

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

ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DA ESTRUTURA FOLIAR
DO *Phaseolus Vulgaris* L.: O PROCESSO DE TRANSPIRAÇÃO

LAURO LEOCÁDIO DA ROSA

Orientador: PROF. DR. DENILTON CARLOS GAIO

Cuiabá/MT

Março/2020

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

ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DA ESTRUTURA FOLIAR DO
***Phaseolus Vulgaris* L.: O PROCESSO DE TRANSPIRAÇÃO**

LAURO LEOCÁDIO DA ROSA

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

Março/2020

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L576a Rosa, Lauro Leocádio da
ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DA ESTRUTURA FOLIAR DO *Phaseolus*
Vulgaris L.: O PROCESSO DE TRANSPIRAÇÃO / Lauro Leocádio da Rosa. --
2020
104 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. Transpiração vegetal. 2. Análogo elétrico. 3. Estômato. 4. Fluxo hídrico. I.
Título.

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

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

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

FOLHA DE APROVAÇÃO

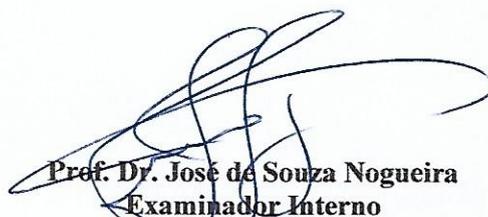
TÍTULO: ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DA ESTRUTURA FOLIAR DO *Phaseolus Vulgaris* L.: O PROCESSO DE TRANSPIRAÇÃO

AUTOR: LAURO LEOCÁDIO DA ROSA

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 12 de março de 2020, pela comissão julgadora:



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



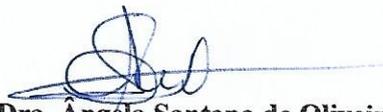
Prof. Dr. José de Souza Nogueira
Examinador Interno
Instituto de Física /UFMT



Prof. Dr. Osvaldo Borges Pinto Junior
Examinador Interno
Universidade de Cuiabá – UNIC/Cuiabá



Prof. Dr. Geison Jader Mello
Examinador Externo
Instituto Federal de Mato Grosso – IFMT



Profa. Dra. Ângela Santana de Oliveira
Examinadora Externa
Instituto Federal de Mato Grosso – IFMT

DEDICATÓRIA

Deus e a todos
que direta ou indiretamente
contribuíram com esta
Tese.

AGRADECIMENTOS

A construção desta tese é fruto de muito trabalho e dedicação, porém, sem o concurso de muitos colaboradores, certamente não seria possível.

Agradeço à Deus pela vida, pelas oportunidades de evoluir, de auxiliar e aprender, compartilhar e pela perseverança para comigo.

Ao apoio, a paciência, ao auxílio, aos incentivos e principalmente pelo privilégio de poder contar sempre com cada um de vocês agradeço imensamente à minha esposa Sirlei Salete Piasecki, à minha filha Ingrid Laura Piasecki Rosa, à minha filha Iara Piasecki Rosa e ao meu filho Natan Leocádio da Rosa.

Ao meu querido amigo e Professor Orientador Dr. Denilton Carlos Gaio agradeço pela paciência, pela disponibilidade, pelo companheirismo, condutor seguro dessa caminhada.

Ao meu amigo e colega de todas as horas Luiz Phillipe de Arruda Lima agradeço pela companhia nos momentos de felicidade e de trabalho duro, sempre com bom ânimo.

A dedicação, o apoio e a amizade da Mariane Ribeiro (Holly Water), em especial nos trabalhos de campo do experimento, no qual fez a diferença. Por isso tudo agradeço de coração.

Agradeço à Kamyly Gama, mulher forte e decidida, pela ajuda nos momentos cruciais do experimento e pela força transmitida.

Ao Prof. Dr. José Nogueira (Paraná) e à Profa. Dra. Marta Cristina baluartes do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, que fazem daquela casa um ambiente familiar que agrega valor e semeia bons frutos no caminho de quem lá passa e também para a sociedade, meu sincero agradecimento.

A dedicação, a capacidade e a disponibilidade dos Professores PPFGA é imprescindível para o sucesso deste trabalho e de tantos outros que contribuem com a ciência e o meio ambiente, muito obrigado.

Agradeço à Professora Luciana Sanches e ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental por abrir as portas da Estação Mestre Bombled para realização do experimento, auxílio fundamental.

Aos amigos Cesário, Soilce e Juliana sempre solícitos na operacionalização dos trabalhos cotidianos da PPGFA.

Aos servidores Senhores Valter e Vanderley pela cessão do espaço e material cedido na área verde do campus para a realização do projeto piloto do experimento.

Ao Senhor Luizinho (primo Piríco) e ao pessoal da marcenaria, por toda a disposição e presteza na construção das estruturas das bancadas, que foram utilizadas no experimento.

À Dona Maria e os responsáveis pelo Laboratório de Física de Solo do Departamento de Agronomia que nos abriu as portas para as medições realizadas do experimento.

Moisés, Carolina Moura, Mariane Dias de Souza Gomes e Lucas Jairo agradeço pelo apoio fundamental nos dias de medição e finalização do experimento.

Professora Dra. Sandra Campus Bela Vista pelo pronto apoio e na disponibilização do Laboratório Microbiologia Geral, IFMT/Campus Bela Vista.

O convívio, a alegria e a amizade cultivada, sobretudo no período dos créditos, foi importante. Aos colegas da PGFA, obrigado.

O apoio e incentivo são sempre bem-vindos e não faltou por parte dos colegas do DAEE/IFMT.

Ao IFMT/Campus Octayde Jorge da Silva, minha segunda casa, que me acolhe já há muitos anos, me oportunizando aprender, trabalhar e crescer profissionalmente e pessoalmente, agradeço sempre. E sempre serei grato.

A UFMT que abrigou a minha trajetória de crescimento em vários momentos, quantas experiências ali vividas, desde o remoto período como bolsista na

Orquestra Sinfônica, depois a graduação em Engenharia Elétrica e agora no Doutorado, meu sincero muito obrigado.

Aos ex-alunos e alunos do IFMT/Campus Octayde Jorge da Silva, quanto aprendizado e amizades, razão do meu trabalho como educador, agradeço imensamente.

A dedicação, interesse e aprimoramento que tanto contribuíram para a melhoria deste trabalho, bem como a correção e postura profissional que a banca examinadora trouxe a minha tese, meu muito obrigado.

RESUMO

ROSA, L. L. **ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DA ESTRUTURA FOLIAR DO *Phaseolus Vulgaris L.*: O PROCESSO DE TRANSPIRAÇÃO: O PROCESSO DE TRANSPIRAÇÃO**. Cuiabá, 2020.104f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O processo de transpiração foliar está ligado às condições do solo e ambientais que a planta está submetida. Um modelo do processo de transpiração foliar deve, portanto, considerar a fisiologia da planta e as condições edafoclimáticas. Desse modo, o modelo análogo hídrico-elétrico desenvolvido neste trabalho focaliza na fisiologia da folha do feijão preto comum (*Phaseolus Vulgaris L.*) e nos valores e nas variações da quantidade de água no solo, na temperatura e na umidade relativa do ar. Para o desenvolvimento do modelo, foi realizado um experimento com o cultivo de *Phaseolus Vulgaris L.*, período de seca, na estação meteorológica “Mestre Bombled” situada na Universidade Federal de Mato Grosso, campus Cuiabá, composto por 198 pés, divididos em 15 tratamentos com diferentes quantidades de água no solo. Os dados obtidos de fluxo hídrico, quantidade de água nas folhas, área foliar, densidade estomática, área média das células da epiderme e dos estômatos, bem como de variáveis micrometeorológicas, no dia do experimento, foram utilizados na modelagem dos circuitos análogos hídrico-elétricos dos diferentes caminhos que a água em estado líquido ou vapor segue pela folha no processo de transpiração. A simulação do circuito foi realizada por meio do software de análise de circuitos elétricos QUCS. Os circuitos foram interligados de acordo com a fisiologia da folha do *Phaseolus Vulgaris L.* descrita na literatura, originando uma unidade mínima de análise da transpiração foliar, denominada Mod_1. Utilizando réplicas do Mod_1 foram construídos módulos maiores e organizados em camadas ao de redor deste, central. No Mod_1 central localiza-se o ostíolo central por onde o fluxo hídrico foi medido. Após análise estatística, observou-se que os fluxos hídricos simulados tiveram forte correlação direta com os fluxos obtidos no experimento. Incrementando-se, por inferência, as réplicas com Mod_1 até abranger a totalidade de uma folha, o modelo continuou apresentando a mesma resposta estatística, mostrando ser escalável. Os resultados indicam que o modelo pode ser uma ferramenta de desenvolvimento de novos estudos sobre transpiração e suas implicações.

Palavras-chave: transpiração vegetal, estômato, variação estomática, ostíolo, fluxo hídrico, QUCS, análogo elétrico, escalabilidade, *Phaseolus Vulgaris L.*

ABSTRACT

ROSA, L. L.. **HYDRO-ELECTRICAL ANALOG OF THE FOLIAR STRUCTURE OF *Phaseolus Vulgaris* L. : THE TRANSPIRATION PROCESS: THE TRANSPIRATION PROCESS.** Cuiabá, 2020. 104f. Thesis (Doctorate in Environmental Physics) - Institute of Physic, Federal University of Mato Grosso

The process of leaf sweating is linked to the soil and environmental conditions that the plant is subjected to. A model of the leaf transpiration process should therefore consider plant physiology and edaphoclimatic conditions. Thus, the hydric-electric analog model developed in this work focuses on the physiology of the leaf of common black bean (*Phaseolus Vulgaris* L.) and on the values and variations of soil water quantity, temperature and relative humidity. For the development of the model, an experiment was implemented with the cultivation of *Phaseolus Vulgaris* L., drought period, at the “Mestre Bomble” weather station located at the Federal University of Mato Grosso, Cuiabá campus, composed by 198 feet, divided into 15 treatments. with different amounts of water in the soil. The data obtained from water flow, leaf water quantity, leaf area, stomatal density, average epidermal and stomatal cell area, as well as micrometeorological variables, in the day of the experiment, were used to modeling the hydric-electric analog circuits of the different paths that the liquid water or vapor follows by the leaf in the transpiration process. The circuit simulation was performed using the QUCS electrical circuit analysis software. The circuits were interconnected according to the leaf physiology of *Phaseolus Vulgaris* L. described in the literature, giving rise to a minimal unit of analysis of leaf sweating, called Mod_1. Using replicas of Mod_1 larger modules were built and organized in layers around this central one. In central Mod_1 is located the central ostiole by which the water flow was measured. After statistical analysis, it was observed that the simulated water flows had a strong direct correlation with the flows obtained in the experiment. By incrementing the replicates with Mod_1 by inference until it covers the whole of a leaf, the model continued to present the same statistical response, showing to be scalable. The results indicate that the model may be a tool for developing new studies on transpiration and its implications.

