétrico conforme a diminuição da PLC.



Este resultado refere-se aos valores de fluxos simulados para o caule da planta A10,5, que foi sorteada dentro do conjunto total de plantas.

Figura 46. Tendência de queda do fluxo hídrico volumétrico conforme a diminuição da PLC.



Este resultado refere-se aos valores de fluxos simulados para o caule da planta A1,1, que foi sorteada dentro do conjunto total de plantas.

As diferentes geometrias do caminho percorrido pela água também influenciaram nos valores finais do fluxo hídrico. Isto é, para um mesmo valor de PLC (%) obtiveram-se diferentes valores de fluxo, conforme as Tabelas 5 e 6, onde estão os desvios absolutos entre os valores obtidos pelas 3 simulações com os 3 diferentes caminhos adotados (um exemplo dos caminhos diferentes para a passagem de água, na camada externa, está nas Figuras 47, 48 e 49). Um aumento na resistência em um conjunto de elementos de vaso, quando cavitados, pode ser resultado da não passagem de água pelas placas de perfuração (que, nessa situação, estão obstruídas). Isto é, se a passagem de água em conjunto de células adjacentes, se der de maneira lateral em boa parte do trajeto (até chegar à folha), o fluxo hídrico sofrerá maior imposição devido às pontoações laterais apresentarem menores diâmetros que às placas de perfuração (TAIZ et al., 2017). A interferência de diferentes rotas sobre o valor final do fluxo hídrico também já foi investigada em uma outra parte do contínuo SPA. Siqueira (2014) desenvolveu um modelo elétrico à dinâmica hídrica nas raízes de plantas de milho e de algodão e obteve diferenças entre os fluxos hídricos oriundos de rotas, no caso, apoplástica e simplástica. Nessa situação, diferentemente deste trabalho, a autora utilizou para as duas rotas valores diferentes das propriedades dos circuitos.

Tabela 5. Desvio absoluto entre os fluxos simulados no caminho 1, caminho 2 e caminho 3, para cada perda de condutividade hidráulica (PLC), referente ao caule da planta A1,1.

PLC (%)	0	13	30	56	75	88
D.A(c.1-c.2)	0	$3,30 \times 10^{-12}$	$8,10 \times 10^{-12}$	$8,60 \times 10^{-12}$	$9,00 \times 10^{-13}$	0
D.A(c.2-c.3)	0	$2,00 \times 10^{-11}$	$5,10 \times 10^{-12}$	$1,20 \times 10^{-12}$	$3,20 \times 10^{-12}$	$9,38 \times 10^{-12}$

Legendas: PLC (%) é a perda de potencial hídrico, D.A (c.1-c.2) é o desvio absoluto, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, entre os fluxos no caminho 1 e no caminho 2 e D.A (c.2-c.3), em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, é o desvio absoluto entre os fluxos no caminho 2 e no caminho 3.

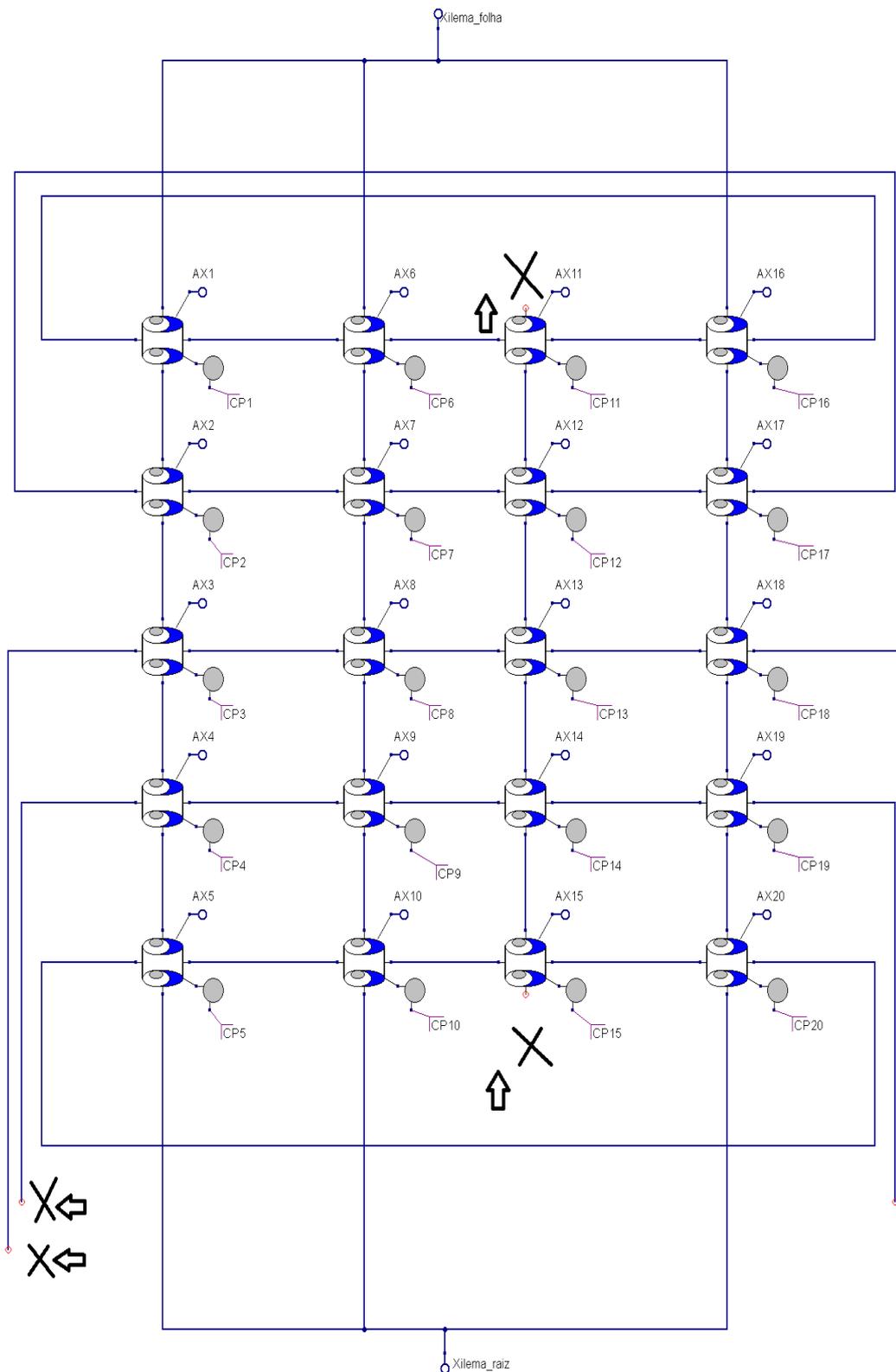
Tabela 6. Desvio absoluto entre os fluxos simulados no caminho 1, caminho 2 e caminho 3, para cada perda de condutividade hidráulica (PLC), referente ao caule da planta A10,5.

PLC (%)	0	13	30	56	75	88
D.A(c. 1-c. 2)	0	$8,20 \times 10^{-11}$	$1,10 \times 10^{-11}$	$2,40 \times 10^{-11}$	$8,50 \times 10^{-12}$	$1,10 \times 10^{-12}$
D.A(c. 2-c.3)	0	$4,30 \times 10^{-11}$	$4,00 \times 10^{-12}$	$2,90 \times 10^{-11}$	$4,70 \times 10^{-12}$	$8,00 \times 10^{-13}$

Legendas: PLC (%) é a perda de potencial hídrico, D.A (c.1-c.2) é o desvio absoluto, em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, entre os fluxos no caminho 1 e no caminho 2 e D.A (c.2-c.3), em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, é o desvio absoluto entre os fluxos no caminho 2 e no caminho 3.