Keywords: plant trnspiration, stomata, stomatal variation, ostiole, water flow, QUCS, electrical analog, scalability, Phaseolus Vulgaris L.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PONTES DE HIDROGÊNIO	4
FIGURA 2 – FOLHAS DO <i>PHASEOLUS VULGARIS L.</i>	9
FIGURA 3 – ESTRUTURA FOLIAR INTERNA	10
FIGURA 4 – ESPAÇO INTERCELULAR NO MESOFILO	14
FIGURA 5 – ANALOGIA DO FLUXO ELÉTRICO COM O FLUXO HÍDRICO NO SPA	18
FIGURA 6 – CIRCUITO BÁSICO	19
FIGURA 7 – COMPONENTES HÍDRICOS DE UMA PLANTA	20
FIGURA 8 – MODELO COMPLETO DO SPA PROPOSTO POR GAIO (2011)	21
FIGURA 9 – MESA COM O CULTIVO DE <i>PHASEOLUS VULGARIS L.</i>	25
FIGURA 10 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA E DA UMIDADE RELATIVA DO AR	26
FIGURA 11 – FOLHAS DE UM PÉ DE <i>PHASEOLUS VULGARIS L.</i>	27
FIGURA 12 – EPIDERME FOLIAR DE <i>PHASEOLUS VULGARIS L.</i>	27
FIGURA 13 – CIRCUITO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO ESTÔMATO	30
FIGURA 14 – SÍMBOLO DO ENCAPSULAMENTO DO CIRCUITO ANÁLOGO DO ESTÔMATO	30
FIGURA 15 – MODELO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DA CÉLULA DA EPIDERME	31
FIGURA 16 – SÍMBOLO DO CIRCUITO DA CÉLULA DA EPIDERME	31
FIGURA 17 – ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DA CÉLULA DO PARÊNQUIMA PALIÇÁDICO	32
FIGURA 18 – SÍMBOLO DO CIRCUITO DO PARÊNQUIMA PALIÇÁDICO	33
FIGURA 19 – ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DA CÉLULA DO PARÊNQUIMA LACUNOSO	33
FIGURA 20 – SÍMBOLO DO CIRCUITO ANÁLOGO DA CÉLULA DO PARÊNQUIMA PALIÇÁDICO	34
FIGURA 21 – ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO ESPAÇO INTERCELULAR DO MESOFILO,	34
FIGURA 22 – ENCAPSULAMENTO DO ESPAÇO INTERCELULAR DO MESOFILO	35
FIGURA 23 – CÂMARA SUBESTOMÁTICA	36
FIGURA 24 - CIRCUITO ANÁLOGO À CÂMARA SUBESTOMÁTICA	36
FIGURA 25 – CIRCUITO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO OSTÍOLO.	37
FIGURA 26 – SÍMBOLO DO CIRCUITO ANÁLOGO HÍDRICO-ELÉTRICO DO OSTÍOLO	37
FIGURA 27 – CIRCUITO DO ELEMENTO DE ATMOSFERA ADJACENTE À CÉLULA DA EPIDERME	38
FIGURA 28 - CIRCUITO ENCAPSULADO DO ELEMENTO DA ATMOSFERA ADJACENTE	39
FIGURA 29 – CIRCUITO ANÁLOGO DO ELEMENTO DE ATMOSFERA ADJACENTE AO ESTÔMATO	39
FIGURA 30 – SÍMBOLO DO MÓDULO DA ATMOSFERA ADJACENTE AO ESTÔMATO	39
FIGURA 31 – CIRCUITO DA ATMOSFERA	40
FIGURA 32 – SÍMBOLO DO CIRCUITO DA ATMOSFERA	40
FIGURA 33 – CIRCUITO DA CUTÍCULA	40
FIGURA 34 – SÍMBOLO DO CIRCUITO DA CUTÍCULA	41

FIGURA 35 (A) – ENTRADA DO FLUXO HÍDRICO NA FOLHA	42
FIGURA 35 (B) – LIGAÇÕES ENTRE CIRCUITOS DO MOD_1	43
FIGURA 36 – FLUXO HÍDRICO DO ESPAÇO INTERCELULAR	44
FIGURA 37 – RELAÇÕES DA CÂMARA SUBESTOMÁTICA	45
FIGURA 38 – RELAÇÃO DO OSTÍOLO COM CIRCUITOS ADJACENTES	46
FIGURA 39 – RELAÇÃO HÍDRICA DO ESTÔMATO.....	46
FIGURA 40 – RELAÇÕES DA CÉLULA DA EPIDERME NA ESTRUTURA FOLIAR	47
FIGURA 41 – FLUXO HÍDRICO PELA CUTÍCULA	48
FIGURA 42 – POTENCIAL HÍDRICO DE VAPOR DA ATMOSFERA - DIA DO EXPERIMENTO	51
FIGURA 43 – COMPOSIÇÃO DAS RESISTÊNCIAS AO FLUXO HÍDRICO EM FORMA DE VAPOR	54
FIGURA 44 – CAPACITÂNCIAS DOS ESPAÇOS INTERCELULARES E CÂMARA SUBESTOMÁTICA.....	59
FIGURA 45 – DIAGRAMA COM AS INDICAÇÕES DE LIGAÇÕES DO MOD_1.....	63
FIGURA 46 – MOD_1: MÓDULO BASE COM UM ÚNICO OSTÍOLO E SUAS CONEXÕES	65
FIGURA 47 – MÓDULO PARA ESTUDO DA ESCALABILIDADE (MOD_9)	66
FIGURA 48 – MÓDULO PARA ESTUDO DA ESCALABILIDADE (MOD_25)	68
FIGURA 49 – MÓDULO PARA ESTUDO DA ESCALABILIDADE (MOD_49)	70
FIGURA 50 – LIGAÇÕES DO MOD_9	72
FIGURA 51 – SCATTERPLOT MATRIX ENTRE FLUXO DO EXPERIMENTO E DA MODELAGEM	77
FIGURA 52 – FLUXO HÍDRICO RELATIVO	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES DOS POTENCIAIS HÍDRICOS QUE SERÃO UTILIZADOS.	8
TABELA 2 – ANALOGIA ENTRE GRANDEZAS RELATIVAS AOS FLUXOS HÍDRICO E ELÉTRICO	18
TABELA 3 – CAPACITÂNCIAS UTILIZADAS NOS MODELOS.....	28
TABELA 4 – RESISTÊNCIAS UTILIZADAS NOS MODELOS.	28
TABELA 5 – PORTAS DE ACESSO	29
TABELA 6 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO OSTÍOLO	37
TABELA 7 – POTENCIAIS HÍDRICOS DE VAPOR MÉDIOS DA ATMOSFERA	51
TABELA 8 – QUANTIDADES DE FOLHA MÉDIA DO <i>PHASEOLUS VULGARIS L.</i> DO EXPERIMENTO	52
TABELA 9 – MEDIÇÕES DO FLUXO HÍDRICO	53
TABELA 10 – VALORES DAS CAPACITÂNCIAS DA FASE LÍQUIDA DA ÁGUA.	56
TABELA 11 – CAPACITÂNCIA MÉDIA DA CÉLULA DA EPIDERME E DO ESTÔMATO	57
TABELA 12 – CAPACITÂNCIA EQUIVALENTE DOS ESPAÇOS INTERCELULARES DO MOD_1.....	58
TABELA 13 – VARIAÇÃO DA ABERTURA DO OSTÍOLO PARA O EXPERIMENTO DE 10/08/2017	61
TABELA 14 – PROPORÇÃO DE CIRCUITOS DO MÓDULO BASE	62
TABELA 15 – FLUXOS HÍDRICOS DO ESTÔMATO CENTRAL OBTIDO DA SIMULAÇÃO DO MOD_1	73
TABELA 16 – FLUXOS HÍDRICOS DO ESTÔMATO CENTRAL OBTIDO DA SIMULAÇÃO DO MOD_9	73
TABELA 17 – FLUXOS HÍDRICOS DO ESTÔMATO CENTRAL OBTIDO DA SIMULAÇÃO DO MOD_25	74
TABELA 18 – FLUXOS HÍDRICOS DO ESTÔMATO CENTRAL OBTIDO DA SIMULAÇÃO DO MOD_49	74
TABELA 19 – CORRELAÇÕES DE SPEARMAN	75
TABELA 20 – ERRO MÉDIO ABSOLUTO ($M^3 S^{-1}$) E ERRO PERCENTUAL MÉDIO ABSOLUTO (%)	76
TABELA 21 – MÉDIA DA RAZÃO ENTRE FLUXO HÍDRICO DO EXPERIMENTO E DOS MÓDULOS	77

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>ABA</i>	Ácido Abscísico
<i>A_{cg}</i>	Área da superfície da célula-guarda
<i>a_{epid}</i>	Constante de efeito do potencial da célula da epiderme
<i>a_{estom}</i>	Constante de efeito do potencial do estômato
<i>A_o</i>	Abertura inicial do ostíolo (m ²)
<i>a_{ost}</i>	Abertura do ostíolo (m)
<i>A_p</i>	Constante de proporcionalidade da abertura estomática
<i>Ar</i>	Razão de antagonismo
<i>as</i>	Abertura estomática (m)
<i>be</i>	Coefficiente de variação da turgescência da célula da epiderme
<i>bg</i>	Coefficiente de variação da turgescência da célula-guarda
<i>C</i>	Capacitância do componente do SPA (m ³ MPa ⁻¹)
<i>Cl</i>	Íons Cloro
<i>CO₂</i>	Fórmula Química do Dióxido de Carbono
<i>c_σ</i>	Concentração de soluto
<i>es</i>	Pressão de vapor de saturação
<i>ET</i>	Evapotranspiração (m ³ s ⁻¹)
<i>f</i>	Fluxo hídrico (m ³ s ⁻¹)
<i>farmazenagem</i>	Fluxo de armazenagem de água no componente do circuito (m ³ s ⁻¹)
<i>f_{entrada}</i>	Fluxo hídrico de entrada no componente do circuito (m ³ s ⁻¹)
<i>f_{ostíolo}</i>	Fluxo hídrico no ostíolo (m ³ s ⁻¹)
<i>f_{planta}</i>	Fluxo hídrico na planta (m ³ s ⁻¹)
<i>f_{saída}</i>	Fluxo hídrico de saída no componente do circuito (m ³ s ⁻¹)
<i>g</i>	Campo gravitacional da Terra (g = 9,81 N.kg ⁻¹ ao nível do mar)
<i>GPL</i>	<i>General Public License</i> – Licença Pública Geral
<i>H</i>	Fluxo de calor sensível (kCal)
<i>H⁺</i>	Próton
<i>H+ATPase</i>	Enzima da bomba iônica que atua no transporte de íons na membrana
<i>I</i>	Corrente elétrica
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>K⁺</i>	Íons potássio
<i>LE</i>	Fluxo de calor latente
<i>m</i>	Vantagem mecânica da epiderme
<i>MPa</i>	Megapascal
<i>n</i>	Número de partículas de um sistema
<i>nm</i>	Nanômetro
<i>N_{ostíolo}</i>	Número de ostíolos
<i>P</i>	Precipitação
<i>Pa</i>	Pascal
<i>Pe</i>	Potencial hídrico da célula da epiderme
<i>P_{entrada}</i>	Ponto de entrada do fluxo hídrico
<i>P_g</i>	Potencial hídrico do estômato
<i>P_{saída}</i>	Ponto de saída do fluxo hídrico
<i>P_{sonda}</i>	Ponto de sondagem de potencial hídrico
<i>QUCS</i>	<i>Quite Universal Circuits Simulation</i>

R	Constante dos gases ou constante de Clayperon ($R= 8,32 \text{ J.mol}^{-1} .\text{K}^{-1}$)
r	Raio de curvatura (m) do menisco da água nos espaços intercelulares
R_0	Resistência mínima à passagem de fluxo pelo ostíolo (MPa.s.m^3)
R_{atm}	Resistência da atmosfera ao fluxo de vapor (MPa.s.m^3)
RC	Circuito com associação de Resistor e Capacitor
R_{eq}	Resistência ao fluxo hídrico equivalente no SAP (MPa.s.m^3)
R_m	Resistência máxima à passagem de fluxo pelo ostíolo (MPa.s.m^3)
R_{sub}	Escoamento subterrâneo (m^3s^{-1})
R_{sup}	Escoamento superficial (m^3s^{-1})
R_{vapor}	Resistência equivalente de vapor (MPa.s.m^3)
SPA	Contínuo Solo-Planta-Atmosfera
T	Temperatura termodinâmica
\bar{U}	Tensão superficial da água
UR	Umidade relativa
V_M	Volume parcial molar da água ($V_M=18,05 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ a 20°C e 1atm)
Z	Altura de medida (m)
Z_0	Altura de referência (m)
β	Razão de Bowen
ΔS_{sol}	Variação da água no solo (m^3)
ΔS_{sub}	Variação da água no subsolo (m^3)
ΔS_{sup}	Variação da água na superfície (m^3)
η	Viscosidade
μ_w	Massa específica da água pura (10^3 kg.m^{-3} a 20°C e 1Atm)
Ψ	Potencial hídrico (MPa)
Ψ_{CE}	Pressão de turgescência das células da epiderme (MPa)
Ψ_{pe}	Pressão de turgescência das células-guarda (MPa)
Ψ_{pg}	Potencial hídrico gravitacional (MPa)
Ψ_m	Potencial hídrico matricial (MPa)
Ψ_p	Potencial hídrico de pressão hidrostática (MPa)
Ψ_s	Potencial hídrico de soluto ou osmótico (MPa)