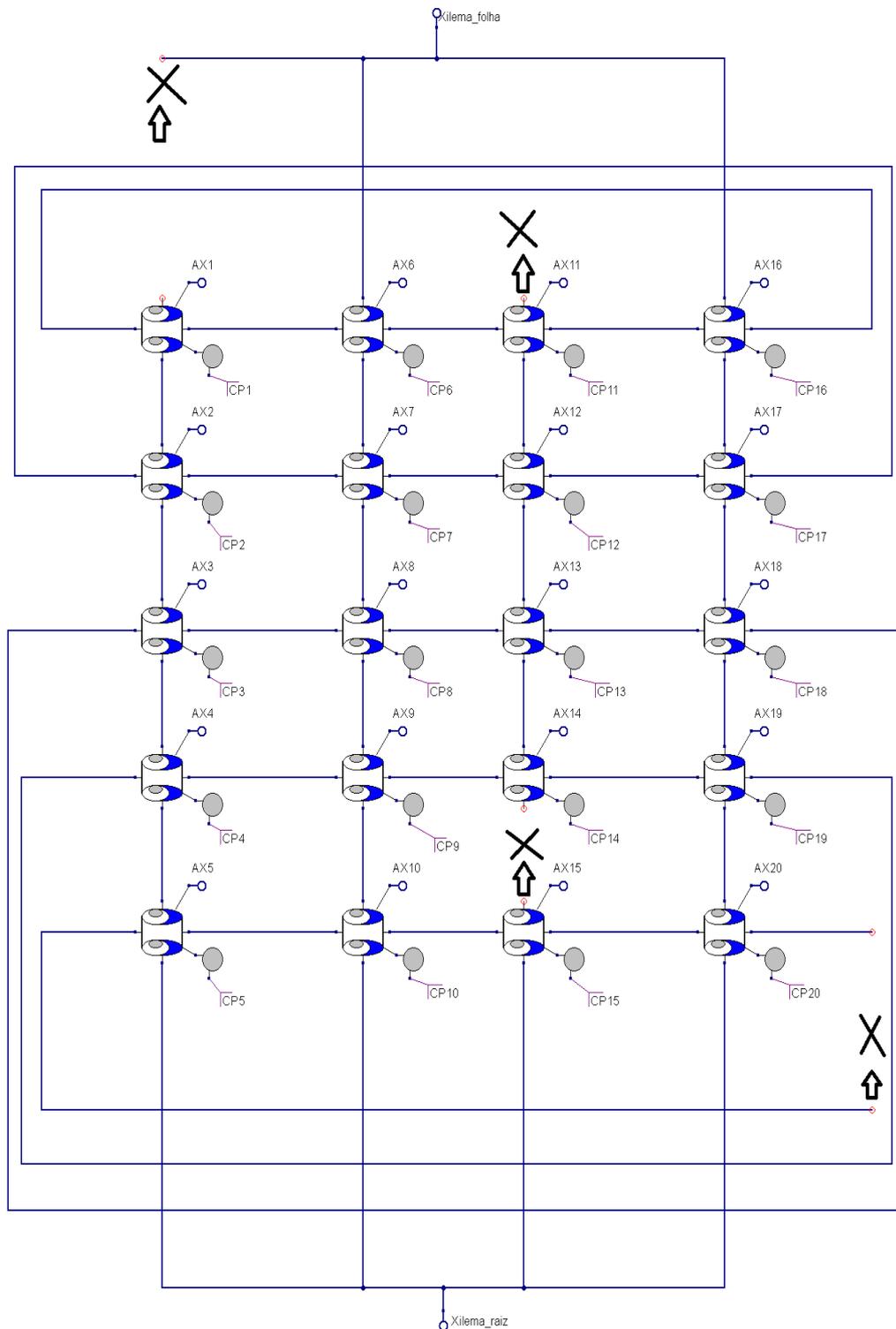
Nas Figuras 47, 48 e 49 têm-se os circuitos da camada externa com 3 diferentes caminhos para passagem do fluxo. Para o circuito elétrico, a ligação entre a fonte de potencial e as camadas de células mostrou ser imprescindível para a regulação do fluxo elétrico, a ruptura dessa ligação, tanto no início ou no término do circuito, contribuiu mais significativamente para o decaimento do fluxo do que a ruptura das ligações entre células. Na planta, essas regiões seriam mais próximas à raiz e à folha. Esse resultado concorda com os encontrados nos circuitos desenvolvidos nos trabalhos anteriores, o que consolida a modelagem análoga hídrico-elétrica como uma técnica que pode obter resultados qualitativos do efeito da embolia sobre a dinâmica hídrica.