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	1
1.1- JUSTIFICATIVA.....	1
1.2 - OBJETIVOS	2
1.2.1 - Geral	2
1.2.2 - Específicos.....	2
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - ÁGUA	4
2.2 - TRANSPIRAÇÃO VEGETAL.....	5
2.3 – POTENCIAL HÍDRICO	7
2.4 – FISIOLOGIA DA FOLHA	8
2.4.1- Aspectos Gerais	8
2.4.2 – Célula vegetal.....	10
2.4.3 - Complexo Estomático.....	11
2.4.4 - Epiderme.....	11
2.4.5 - Células Subsidiárias.....	12
2.4.6 - Mesófilo.....	13
2.5 - FLUXO HÍDRICO.....	14
2.6 – CARACTERÍSTICAS DO <i>PHASEOLUS VULGARIS L.</i>	17
2.7 – ANALOGIA ENTRE FLUXO HÍDRICO E ELÉTRICO	17
2.8 – MODELO BASE.....	19
2.9 – CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA NA ATMOSFERA.....	21
2.10 – QUCS	22
2.11 – MÉTODO PLANIMÉTRICO DE JEFFRIES.....	22
2.12 – ESCALABILIDADE.....	23
2.13 – VALIDAÇÃO	23
3 - MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 – DADOS EXPERIMENTAIS	24
3.2 – ÁREAS DAS FOLHAS E DAS CÉLULAS DA EPIDERME	26
3.3 – MODELAGEM	28
3.3.1 – Estômato	29
3.3.2 – Célula da Epiderme.....	30

3.3.3 – Parênquima Paliçádico.....	32
3.3.4 – Parênquima Lacunoso.....	33
3.3.5 – Espaço Intercelular.....	34
3.3.6 – Câmara Subestomática.....	35
3.3.7 – Ostíolo.....	36
3.3.8 – Atmosfera Adjacente	38
3.3.9 – Atmosfera.....	40
3.3.10 – Cutícula.....	40
3.4 – CALIBRAÇÃO DO MODELO	41
3.5 – MÓDULOS	42
3.6 – SIMULAÇÃO DOS MÓDULOS	49
3.7 – VALIDAÇÃO DO MODELO	49
3.8 – ESCALABILIDADE DO MODELO.....	49
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 – EXPERIMENTO	51
4.1.1 – Potenciais Hídricos no Dia do Experimento.....	51
4.1.2 - Proporções na Estrutura Foliar	52
4.1.3 – Fluxo Hídrico Médio por Ostíolo obtido no Experimento.....	52
4.2- IN SILICO.....	53
4.2.1 – Resistência da Atmosfera.....	53
4.2.2 – Resistências de Carregamento e da Membrana	54
4.2.3 - Resistência da Câmara Subestomática e do Espaço Intercelular.....	54
4.2.4 – Resistências máxima e mínima do ostíolo	55
4.2.5 – Resistência da Cutícula	55
4.2.6 – Capacitâncias de Carregamento da água líquida na folha	55
4.2.7 – Capacitância da Atmosfera Adjacente	56
4.2.8 – Capacitância da Câmara Subestomática e do Espaço Intercelular...	57
4.2.9 – Capacitância da Atmosfera	59
4.2.10 – Abertura do Ostíolo.....	60
4.2.11 – Módulo Base	61
4.2.12 – Expansão em Módulos.....	65
4.2.14 – Fluxo hídrico obtido das simulações.....	72

4.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MODELO	75
4.3.1 – Correlação de Spearman	75
4.3.2 – Regressão Linear Simples.....	75
4.3.3 – Erro Médio Absoluto e Erro Percentual Médio Absoluto	76
4.3.4 – Diagrama de Dispersão	76
4.4 – ESCALABILIDADE DO MODELO.....	77
5 - CONCLUSÃO	79
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1- INTRODUÇÃO

A transpiração de uma planta vascular ocorre principalmente na folha. Esse processo é complexo, pois depende de diversos fatores micrometeorológicos, biológicos e de disponibilidade de água no solo (Larcher, 2000).

A planta convive com a necessidade de abrir os ostíolos para captar CO₂ e realizar fotossíntese. Ao mesmo tempo, precisa absorver água do solo e também, por meio deste fluxo, obter nutrientes do solo. A água é uma substância fundamental à planta e nem sempre disponível em grandes quantidades. Assim, a planta desenvolveu, ao longo de sua evolução, um complexo mecanismo de controle do fluxo de água.

A partir da variação da abertura do ostíolo, o controle do fluxo hídrico em uma planta ocorre. Esse processo é vital na conservação da sua temperatura interna, no impedimento de que haja uma perda excessiva de água.

Obter um modelo análogo hídrico-elétrico que responda à abertura estomática no período de seca, em que o controle de água é primordial, contribui para melhor avaliar essa complexa relação.

1.1- JUSTIFICATIVA

As plantas vasculares abrangem grande parte da diversidade da flora. Compreender melhor o seu comportamento quanto às variações hídricas e micrometeorológicas é uma necessidade premente. Principalmente se for considerada a limitada disponibilidade dos recursos hídricos em diversas regiões do mundo, e, um futuro deveras preocupante, sua escassez. O aumento populacional, com o consequente aumento da produção agrícola, e a destruição de mananciais são agravantes desse quadro (RAVEN, 2013).

De acordo com Guimarães et al. (2017), há apenas 0,3% de água doce na Terra, e dessa quantidade, cerca de 70% são utilizadas na agricultura. Dada a sua utilização e quantidade aproveitável, torna-se importante compreender os processos que envolvem a água na relação solo-planta-atmosfera para a sustentabilidade da natureza e sobrevivência do homem.

As diversas estruturas que constituem uma folha e suas interações complexas viabilizam o processo de transpiração, além de ligá-la a outros processos como, por exemplo, nutrição, crescimento e fotossíntese. Nesse contexto, a planta controla o fluxo hídrico por meio da variação da abertura do ostíolo em função de diversos fatores bióticos e abióticos (PES e ARENHARDT, 2015).

A transpiração vegetal, modelada *in silico* neste trabalho, baseia-se na fisiologia do *Phaseolus vulgaris L.* e de princípios básicos da física, leis analogias de Kirchhoff e de Ohm. A modelagem *in silico* gera cenários que podem orientar tomadas de decisões, proceder análises, avaliações de performance. Sendo que, em diferentes circunstâncias, permitem a previsão de resultados, identificação de problemas, análise de sensibilidade, redução de custos, revelação da integridade e viabilidade de um sistema (LAW, 2016).

O desenvolvimento de um modelo análogo hídrico-elétrico da transpiração foliar, que responda às variações micrometeorológicas coletadas por meio de experimento, considerando a complexidade da estrutura foliar, produzido nesta tese pode contribuir com os estudos nessa área do conhecimento.

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Geral

Formular um modelo análogo hídrico-elétrico da estrutura foliar do *Phaseolus vulgaris L.* que corresponda ao processo de transpiração foliar controlado pela variação da abertura do ostíolo, a qual é função das relações entre estômato, células da epiderme, células do mesofilo e a atmosfera adjacente à folha.

1.2.2 – Objetivos Específicos

Objetivos específicos propostos na construção desta tese:

- a) Realizar experimento para obtenção da transpiração de plantas de *Phaseolus vulgaris L.* em função de variáveis edafoclimáticas no período de seca.
- b) Elaborar circuitos *in silico* análogos hídrico-elétricos da estrutura foliar: estômato, ostíolo, célula da epiderme, célula do parênquima paliçádico, célula do parênquima lacunoso, ostíolo, espaço intercelular, câmara subestomática,

atmosfera adjacente à célula da epiderme, atmosfera adjacente ao estômato e à atmosfera.

- c) Calibrar os valores de resistências e capacitâncias dos circuitos *in silico* de acordo com a literatura disponível e com dados do experimento.
- d) Aplicar as relações entre circuitos da estrutura de uma folha conforme a fisiologia do *Phaseolus vulgaris L.*
- e) Criar um módulo base que corresponda à estrutura mínima necessária para o estudo da transpiração foliar.
- f) Gerar módulos maiores a partir do uso de réplicas do módulo base.
- g) Simular os módulos construídos para a obtenção do fluxo hídrico que atravessa um ostíolo por meio de um software de análise de circuitos elétricos.
- h) Realizar análise estatística entre os fluxos hídricos dos módulos obtidos nas simulações e os do experimento.
- i) Verificar a escalabilidade dos módulos produzidos.
- j) Validar o modelo por meio de análise estatística e escalabilidade.

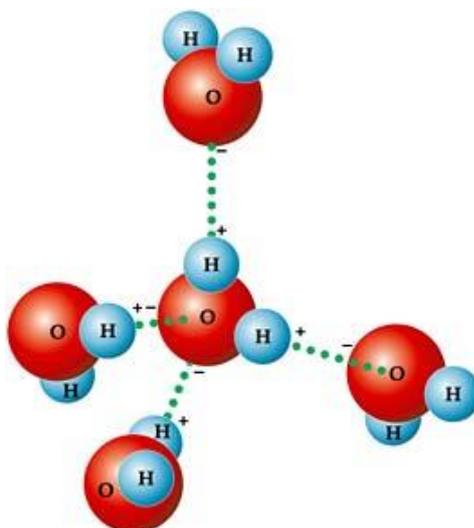
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - ÁGUA

A água está presente na natureza na forma líquida, sólida e gasosa. É substância importante em diversos processos físicos, químicos e biológicos. Nas plantas também tem função de manter o turgor celular e participar de processos metabólicos como a fotossíntese e a fosforilação oxidativa.

A forte diferença de eletronegatividade entre o átomo de oxigênio e os dois de hidrogênio, e a distribuição assimétrica de carga (ângulo de $104,5^\circ$ entre as duas ligações oxigênio-hidrogênio) tornam a molécula de água polar. O oxigênio de uma molécula atrai o hidrogênio de outra molécula, formando uma ligação secundária: são as pontes de hidrogênio (Figura 1). Essas ligações intermoleculares são responsáveis por uma série de características da água como ser solvente universal, formar cadeias de moléculas e ter forte tensão superficial.

Figura 1 – Pontes de Hidrogênio



Retirado e modificado de Biologiaemfoco (2020)

As cadeias moleculares formadas pela água são fundamentais na relação hídrica no sistema solo-planta-atmosfera para a manutenção do movimento ascendente da água em plantas vasculares. Conforme o modelo mais aceito atualmente, a teoria tensão-coesão-adesão, publicada por Dixon e Joly em 1895, o fluxo hídrico ocorre em consequência da perda da água, em forma de vapor, para atmosfera, através do ostíolo,

causada pela pressão hidrostática negativa gerada na transpiração vegetal (RAVEN, 2013). Devido a essa perda de água para a atmosfera, a coluna de água ascende nos vasos xilemáticos. A força intermolecular garante que a coluna não irá se romper até um valor máximo de demanda evaporativa da atmosfera. Para além desse valor, ocorrerá a formação de bolhas de vapor d'água. Uma grande bolha impede o fluxo hídrico no vaso, o que se dá o nome de embolia.

2.2 - TRANSPIRAÇÃO VEGETAL

Segundo Guimarães et al. (2017), a transpiração vegetal é o processo que consiste na liberação da água no estado gasoso da planta para a atmosfera. Para tanto, é necessário que o ar tenha capacidade para receber mais moléculas de água na forma de vapor e que haja energia para ser fornecida às moléculas de água. Essa energia pode vir diretamente do ar, pela conversão de calor sensível em calor latente, ou então pode ser fornecida externamente (saldo de radiação, fluxo de calor do solo, vento).

O processo de transpiração está intrinsecamente ligado à fotossíntese. O fluxo de vapor, que sai, compete com o fluxo de CO₂, que entra através dos estômatos. Ao abrir o estômato, a planta realiza transpiração e captação de gás carbônico (VIEIRA et al., 2010).

Nas plantas, a ocorrência da transpiração pode se dar por via lenticular, cuticular e estomática. A transpiração lenticular geralmente ocorre no caule e até nas raízes através das lentículas, que são pequenas aberturas na periderme. Sua importância é diminuta ao considerarmos o percentual envolvido no processo de troca gasosa. A transpiração cuticular ocorre em todos os órgãos da parte aérea de plantas herbáceas (folhas e caules jovens). Nesse processo, a planta perde água para a atmosfera através das células da epiderme, que é recoberta pela cutícula. A perda de água pela cutícula é geralmente muito pequena, cerca de 5% do processo de transpiração. A transpiração estomática, que detém cerca de 95% da saída de água para a atmosfera, ocorre através de aberturas chamadas de ostíolos. Os estômatos controlam a abertura e o fechamento dos ostíolos e estão presentes principalmente nas folhas, mas também no caule verde. O ostíolo abre-se ou fecha-se em função do grau de turgidez das células-guarda, que por sua vez dependem das condições de

disponibilidade hídrica e de fatores micrometeorológicos. A transpiração estomática representa um dos mais importantes processos de interação entre planta e atmosfera (TAIZ e ZEIGER, 2017).

A disponibilidade de água é fator básico para o fluxo entre solo, planta e atmosfera. No entanto, essa não é a única condição para que a transpiração ocorra. Diversos fatores intrínsecos da planta, climáticos e de manejo do solo influenciam na dinâmica da transpiração (KOBAYAMA et al., 2014)

Guimarães et al.(2017) explicam que variáveis climáticas como o saldo de radiação, temperatura do ar, temperatura da água, pressão atmosférica, umidade relativa do ar e velocidade do vento são fatores climáticos determinantes no processo de transpiração.

A transpiração também é afetada por fatores intrínsecos à planta como altura, área foliar, geometria das superfícies evaporantes, espessura da cutícula, presença de tricomas, densidade de estômatos, tipo de cultura, albedo, profundidade do sistema radicular, entre outros.

Em lavouras, o manejo do solo como espaçamento do plantio, orientação de plantio, uso de cobertura morta, capacidade de armazenamento do solo, salinidade, impedimentos físico/químicos e uso de quebra-ventos influenciam na transpiração.

Sentelhas (2019) explica que o balanço hídrico é resultado da quantidade de entradas e saídas de água de um sistema. A quantidade de água, que entra ou sai de um sistema, por um intervalo tempo considerado pode ser estudada em três escalas espaciais: macro, como o ciclo hidrológico, em escala intermediária, como em uma microbacia, ou em escala local, como em uma cultura. Guimarães et al. (2017) acrescentam que o balanço hídrico, para uma dada região, pode ser traduzido na Equação 1.

$$P - R_{sup} - R_{sub} - ET = \Delta S_{sup} + \Delta S_{sol} + \Delta S_{sub} \quad (1)$$

P é a precipitação (que representa uma entrada no sistema), R_{sup} e R_{sub} são, respectivamente, o escoamento superficial e subterrâneo (saídas do sistema), ET é a evapotranspiração (que representa outra saída do sistema) e ΔS_{sup} , ΔS_{sol} e ΔS_{sub} são diferenças da quantidade de água, respectivamente, na superfície, no solo e no subsolo no intervalo de tempo especificado.

2.3 – POTENCIAL HÍDRICO

Segundo Taiz e Zeiger (2017), o potencial hídrico é uma variável que descreve o estado energético da água no sistema, em unidades de densidade volumétrica de energia ou, equivalentemente, em unidades de pressão. O potencial hídrico é a energia livre de Gibbs, por unidade de volume molal da água. Em um sistema vegetal corresponde à soma dos componentes gravitacional (Ψ_g), osmótico ou de soluto (Ψ_s), de pressão hidrostática (Ψ_p); matricial (Ψ_m) e de vapor (Ψ_v) (Equação 2).

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_v \quad (2)$$

Potencial hídrico gravitacional é a energia potencial gravitacional por unidade de volume molal da água pura localizada a uma altura z do ponto de referência z_0 , dada pela Equação 3.

$$\Psi_g = \frac{Mg(z-z_0)}{V_M} = \mu_w g(z-z_0) \quad (3)$$

Nessa expressão, M é a massa molar específica da água, g é o campo gravitacional da Terra, μ_w , a massa molar específica da Terra e V_M , o volume parcial molal da água pura.

Potencial hídrico matricial está associado às forças de coesão das pontes de hidrogênio que interligam as moléculas de água, que formam os meniscos de água nos espaços intercelulares do mesofilo.

Potencial hídrico osmótico ou de soluto deve-se às dissoluções no citossol que ocorrem na planta, que incrementam a entropia do sistema. É estimado a partir da Equação de Van 't Hoff (4).

$$\Psi_s = -RT_{c\sigma} \quad (4)$$

Em que R é a constante dos gases ($0,00831 \text{ kg MPa mol}^{-1}\text{K}^{-1}$), c_σ é a concentração de soluto na solução, expressa em osmolalidade (mol por litro) e T é a temperatura absoluta do sistema.

Haverá variação do potencial hídrico de soluto na produção de sacarose devido ao aumento do número de partículas dissolvidas.

O potencial hídrico de vapor considerado, por exemplo, na câmara subestomática, depende da umidade relativa do ar interna à câmara, a uma dada temperatura e pode ser obtido a partir da Lei da difusão de Fick (Equação 5).

$$\Psi_V = \frac{RT}{V_M} \ln \left(\frac{UR\%}{100} \right) \quad (5)$$

Reichardt e Timm (2012) explicam que, como condições de contorno para definir o potencial de turgor vegetal, os processos na planta são isotérmicos, a componente potencial hídrico gravitacional pode ser desconsiderada, no sistema água há continuidade e, por exemplo nas folhas, o potencial hídrico, que define o turgor, é dado pela Equação 6.

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_s \quad (6)$$

O sentido do fluxo da água entre células adjacentes, por exemplo, depende da diferença de potencial hídrico total e não apenas da diferença entre os potenciais osmótico e de pressão individuais de cada célula.

No ar, tanto na atmosfera quanto na parte aerificada no interior da folha, a água encontra-se em forma de vapor, o potencial hídrico é o próprio potencial de vapor (Ψ_v).

A Tabela 1 apresenta valores representativos para os potenciais hídricos do contínuo solo-planta-atmosfera propostos por Nobel (2009).

Tabela 1 – Valores dos potenciais hídricos que serão utilizados.

LOCALIZAÇÃO	Ψ (MPa)
Xilema	-0,8
Vacúolo da célula do mesófilo	-0,8
Ar na câmara subestomática com umidade relativa do ar em 95%	-6,9
Atmosfera adjacente ao ostíolo com umidade relativa do ar em 50%	-95,1

Retirado de NOBEL (2009).

2.4 – FISILOGIA DA FOLHA

2.4.1- Aspectos Gerais

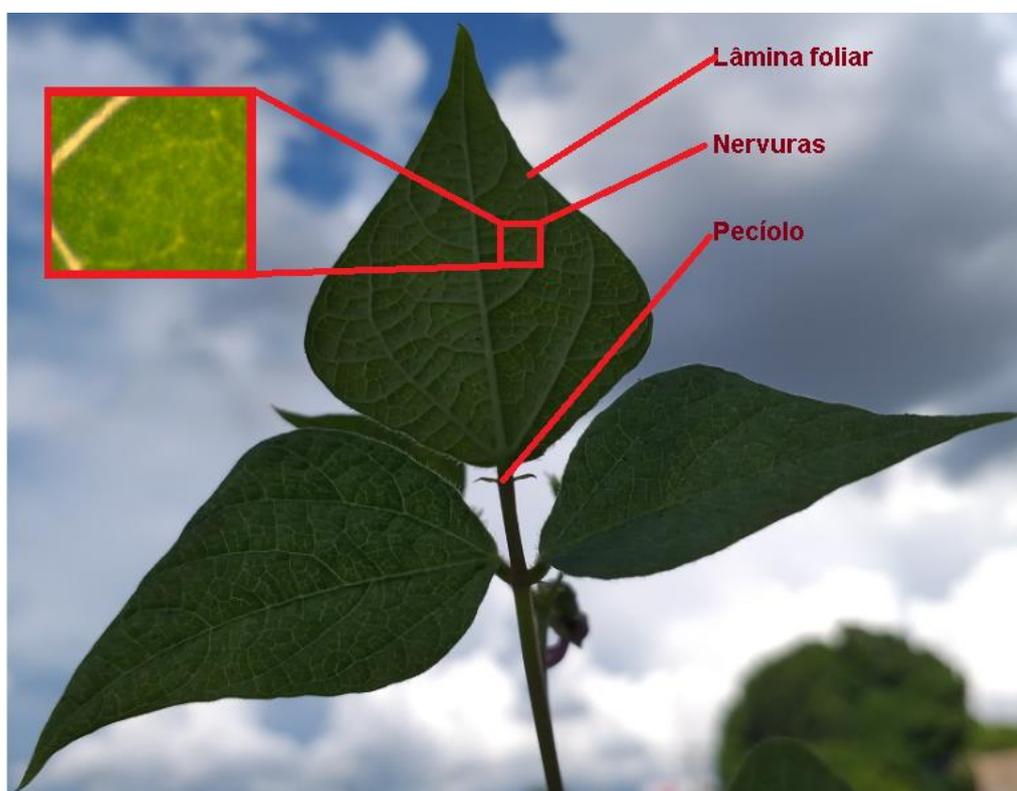
A folha é um apêndice caulinar que surge na região nodal (THOMAZ et al., 2009). Existem folhas de inúmeras formas, cores e estrutura. Geralmente, apresentam

morfologia externa achatada e fina, tecido clorofiliano, sendo constituídas basicamente de três estruturas: lâmina foliar ou limbo, pecíolo e bainha, apresentadas na Figura 2.

A lâmina foliar é geralmente achatada; possui uma multiplicidade de aspectos: lisa ou recoberta de pelos, inteira ou dividida em folíolos e com bordas que podem se apresentar lisas, dentadas, incisadas, crenadas, entre outras. O pecíolo é a haste, geralmente cilíndrica, que une o limbo ao caule. Pode estar preso à base do limbo ou à sua porção mediana. Folhas que não apresentam limbo são chamadas de sésseis.

Nas monocotiledôneas, há uma parte mais dilatada na base do pecíolo, chamada de bainha, que prende a folha ao caule. Já, nas dicotiledôneas, ocorrem em bem poucas espécies.