Figura 47. Caminho 1 para o fluxo hídrico na camada externa.



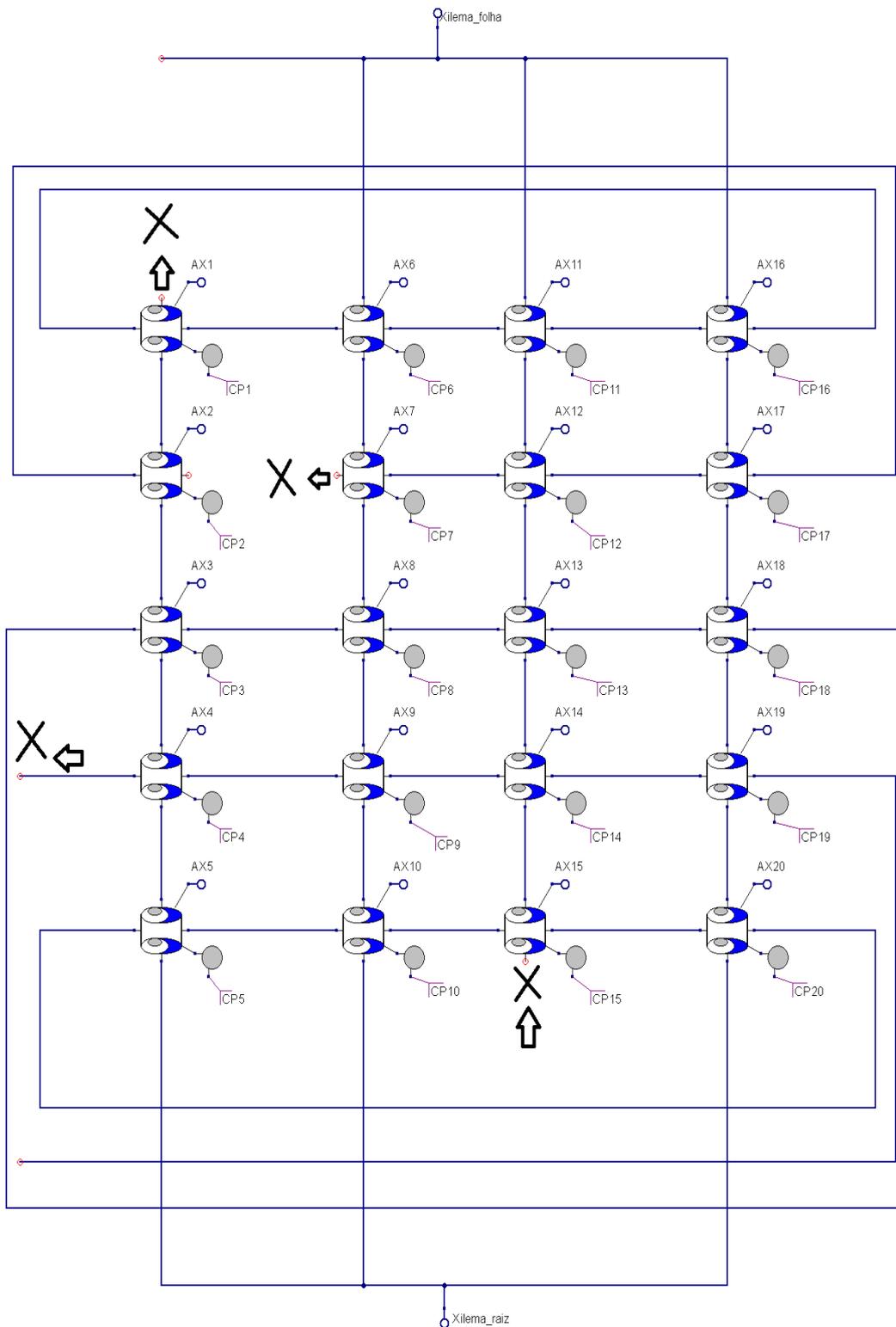
Este exemplo refere-se à camada externa na primeira simulação do fluxo hídrico volumétrico (1º caminho), para uma PLC de 13%, com os dados de resistência do caule da planta A10,5 (sorteada dentro do conjunto total de plantas).