Figura 2 – Folhas do *Phaseolus Vulgaris L.*

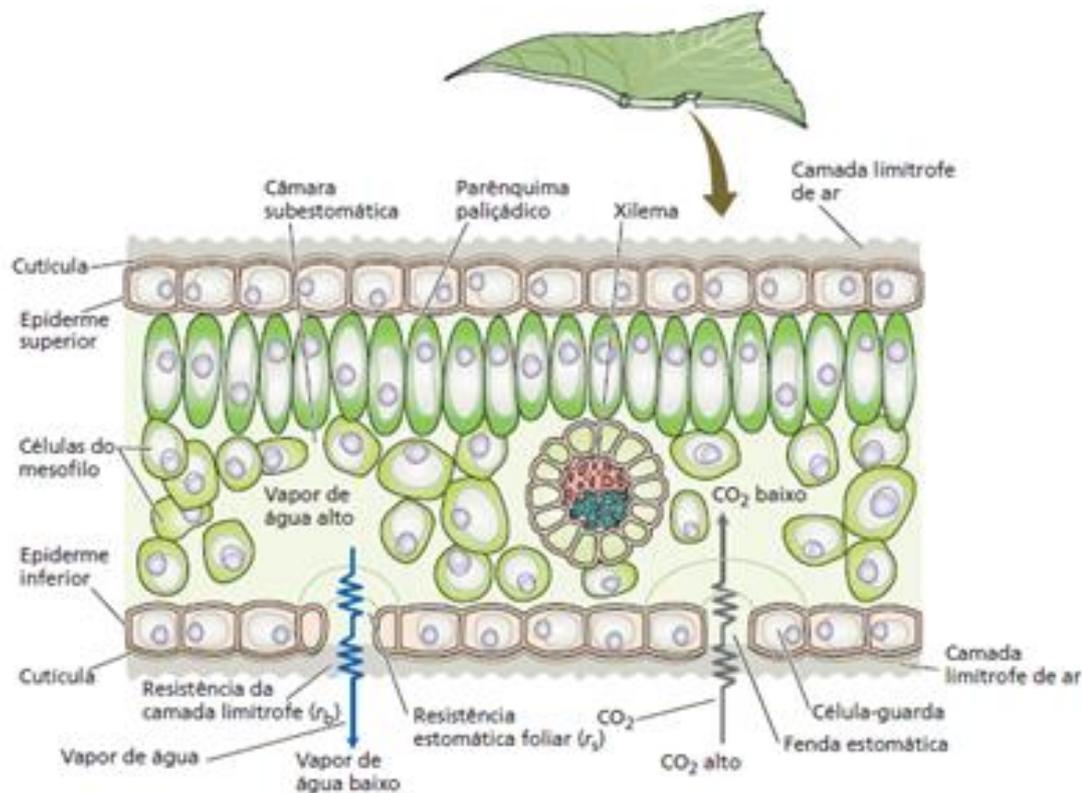


Na imagem menor tem-se um aumento mostrando as nervuras por onde a água é distribuída para as células.

A estrutura folha é dividida em epiderme, estrutura que recobre e protege a folha e mesofilo, parte interna da folha. Há resistência tanto ao fluxo de saída de vapor d'água quanto ao fluxo de entrada de gás carbônico. Essa resistência depende

do quanto o ostíolo está aberto. A Figura 3 ilustra a estrutura foliar, o fluxo hídrico em forma de vapor e a captação de CO₂.

Figura 3 – Estrutura foliar interna



Retirado de Taiz e Zeiger (2017).

2.4.2 – Célula vegetal

De acordo com Cid e Teixeira (2017), a célula vegetal é eucariótica e composta de diversas organelas como mitocôndrias, retículos endoplasmáticos lisos e rugosos, ribossomos, sistemas golgiense e peroxissomos, assim como as células animais. Compõe-se também de parede celular, plastos, glioxissomas e vacúolos, que são estruturas exclusivas dos vegetais.

A parede celular encontra-se externamente à membrana plasmática. Tem como funções proteger a célula contra danos mecânicos e patogênicos e proteção contra a entrada de água em excesso. É constituída principalmente por celulose, proteínas e outros polissacarídeos.

Os plastos têm diversas funções como armazenamento, fotossíntese, síntese de aminoácidos e ácidos graxos. Quando possuem clorofila, são chamados de

cloroplastos. Se possuem carotenoide, são chamados de cromoplastos. Os plastos, presentes em tecidos não fotossintéticos e com função de armazenamento de energia, são chamados de leucoplastos, porque não possuem pigmentação.

Os vacúolos são estruturas citoplasmáticas com tamanhos variados e revestidos por membrana; têm a função de armazenamento; ocupam significativo volume celular e, dependendo da espécie, armazenam variadas substâncias com especialização evolutiva bastante diversificada.

2.4.3 - Complexo Estomático

O complexo estomático é encontrado na parte aérea fotossintetizante da planta, principalmente nas folhas. Podem ser encontrados na face superior (adaxial), inferior (abaxial), ou em ambas faces (anfiestomática). Tem variação de densidade superficial e de distribuição de espécie para espécie e também entre indivíduos da mesma espécie. Fatores como diferenças climáticas e habitat estão relacionados diretamente com a sua quantidade (APEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

O complexo estomático é formado por duas células-guarda, por células subsidiárias e pelo ostíolo. Internamente ao complexo estomático, as células do mesofilo delimitam um espaço intercelular amplo: é a câmara subestomática, que se comunica, por sua vez, com outros espaços internos ao mesofilo denominados espaços intercelulares.

O estômato, segundo Almeida e Almeida (2018), é formado por duas células diferenciadas da epiderme denominadas de células-guarda. As células-guarda têm formato reniforme, possuem cloroplastos e apresentam espessamento acentuado no ostíolo. A principal função desse conjunto é proporcionar a comunicação do interior da planta com a atmosfera adjacente, para que ocorra o envio de água em forma de vapor para a atmosfera e absorção de CO₂ pela planta.

2.4.4 - Epiderme

As células da epiderme apresentam-se, na maioria dos casos, em formato tabular, compactas, justapostas de maneira a não haver espaços intercelulares e com vacúolo desenvolvido (APEZZATO-DA-GLÓRIA e CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

A epiderme é formada geralmente por uma única camada de células. Além das células epidérmicas fundamentais, podem ser encontrados apêndices, formados por uma ou mais células, denominados tricomas, que são estruturas com aspecto de pelos ou escamas presas aos espaços entre as células da epiderme. Também na epiderme encontram-se os estômatos que controlam as trocas gasosas. (VIEIRA et al., 2010)

A folha é recoberta pela cutícula, camada não celular formada por uma substância lipídica, semelhante à cera, denominada cutina, cujas funções são: dificultar a saída de água, proteção mecânica contra agentes externos e limitar a entrada excessiva da radiação solar (CASTRO, 2019).

De acordo com Taiz e Zeiger (2017), ostíolos são fendas microscópicas que permitem a comunicação entre o interior da folha com a atmosfera. A abertura e o fechamento de um ostíolo ocorrem em função do grau de turgidez dos estômatos e proporcionam as trocas gasosas, quando o vapor d'água é enviado para a atmosfera e o gás entra para a câmara estomática, respectivamente. A densidade dos estômatos na epiderme pode variar muito na área foliar de uma mesma folha. Pode ocorrer também na epiderme foliar em diversas plantas, células subsidiárias associadas aos estômatos, as quais podem ser semelhantes ou não morfológicamente às demais células da epiderme, formando o chamado complexo estomático.

2.4.5 - Células Subsidiárias

Também denominadas de células companheiras, podem estar ou não presentes circundando o estômato; dependendo da espécie, podem estar relacionadas ontogeneticamente ou não ao estômato (APEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006). As células subsidiárias participam no envio e recebimento do fluxo hídrico com as células-guarda e com as células da epiderme.

Os estômatos podem ser classificados quanto à disposição, a presença ou a ausência das células subsidiárias: Anomocíticos (sem presença de células subsidiárias), anisocítico (presença de três células subsidiárias de tamanho diferentes), paracítico (duas células subsidiárias com seus eixos maiores dispostos paralelamente ao das células-guarda. e diacítico (duas células subsidiárias dispostas

perpendicularmente ao das células-guarda). (APEZZATO-DA-GLÓRIA e CARMELLO-GUERREIRO, 2006)

2.4.6 - Mesofilo

O mesofilo é o tecido interfoliar composto principalmente pelo parênquima clorofiliano (clorênquima), o mesofilo é caracterizado pela presença de cloroplastos e por um grande volume de espaços intercelulares. Em muitas plantas, principalmente nas dicotiledôneas, distinguem-se dois tipos de parênquima clorofiliano: o paliçádico e o lacunoso (APEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006).

O parênquima paliçádico localiza-se abaixo da epiderme da face adaxial ou então nas duas faces. É composto por células cilíndricas, emparelhadas, separadas por pequenos espaços intercelulares.

O parênquima lacunoso tem formato ligeiramente arredondado e localiza-se logo acima da epiderme da face abaxial ou entre as camadas de parênquima paliçádico. Possuem grande espaço intercelular (Figura 4).

Na parte interna da folha, anexa ao complexo estomático, encontra-se a câmara subestomática, que por sua vez, se comunica com os espaços intercelulares do mesofilo. Nas câmaras subestomáticas e nos espaços intercelulares, a água muda de estado líquido para vapor.

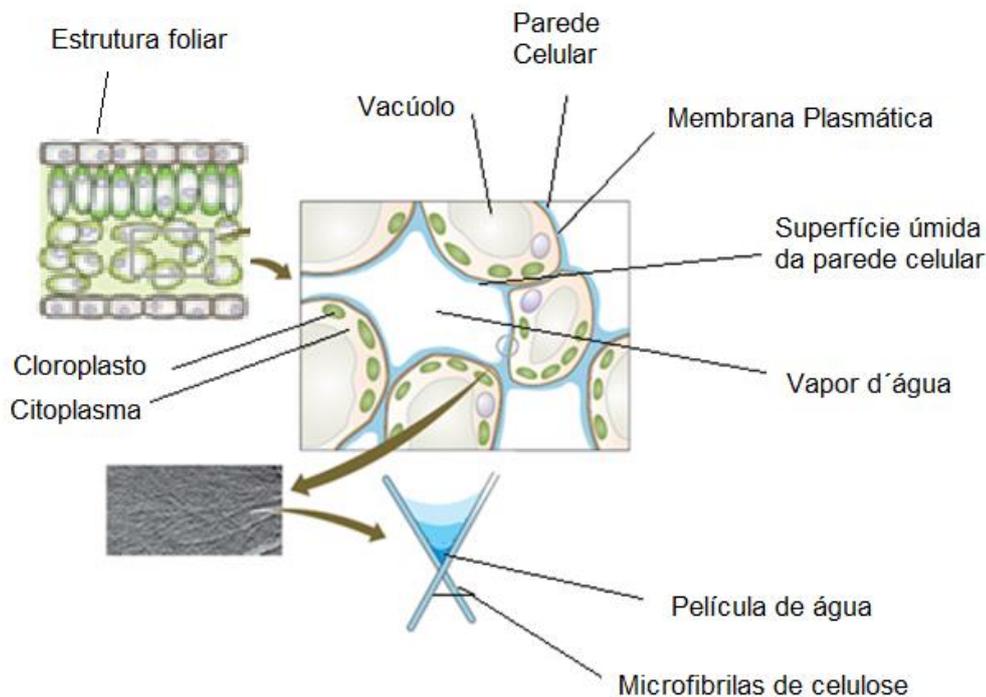
A área interna do espaço intercelular é 7 a 30 vezes maior que a área foliar externa (TAIZ; ZEIGER, 2017). Neste espaço de grande volume, a água muda de fase, de líquido para vapor. De acordo com Kerbauy (2004), a água que, vinda do xilema, chega às paredes externas das células do mesofilo, em função da pressão negativa exercida devido à diferença de potencial hídrico entre os espaços intercelulares e a atmosfera adjacente à folha, adere-se às microfibrilas de celulose e outras superfícies hidrofílicas formando uma película. Os níveis das forças de tensão superficial da água na película são próximos às encontradas nos poros capilares das raízes no solo. O potencial hídrico elevado na superfície da água e do ar, contido nos espaços intercelulares, provoca a formação de meniscos curvos (Figura 4), ampliando a área de contato e propiciando uma taxa de evaporação elevada. O aumento da evaporação faz com que a curvatura dos meniscos seja cada vez maior, gerando uma tensão

negativa também maior que, por sua vez, desloca mais água para a superfície, conforme Equação 7.

$$\Psi_p = \frac{-2\gamma}{r} \quad (7)$$

γ é a tensão superficial da água ($7,28 \times 10^{-8} \text{ Mpa.m}^{-1}$) e r é o raio de curvatura do menisco.