Figura 48. Caminho 2 para o fluxo hídrico na camada externa.



Este exemplo refere-se à camada externa na primeira simulação do fluxo hídrico volumétrico (2º caminho), para uma PLC de 13%, com os dados de resistência do caule da planta A10,5 (sorteada dentro do conjunto total de plantas).

Figura 49. Caminho 3 para o fluxo hídrico na camada externa.



Este exemplo refere-se à camada externa na primeira simulação do fluxo hídrico volumétrico (3º caminho), para uma PLC de 13%, com os dados de resistência do caule da planta A10,5 (sorteada dentro do conjunto total de plantas).

5. Conclusão

Em experimento desenvolvido em Cuiabá-MT, obteve-se um conjunto de dados experimentais de fluxo hídrico volumétrico e de armazenamento hídrico em caules de plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), submetidas a 13 diferentes quantidades de água no solo. Com isso, os objetivos específicos propostos “a” e “b” foram atendidos.

Os valores de déficit de pressão de vapor (DPV) e de potencial hídrico do ar, calculados para o dia de medições, caracterizaram a demanda evaporativa da atmosfera com sendo baixa. A análise da curva obtida para taxa de transpiração versus quantidade água no solo deu-se pela consideração do valor máximo de transpiração de cada tratamento, sendo uma reta o melhor ajuste entre esses dados ($R^2=96\%$). Isto é, o crescimento dos valores máximos de transpiração, do tratamento 1 ao tratamento 13, correspondeu de forma proporcional aos acréscimos consecutivos de quantidade de água no solo entre os tratamentos, concordando assim como os resultados de Denmead e Shaw (1962), os quais indicam uma forte dependência da abertura estomática com a quantidade de água no solo.

Quanto ao armazenamento de água no caule, obtiveram-se os maiores valores para as plantas dos tratamentos com maiores quantidades de água no solo, o que era um resultado esperado. A diferença de quantidade de água armazenada entre grupos foi de 20%. Foi possível utilizar esses dados na calibração do modelo, calculando, a partir deles, os valores de resistências e para o tratamento da capacitância hídrica variável, o que atendeu o objetivo específico proposto “d”.

Quanto à modelagem, os resultados obtidos pelos três diferentes cenários *in silico* construídos responderam os objetivos específicos propostos “c”, “e”, “f” e “g”.

No primeiro cenário, o modelo da capacitância hídrica do caule como função da variação do potencial hídrico foi desenvolvido com a utilização do dispositivo não linear EDD (Dispositivo Definido por Equação). Foi possível expandir o volume (carga) do capacitor por meio de uma série polinomial de grau 2. Dois comportamentos foram apresentados para a capacitância. O primeiro, uma constante, quando a variação da diferença de potencial hídrico no caule é nula, e, o segundo, uma oscilação, quando a variação da diferença do potencial hídrico do caule é diferente de zero. Esse efeito

da capacitância configura-se como uma das consequências da variação radial do caule, ou de modo geral, da dinâmica do estoque do armazenamento de água, que também apresentam comportamento oscilatório em relação ao tempo (intervalo de 24 horas).

No segundo cenário, a configuração tridimensional com 100 módulos PVS (Sistema Parênquima-Elemento de Vaso) e resistência equivalente a 500 elementos de vaso, desenvolvida para a simulação do fluxo hídrico no caule, apresentou resposta positiva quanto à funcionalidade, manuseio e sensibilidade às mudanças de valores das propriedades dos circuitos. Com o arranjo desse conjunto de células (subdividido em 5 camadas), cuja extensão permitiu a realização de 156 simulações, foi possível chegar em resultados de fluxos hídricos volumétricos próximos aos medidos experimentalmente. Os dados simulados foram validados com a obtenção de uma alta correlação (ρ de Spearman igual a 0,99) e pela análise do erro dado pelas métricas estatísticas EMA (Erro Médio Absoluto) e EPMA (Erro Percentual Médio Absoluto), que foram, respectivamente, iguais a $8,75 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e 17%. Além disso, a alta correlação obtida confirma a boa adequação dos dados experimentais quanto à aplicação no circuito e das relações propostas para as divisões das resistências, em função da resistência total do xilema.

No terceiro cenário, relacionou-se o índice de ligados, que foi definido em trabalhos anteriores no contexto da analogia hídrico-elétrica do caule, com a perda de condutividade hidráulica do xilema (PLC) por meio de uma função linear. A tendência de queda de fluxo foi linear ($R^2=98\%$ e $R^2=96\%$). As diferentes geometrias das rotas de água, nas camadas, levaram a diferentes valores de resistências equivalentes que, como consequência, influenciaram nos valores finais do fluxo hídrico.

Esses resultados solidificam e potencializam a modelagem hídrico-elétrica como uma técnica eficiente de estudo da dinâmica hídrica no caule, em especial, sobre os efeitos dos fenômenos ocorrentes ao nível celular no tecido xilemático, como as variações no estoque de água (variação de potencial hídrico) e a cavitação.

Pretende-se em trabalhos futuros medir a PLC no xilema de plantas de feijão, principalmente, para verificar se há semelhança entre o valor experimental de pressão que acarreta perda de 50% de condutividade e o valor simulado pelo modelo, *a posteriori*. Esse é um importante ponto que pode trazer informações sobre a margem

de segurança hidráulica da espécie *Phaseolus vulgaris* L. Outra sugestão futura é de verificar a influência de diferentes valores de C_2 sobre o modelo.

6. Referências bibliográficas

ALMEIDA, M.; ALMEIDA, C.V. Morfologia da raiz de plantas com sementes. **Coleção Botânica**, 1, 2014.

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.

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.

BARBOSA, L. A. **Limite crítico do potencial hídrico da soja durante os estádios vegetativo e reprodutivo**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

BRINSON, M. Qucs: A Tutorial Component compact device and circuit modeling using symbolic equations. 2007. Disponível em <http://qucs.sourceforge.net/docs/tutorial/equations.pdf>. Acessado em fevereiro de 2019.

BRODRIBB, T. J. Xylem hydraulic physiology: the functional backbone of terrestrial plant productivity. **Plant Science**, v. 177, n. 4, p. 245-251, 2009.

CARLQUIST, S. Living cells in wood. 1. Absence, scarcity and histology of axial parenchyma as keys to function. **Botanical journal of the Linnean Society**, v. 177, n. 3, p. 291-321, 2015.

CHOAT, B.; JANSEN, S.; BRODRIBB, T. J.; COCHARD, H.; DELZON, S.; BHASKAR, R.; BUCCI, S. J.; FIELD, T. S.; GLEASON, S. M.; HACKE, U. G.; JACOBSEN, A. L.; LENS, F.; MAHERALI, H.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; MAYR, S.; MENCUCCINI, M.; MITCHELL, P. J.; NARDINI, A.; PITTERMANN, J.; PRATT, R. B.; SPERRY, J. S.; WESTOBY, M.; WRIGHT, I. J.; ZANNE, A. E. 2012. Global convergence in the vulnerability of forest to drought. **Nature**, 491: 752-756.