Figura 4 – Espaço intercelular no mesofilo



Evaporação na interface ar-água nos espaços intercelulares do mesófilo, causa pressão negativa mantendo o contínuo solo-planta-atmosfera. Modificado de Taiz e Zeiger (2017)

2.5 - FLUXO HÍDRICO

Reichardt e Timm (2012) salientam que o sistema solo-planta-atmosfera foi inicialmente compreendido como um contínuo por Gardner (1960), Cowan (1965) e Philip (1966). A água é movida em fluxo no sentido de diminuição de sua energia potencial. A teoria de tensão-coesão-adesão (Dixon e Joly (1894) explica a manutenção desse fluxo hídrico no interior da planta. Taiz e Zeiger (2017) acrescentam que o fluxo hídrico, no interior da folha, encontra resistência a sua passagem em decorrência da membrana plasmática nas células do mesofilo e da epiderme. Nos

espaços intercelulares, a água muda de estado, tornando-se vapor d'água. O seu percurso, passando pela câmara subestomática, até alcançar a atmosfera adjacente é facilitado ou dificultado em função da umidade relativa do ar interna, da espessura dos canais de comunicação e da abertura do ostíolo.

Os espaços intercelulares abastecem a câmara subestomática de vapor. Em condições micrometeorológicas adequadas, as células-guarda ficam túrgidas e ocasionam a abertura do estômato. O estíolo aberto proporciona a saída do vapor d'água para o exterior da folha pelo ostíolo. Se essa saída de vapor d'água for intensa e a reposição de água nas células não compensar as perdas, as células-guarda perderão a turgidez e o estômato se fechará, como uma medida de proteção da planta. Assim, o estíolo pode ser entendido como um dispositivo de passagem de CO₂ da atmosfera para a câmara subestomática e de vapor d'água do interior da folha para a atmosfera, em função da diferença de potencial hídrico entre a atmosfera adjacente e a câmara subestomática (JUNQUEIRA, 2005). Embora pequena, há também uma perda de água, por evaporação, da célula-guarda para a atmosfera, tal qual ocorre com as células da epiderme (TAIZ; ZEIGER, 2017).

A abertura e o fechamento dos estômatos dependem de fatores bióticos e abióticos (PES; ARENHARDT, 2015) e ocorrem de maneira interligada, apesar de não haver um comando central (BERG, 2014). A ocorrência simultânea desses fatores torna a modelagem complexa, porém podemos relacionar, como consequência da alteração desses fatores, o potencial hídrico das células da epiderme e dos estômatos.

As alterações de fatores como radiação, temperatura, umidade relativa do ar, concentração de dióxido de carbono, disponibilidade hídrica, vento, entre outros, fazem a quantidade de água absorvida e perdida por uma planta variar. (JOHNSSON, 2002).

O potencial osmótico (Ψ_{cg}) se altera em função da concentração de solutos no citosol, tornando a célula-guarda túrgida ou flácida, de acordo com a Equação 4. (TAIZ e ZEIGER, 2017).

Taiz e Zeiger (2017) esclarecem que a abertura e o fechamento estomático têm a colaboração ativa das células da epiderme. Ao receber os solutos das células adjacentes, o estômato aumenta seu volume e sua pressão osmótica. Ao mesmo tempo, as células adjacentes diminuem o seu tamanho e seu turgor, facilitando a expansão das

células-guarda e conseqüente abertura do estíolo. De forma inversa, o fechamento do estíolo se faz com a transferência dos solutos das células-guarda para as células epidérmicas adjacentes.

O déficit de pressão de vapor entre a parte interna da folha e o ar é fator importante na abertura estomática, sendo que a sua elevação leva ao fechamento do ostíolo devido à defasagem do fluxo hídrico para o estômato e a demanda evaporativa da atmosfera (MARIN, 2003).

Buckley (2005) afirma que mesmo estando as células-guarda turgidas, o estíolo pode não se abrir, em função das células da epiderme estarem com um potencial osmótico elevado, provocando uma força que impede a abertura do estômato. Da mesma forma, é possível o estíolo abrir-se, sem que a célula-guarda esteja turgida, em função das células da epiderme estarem flácidas, isto é, com potencial osmótico (em módulo) muito baixo. Assim, as células da epiderme influenciam a abertura e fechamento do estíolo. Esse fenômeno foi denominado de vantagem mecânica da epiderme (m).

Segundo Weyers e Meidner (1990 apud LAWSON, 2008), a dinâmica de abertura e fechamento estomáticos pode ser expressa matematicamente por meio da Equação 8.

$$a_s = A_0 + b_g * \Psi_{pg} + b_e * \Psi_{pe} \quad (8)$$

a_s é a abertura estomática, A_0 é a abertura inicial do ostíolo, b_g e b_e são coeficientes que indicam o efeito sobre a variação da abertura do ostíolo da célula-guarda e da célula da epiderme respectivamente. Mantendo-se constantes os demais parâmetros da Equação. Ψ_{pg} e Ψ_{pe} são os potenciais de pressão das células-guarda e das células da epiderme, respectivamente.

A razão b_g/b_e , a qual Weyers e Meidner (1990) denominaram de razão de antagonismo (A_r), é normalmente maior que 1 e varia de acordo com a espécie de planta e com a largura do poro.

Mott e Peak (2007), ao estudar a reação dos estômatos em diferentes condições de temperatura e umidade, concluiu que as aberturas e fechamentos dos estômatos ocorrem em grupos de estômatos próximos uns aos outros, como se obedecessem a um comando central, apesar de não haver uma rede para interligá-los.

2.6 – CARACTERÍSTICAS DO *PHASEOLUS VULGARIS L.*

Segundo Kappes et al(2008), o *Phaseolus Vulgaris L.* é uma leguminosa herbácea, importante fonte proteica, cultivada em todo o Brasil, com notória importância socioeconômica e tem um ciclo de vida em torno de 95 dias. É uma planta dicotiledônea com folhas primárias simples e opostas e folhas definitivas são trifoliadas com disposição alterna. O mesofilo é heterogêneo e assimétrico, isto é, apresenta uma camada com células do parênquima paliçádico e outra do lacunoso. (CASTRO, 2019)

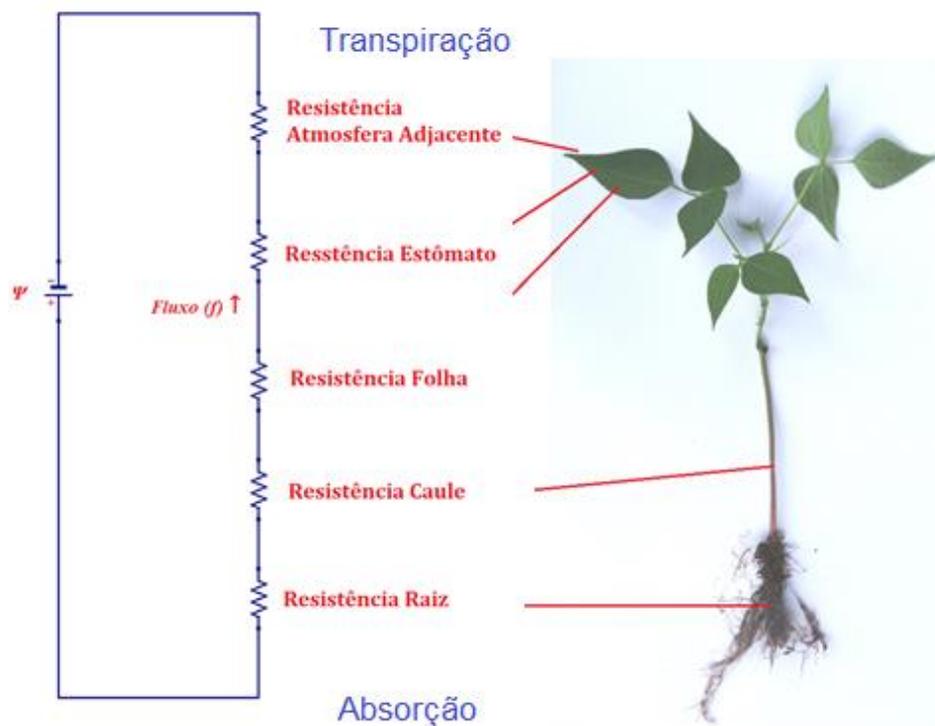
2.7 – ANALOGIA ENTRE FLUXO HÍDRICO E ELÉTRICO

O estudo do fluxo hídrico em plantas, a partir de uma analogia com o fluxo elétrico, mereceu atenção no século XX de pesquisadores como Lang e colaboradores (1969), Cowan (1972) e Farquhar e Cowan (1974). Segundo Kramer e Boyer (1995), o modelo desses pesquisadores mostrou-se uma simplificação excessiva, pois pressupõe um fluxo estável e uma resistência constante, condições que raramente existem.

Mais recentemente, na segunda década deste século. Novos modelos foram propostos, dentre eles Hills et al. (2012) e Sun et al. (2014). No PPGFA, o uso de um software de análise de circuitos elétricos está sendo utilizada para resolver as equações do modelo análogo (GAIO, 2011; PEREIRA, 2013, 2016; PEREIRA et al, 2015; SIQUEIRA, 2014; LIMA, 2017)

Na Figura 5, é possível observar que o fluxo hídrico (f) ascendente do solo, ao passar pela planta, através da raiz, do xilema, da folha, do estômato e atmosfera adjacente à folha, responde à diferença de potencial hídrico ($\Delta\psi$), entre a atmosfera e o solo. A resistência equivalente corresponde à soma das resistências R_{raiz} , R_{caule} , R_{folha} , $R_{estômato}$ e $R_{atmosfera\ adjacente}$ (TYREE E EWERS, 1991). Em consequência, a constante de proporcionalidade entre a diferença de potencial hídrico ($\Delta\psi$) e o fluxo hídrico (f) pode ser definida como a resistência ao fluxo hídrico (R), que é dada em $MPa.s.m^{-3}$. De acordo com a primeira lei de Ohm análoga, a resistência ao fluxo hídrico é a constante de proporcionalidade entre o fluxo hídrico e o potencial hídrico que o gerou.

Figura 5 – Analogia do fluxo elétrico com o fluxo hídrico no SPA



Adaptado de Tyree e Ewers (1991).

Hunt et al. (1991) estabeleceram um conjunto de relações análogas entre variáveis relativas ao fluxo hídrico no contínuo SPA e circuitos elétricos (Tabela 2).

Tabela 2 – Analogia entre grandezas relativas aos fluxos hídrico e elétrico

FLUXO HÍDRICO		FLUXO ELÉTRICO	
GRANDEZA	UNIDADE	GRANDEZA	UNIDADE
VOLUME (W)	m^3	CARGA (Q)	Coulomb (C)
POTENCIAL (ψ)	Mpa ou $J.m^3$	POTENCIAL (V)	J/C
FLUXO (f)	$m^3.s^{-1}$	CORRENTE (I)	C/s
RESISTÊNCIA (R)	$MPa.s.m^{-3}$	RESISTÊNCIA (R)	V/A
CAPACITÂNCIA (C)	$m^3.MPa^{-1}$	CAPACITÂNCIA (C)	C/V

Fonte: Hunt (1991)

Gaio (2011), dado ser o potencial hídrico, no contínuo solo-planta-atmosfera, uma variável de estado, e de a massa de água ser uma grandeza conservada, estabeleceu Leis de Kirchhoff análogas para o circuito hídrico, de modo a permitir análise de circuito equivalente à utilizada para o caso elétrico.