CLAESSEN, M.E.C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997.

COCHARD, H.; BODET, C.; AMEGLIO, T.; CRUIZIAT, P. Cryo-scanning electron microscopy observations of vessel content during transpiration in walnut petioles. Facts or artifacts? **Plant Physiology**, Waterbury, v.124, p.1191-1202, 2000.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, v. 7 - Safra 2019/20, n.9 - Nono levantamento, 2020.

DINIZ, B.M. **Relações hídricas e morfo-anatomia do caule em pares congêneros do cerrado e mata de galeria: um estudo comparativo**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Botânica)-Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

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.

DIXON H. H.; JOLY J. On the ascent of sap. Phil. Trans. Royal Society of 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.

EWERS, F. W.; CRUIZIAT, P. Measuring water transport and storage. **Techniques and approaches in forest tree ecophysiology**. JP Lassoie and TM Hinckley (editors). CRC Press, Boca Raton, Fla, p. 91-116, 1991.

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.

FRANCO, A. C. Relações hídricas em plantas do Cerrado: as plantas lenhosas do Cerrado transpiram livremente? In: PRADO, C. H. B. A.; CASALI, C. A. Fisiologia Vegetal: práticas em relações hídricas, fotossíntese e nutrição mineral. **Barueri, Editora Manole**, 2008. p.1-11.

FERNÁNDEZ, J.; CUEVAS, M. Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 150, n. 2, p. 135-151, 2010.

FERNÁNDEZ DE CÓRDOVA, F.; GEPTS, P. L.; LÓPEZ GENES, M. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 1986. 34p.

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.

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

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.

HUNT, JR, E. R.; RUNNING, S. W.; FEDERER, C. Anthony. Extrapolating plant water flow resistances and capacitances to regional scales. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 54, n. 2-4, p. 169-195, 1991.

JARVIS, P. G. Water transfer in plants. **Heat and mass transfer in the biosphere.**, p. 369-394, 1975.

JOHANSEN, D. A. 1940. *Plant Microtechnique*. 1st ed. **Mc Graw Hill Company**, 503 p.

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

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

KING, G.; FONTI, P.; NIEVERGELT, D.; BÜNTGEN, U.; FRANK, D. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6 c natural warming gradient. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 168, p. 36–46, 2012.

KRAUS, J.E.; ARDUIN, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Rio de Janeiro: Edur, 1997.

KÖCHER, P. I.; HORNA, V.; LEUSCHNER, C. Stem water storage in five coexisting temperate broad-leaved tree species: significance, temporal dynamics and dependence on tree functional traits. **Tree physiology**, v. 33, n. 8, p. 817-832, 2013.

LACERDA, C. F. Relações solo-água-plantas em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro. **Recife, PE, UFRPE. 78p**, 2007.

LAMBERS, H. **Plant physiological ecology**. Berlin: Springer, 1998.

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

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.

LI, Y.; SPERRY, J. S.; SHAO, M. Hydraulic conductance and vulnerability to cavitation in corn (*Zea mays* L.) hybrids of differing drought resistance. **Environment & Experimental Botany**, v. 66, p. 341-346, 2009.

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.

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.

LIMA, L. P. A.; GAIO, D. C.; ROSA, L. L.; ANJOS, M. R.; DE MUSIS, C. R.; SANCHES, L.; NOGUEIRA, J. S. **Nativa**. Lisímetros de pesagem de pequeno porte na investigação de transpiração de plantas de feijão, v. 8, n. 2, p. 192-197, 2020.

MARTINS, I. P.; DE FARIA, R. T.; PALARETTI, L. F.; DALRI, A. B.; OLIVERIO, C.; LIBARDI, L. G. P. Lisímetros de pesagem para medidas de evapotranspiração em estufa. **IRRIGA**, v. 22, n. 4, p. 715-722, 2018.