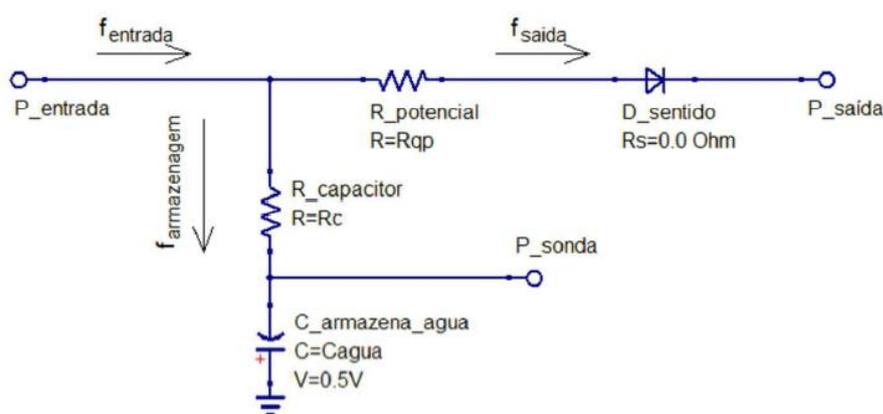
1 - A Lei dos Nós para o fluxo hídrico considera que a soma dos fluxos hídricos que entram em um nó é igual à soma dos fluxos hídricos que saem deste nó. Operacionalmente, o nó pode ser qualquer ponto do circuito hídrico. Considerando um volume infinitesimal sem fontes ou sorvedouros e a incompressibilidade da água, a Equação da continuidade garante que os fluxos que entram neste volume são iguais aos fluxos que dele saem.

2 - A Lei das Malhas estabelece que, em um circuito hídrico, “a diferença de potencial hídrico entre dois pontos quaisquer do fluxo hídrico independe do caminho seguido pela água”.

2.8 – MODELO BASE

Gaio (2011), apoiado na analogia entre fluxo elétrico e fluxo hídrico, proposta por Hunt, 1991, pelos experimentos de Denmead e Shaw, Dixon e Joly (1894), Zweifel et al. (2007) e também de Thornthwaite e Mather (1955), Dourado-Neto et al. (2010), bem como nas Leis análogas de Ohm e de Kirchhoff, estabeleceu um modelo, que responde à maneira da fisiologia da planta, a partir de um bloco análogo básico, apresentado na Figura 6, onde “o fluxo de entrada ($f_{entrada}$) separa-se, de acordo com a lei dos nós, nos fluxos de saída (f_{saida}) e armazenagem ($f_{armazenagem}$), os quais dependem das resistências R_c e R_{qp} relativas aos resistores nomeados por $R_{potencial}$ e $R_{capacitor}$, respectivamente” (GAIO, 2011).

Figura 6 – Circuito básico



Fonte: Gaio (2011)

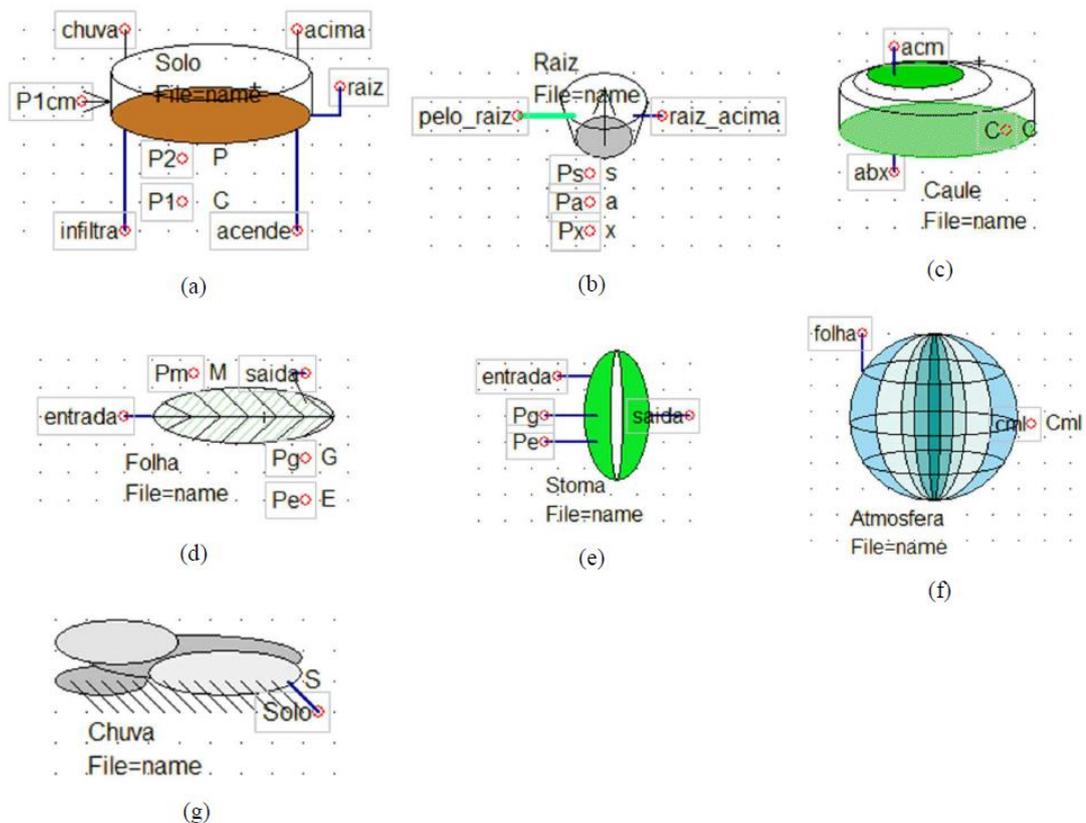
O fluxo hídrico entra pela porta $P_{entrada}$ e divide-se: uma parte será armazenada no capacitor $C_{armazena_agua}$, tendo passado pelo resistor de carregamento $R_{capacitor}$, e outra parte do fluxo hídrico vai para a porta de saída $P_{saída}$, passando por $R_{potencial}$ e pelo diodo $D_{sentido}$, desde que haja diferenças de potencial entre os bornes $P_{saída}$, $P_{entrada}$ e P_{sonda} .

A direção e intensidade dos fluxos hídricos, da mesma forma como os elétricos, ocorrem de acordo com a Lei dos nós de Kirchhoff (Equação 9)

$$f_{entrada} = f_{armazenagem} + f_{saída} \quad (9)$$

A partir do circuito básico e utilizando os recursos do QUCS, Gaio (2011) concebeu e encapsulou os componentes de uma planta vascularizada, considerando os aspectos de armazenamento de água e as relações dos vários blocos que compõe o sistema, a partir da fisiologia da planta, conforme a Figura 7.

Figura 7 – Componentes hídricos de uma planta

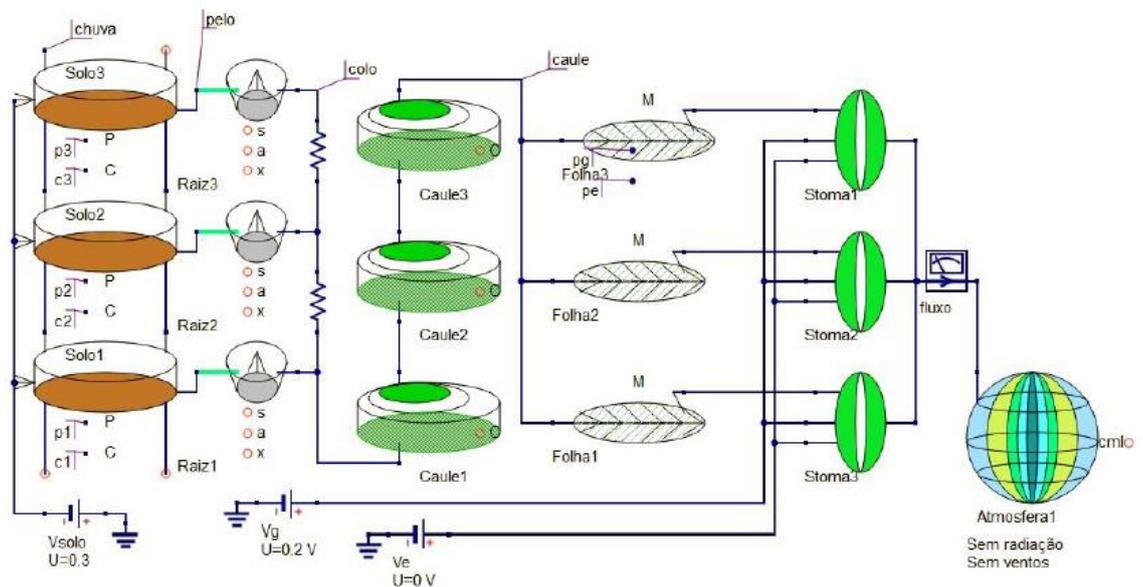


Módulos independentes de cada componente do contínuo solo-planta-atmosfera: (a) solo; (b); raiz; (c) caule; (d) folha; (e) estômato; (f) atmosfera e (g) precipitação.

O modelo proposto por Gaio (2011), de circuitos análogos para cada componente do solo, da planta e da atmosfera, permite estudar esses componentes separadamente ou interligados.

Uma representação típica do contínuo solo-planta-atmosfera é apresentada na Figura 8, na qual tem-se três circuitos do solo, com diferentes características, representando camadas de solo, em função tanto do alcance das raízes quanto da profundidade; três circuitos para as raízes, nas diferentes camadas do solo que se encontram conectadas; três circuitos do caule, contemplando as suas características de acordo com a altura da planta; três circuitos das folhas, modelando a totalidade das folhas; três circuitos de estômato, onde cada circuito modela a quantidade total de estômatos daquele grupo de folhas que a ele se liga; e o circuito da atmosfera, que modela as características da atmosfera junto ao dossel da planta nas condições de contorno determinadas.

Figura 8 – Modelo completo do SPA proposto por Gaio (2011)



2.9 - CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA NA ATMOSFERA

Pereira et al. (2007) esclarecem que a pressão de vapor de saturação (e_s), pode ser calculada a partir da temperatura do ar de acordo com a equação de Tetens (Equação 10).

$$e_s = A * 10^{\frac{7.5*T}{237.3+T}} \quad (10)$$

Temperatura (T) em graus célsius e A é uma constante de valor 610,8 kPa.

A massa de vapor d' água (m_v), calculada a partir da Equação Geral dos Gases, com a pressão igual a de vapor de saturação em uma dada temperatura (T_{ar}), determina a máxima quantidade de água em um determinado volume de ar (V) nesta temperatura (Equação 11).

$$m_v = \frac{288 * e_s * V}{273 + T_{ar}} \quad (11)$$

A capacitância (C) é calculada por meio da Equação 12.

$$C = \frac{e_s}{m_v} \quad (12)$$

2.10 – QUCS

O QUCS, abreviação de *Quite Universal Circuit Simulator*, é um aplicativo de código aberto, licenciado pela GPL, desenvolvido para desenhar e simular circuitos elétricos, inclusive circuitos integrados, além de calcular e gerar gráficos (SOURCEFORGE, 2019). É uma ferramenta fundamental no desenvolvimento de circuitos hídricos análogos, desde os desenhos dos circuitos até a simulação dos fluxos de armazenamento hídrico. O software possui vários recursos como encapsulamento de circuitos, criação de dispositivos (conforme as funções e propriedades do componente do SPA) e integração desses dispositivos. Desta maneira, torna-se possível desenvolver circuitos análogos elétricos em blocos e realizar calibração, parametrização e validação da modelagem.