MARRICHI, A. H. C. **Caracterização da capacidade fotossintética e da condutância estomática em sete clones comerciais de Eucalyptus e seus padrões de resposta ao déficit de pressão de vapor**. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MEINZER, F. C.; WOODRUFF, D. R.; DOMEQ, 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.

MIRFENDERESGI, G.; BOHRER, G.; MATHENY, A. M.; FATICHI, S.; FRASSON, M.; PRATA, R.; SCHÄFER, K. V. Tree level hydrodynamic approach for resolving aboveground water storage and stomatal conductance and modeling the effects of tree hydraulic strategy. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, Wiley Online Library, v. 121, n. 7, p. 1792–1813, 2016.

MOLZ, F. J.; FERRIER, J. M. Mathematical treatment of water movement in plant cells and tissue: a review. **Plant, Cell & Environment**, v. 5, n. 3, p. 191-206, 1982.

MORIANA, A.; FERERES, E. Establishing reference values of trunk diameter fluctuations and stem water potential for irrigation scheduling of olive trees. In: **IV International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops 664**. 2003. p. 407-412.

NARDINI, A.; SALLEO, S.; JANSEN, S. More than just a vulnerable pipeline: xylem physiology in the light of ion-mediated regulation of plant water transport. **Journal of experimental botany**, v. 62, n. 14, p. 4701-4718, 2011.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. IN: BONATO, E. R. **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, p. 19-44, 2000.

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

PAMMENTER, N.W.; VAN DER WILLIGEN, C. A mathematical and statistical analysis of the curves illustrating vulnerability of xylem to cavitation. **Tree physiology**, v. 18, n. 8-9, p. 589-593, 1998.

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.

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.

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.

REIS, A. R. S; REIS, P. C. M.; BRANDÃO, A. T. O.; LISBOA, P. L. B. Anatomia do xilema secundário de sete espécies do gênero *Tachigali* Aubl. (Fabaceae), disponíveis na Xiloteca Walter A. Egler, do Museu Paraense Emílio Goeldi, Pará, Brasil. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, **Ciências Naturais**, v. 6, n. 3, p.335- 347, 2011.

RODRIGUES, H. J. B.; COSTA, R. F.; RIBEIRO, J. B. M.; SOUZA FILHO, J. D. C.; RUIVO, M. L. P.; SILVA JÚNIOR, J. A. Variabilidade sazonal da condutância estomática em um ecossistema de manguezal amazônico e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 189-196, 2011.

ROSA, L. L. **Análogo hídrico-elétrico da estrutura foliar do *Phaseolus vulgaris* L.: o processo de transpiração**. Cuiabá, 2020, 104f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) -Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. Fisiologia das plantas. **Cengage Learning**, São Paulo, ed. 4, p. 792, 2013.

SALLO, F. S. **Dinâmica da água no sistema solo-vegetação-atmosfera em floresta de *Vochysia divergens* Pohl monodominante no Pantanal**. Cuiabá, 2017, 120f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) -Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

SCHOLZ, F. G.; PHILLIPS, N. G.; BUCCI, S. J.; MEINZER, F. C.; GOLDSTEIN, G. Hydraulic capacitance: biophysics and functional significance of internal water sources in relation to tree size. In: **Size-and age-related changes in tree structure and function**. Springer, Dordrecht, 2011. p. 341-361.

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

SILVA, K.R.; MELO JÚNIOR, J. C. F.; BOEGER, M. R. T. Phenotypic variations of *Andira fraxinifolia* Benth.(Fabaceae) from two Restinga sandbank formations. **Hoehnea**, v. 43, n. 2, p. 237-245, 2016.

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.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TETENS, O. Uber cinige meterorologische Begriffe. Z. **Geophys.**, n.6, p. 297-309, 1930.

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.

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

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

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.