2.11 - MÉTODO PLANIMÉTRICO DE JEFFRIES

O Método Planimétrico de Jeffries consiste em desenhar um círculo de área conhecida na micrografia. A quantidade de células inseridas no círculo é contada e dividida pela área. O resultado é a densidade de células. Realizando-se um número determinado de medidas em diferentes posições da folha determina-se a média da quantidade de células por uma determinada área. Com esse valor é calculada a quantidade total de células de uma folha (Equação 13) (UNESP, 2019).

$$n_{cel} = \frac{n_1 + \frac{n_2}{2}}{A_m} A_f \quad (13)$$

n_{cel} é o número de células total da área foliar, n_1 é a quantidade de células completamente inseridas na área da circunferência A_m , n_2 é o total de células que não estão dentro completamente em A_m , e A_f é a área foliar média de planta.

2.12 – ESCALABILIDADE

Segundo Hill (1990), o conceito de escalabilidade é reivindicado por diversas áreas do conhecimento e por esta razão não tem uma definição única.

Henderson (2006) define escalabilidade como a predisposição com que um sistema ou componente, ao ser modificado, atende à um problema. Assim a escalabilidade pode estar ligada à qualidade, à quantidade, à repetitividade, à velocidade, à eficiência de um serviço ou produto.

A escalabilidade pode ser dividida em dois tipos. A escalabilidade vertical ocorre quando se melhora a velocidade ou a qualidade de resposta de um processo adicionando novos recursos ao sistema ou se se mantém a velocidade de processo ainda que ocorra um aumento de demanda do sistema. A escalabilidade horizontal ocorre quando se adiciona nós à arquitetura do sistema de modo que o processamento do sistema seja distribuído (GREGOL, 2013).

2.13 – VALIDAÇÃO

De acordo com Arnold et al. (2012), calibrar é ajustar um modelo generalizado de modo que ele represente processos e condições de contorno específicas. Durante a calibração, os parâmetros do modelo são otimizados em um esforço para aumentar a precisão e reduzir a incerteza de previsão do modelo. A calibração é realizada selecionando os valores dos parâmetros do modelo e ajustando-os dentro dos limites recomendados e comparando variáveis de saída previstas com dados observados para um determinado conjunto de condições.

Venkatesh et al. (2011) explicam que com o modelo calibrado, realizam-se simulações de modo a comparar os resultados com as observações reais: é a validação do modelo. Finalmente, a avaliação estatística demonstra se a modelagem é capaz de simular os processos.

Field (2014) esclarece que o coeficiente de correlação de postos de Spearman (ρ) é uma medida não paramétrica, não quantitativa, que não requer a suposição de que as variáveis sejam lineares, que avalia a dependência estatística entre duas variáveis, sendo negativa para relação oposta e positiva para relação perfeita. Se 1, a relação é perfeita, e, se zero, as relações não possuem vínculo.

A fim de avaliar o grau de ajuste entre os dados de fluxos experimentais e simulados, os erros foram medidos por meio das métricas EMA (Erro Médio Absoluto), em m^3s^{-1} , e EPMA (Erro Percentual Médio Absoluto), conforme as equações 14 e 15.

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^N |FS_i - FE_i|}{N} \quad (14)$$

$$EPMA = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{FS_i - FE_i}{FE_i} \right|}{N} \times 100 \quad (15)$$

Em ambas equações, FS_i é o valor simulado no QUCS, FE_i é o valor experimental e N é o número de observações. Além disso, as correlações foram analisadas por meio dos coeficientes de correlação dos postos de Spearman (nível de significância de 1%) e de determinação (R^2).

O *scatterplot matrix* é um conjunto de diagramas de dispersão relacionando duas a duas variáveis comparáveis dispostos em forma de matriz. O valor de R^2 quanto mais for próximo a 1 expressará que há uma relação estruturada entre as variáveis estudadas (NIST/SEMATECH, 2020)

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – DADOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de realizar a calibração e a validação do modelo desenvolvido, foi realizado um arranjo experimental no pátio da estação meteorológica “Mestre Bombled” situada na Universidade Federal de Mato Grosso, campus Cuiabá, coordenadas 15° 36’ 31’’ S de latitude e 56° 03’49’’ W de longitude. O experimento foi composto por 198 lisímetros de pesagem com uma única planta de *Phaseolus vulgaris L.* em cada lisímetros. Foram divididos em 15 tratamentos com diferentes quantidades de água no

solo. Os lisímetros foram distribuídos em três mesas com 66 lisímetros de pesagem cada uma, dispostos em forma matricial de 6×11. A Figura 9 mostra uma das mesas.

Figura 9 – Mesa com o cultivo de *Phaseolus Vulgaris L.*



Em cada lisímetro de pesagem foi colocada uma quantidade estabelecida de solo úmido. Utilizando-se a diferença entre solo úmido e solo seco (obtido com amostras dos tratamentos submetidos à secagem por estufa) foi possível obter-se a quantidade inicial de água no solo de cada lisímetro de pesagem.

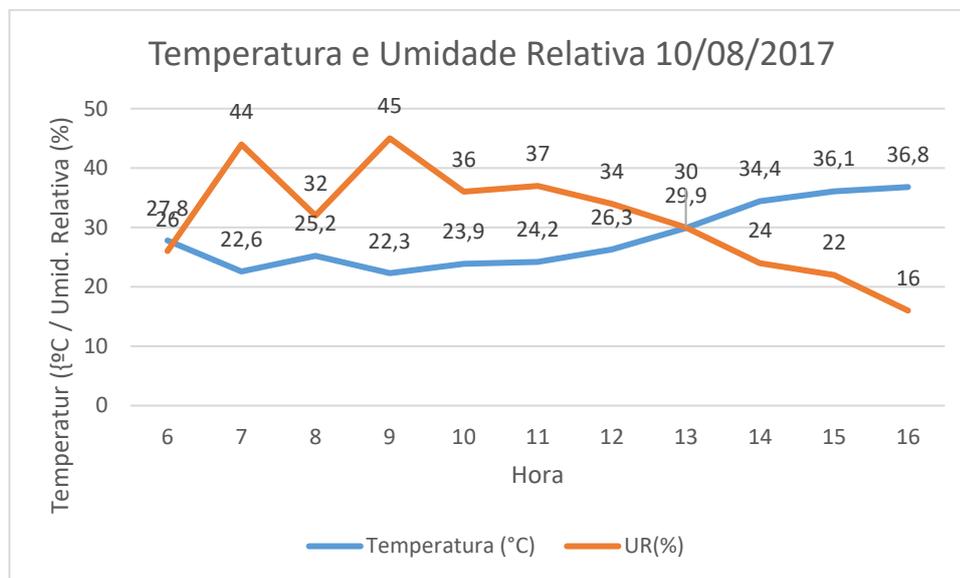
Foi realizada a análise física de composição do solo, no laboratório Agroanálise Laboratórios Integrados, em Cuiabá-MT. O resultado da análise apontou que o solo empregado no experimento possui 62,3% de areia, 14,6% de silte e 23,1% de argila.

Após a terceira semana de plantio, no dia 10/08/2017, dia típico de período de seca, com o cultivo apresentando-se em estágio fenológico de emissão do terceiro trifólio, V4, foram realizadas cinco medições de transpiração, além de a realização de medições da massa seca das folhas, área foliar e densidade de estômatos (LIMA, 2017).

Para obter-se a transpiração, foram realizadas cinco medições do peso de cada lisímetro ao longo do dia, com intervalo de duas horas. A diferença entre pesos é a quantidade de água transpirada, uma vez que houve uma vedação impedindo o contato do solo com a atmosfera, de acordo com Ramakrishna et al.(2006). Após cada medição, a quantidade de água transpirada foi repostada.

A temperatura e a umidade relativa do ar (Figura 10), ao longo do dia 10/08/2017 - período de seca em Cuiabá-MT -, foram cedidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET,2018),

Figura 10 – Variação da temperatura e da umidade relativa do ar



Fonte INMET.

Após a medição da variação do peso dos lisímetros ao longo do dia, sucedeu um ensaio destrutivo. Foram separadas folhas, caule, raiz. Foram todos pesados e ensacados para secagem. Para a determinação da quantidade de água presente nas folhas foi obtida a sua massa seca utilizando-se uma estufa a 105°C, com desvio padrão de 5°C no Laboratório de Física de Solo, Departamento de Agronomia da UFMT. A diferença de peso entre as folhas de cada planta antes e depois da secagem é a quantidade de água armazenada na folha. A pesagem foi realizada com balança comercial com precisão de ± 1 g.

3.2 – ÁREAS DAS FOLHAS E DAS CÉLULAS DA EPIDERME

A área foliar foi obtida a partir de fotografias tiradas imediatamente após a sua. Separação, no dia 10 de agosto de 2017 (Figura 11) e medidas com o software ImageJ. O ImageJ, programa de domínio público, foi desenvolvido em Java por *National Institute of Health*, que possibilita a exibição, edição, análise e processamento de imagem (RODRIGUES, 2019). Este software foi utilizado para a obtenção da área foliar do experimento, bem como na quantificação e determinação da área das células da epiderme e de estômatos do *Phaseolus Vulgaris L.*

A Figura 11 apresenta uma das fotografias das folhas de uma das plantas *Phaseolus Vulgaris L.* utilizadas no experimento que foram estudadas para levantamento de área foliar e número de folhas por planta.

Figura 11 – Folhas de um pé de *Phaseolus Vulgaris L.*



Utilizando micrografias de lâminas com epiderme foliar abaxial (Figura 12) feitas por microscópio eletrônico Zeiss – Primo Star, lente 100x com óleo de imersão, no Laboratório de Microbiologia Geral/Campus Bela Vista/IFMT, foram estimadas a densidade de células da epiderme e de estômatos por mm^2 , área média dos estômatos e das células da epiderme por meio dos recursos do software ImageJ.

Figura 12 – Epiderme foliar de *Phaseolus Vulgaris L.*



3.3 – MODELAGEM

A estratégia adotada foi modelar cada componente da estrutura foliar separadamente, e conectá-los posteriormente. Assim foram produzidos estômato, célula epidérmica, célula do parênquima paliçádico, parênquima lacunoso, bem como os circuitos da fase gasosa do fluxo os quais são: espaço intercelular, câmara subestomática, ostíolo e atmosfera adjacente à célula da epiderme e atmosfera adjacente ao estômato.

O circuito desenvolvido por Gaio (2011), Figura 6, foi tomado como base para a modelagem dos diversos módulos, com modificações que respeitam as características de cada componente foliar.

A nomenclatura adotada objetiva evidenciar as resistências ao fluxo hídrico, as capacitâncias de armazenamento dos módulos e indicar as conexões entre módulos. As tabelas 3, 4 e 5 apresentam as nomenclaturas e as suas respectivas descrições utilizadas nos modelos.

Tabela 3 – Capacitâncias utilizadas nos modelos.

Nomenclatura	Componente
C_CE	Capacitância da Célula da Epiderme
C_Estom	Capacitância do estômato
C_PL	Capacitância do Parênquima Lacunoso
C_PP	Capacitância do Parênquima Paliçádico

Tabela 4 – Resistências utilizadas nos modelos.

Nomenclatura	Componente
R_Atm_adj_Estom	Resistência da Atmosfera adjacente ao estômato
R_CE	Resistência da célula da epiderme
R_CS	Resistência da Câmara Subestomática
R_Cutícula	Resistência da cutícula
R_EI	Resistência do Espaço Intercelular
R_Est	Resistência do estômato
R_PL	Resistência do Parênquima Paliçádico
R_PP	Resistência do Parênquima Paliçádico
R_PP_C	Resistência em série com o capacitor do P. Paliç.
R_X	Resistência no ramo se chegada do Xilema
RA_Estom	Resistência do estômato

Tabela 5 – Portas de acesso

Nomenclatura	Porta de acesso
P_Atm_Adj	Atmosfera adjacente à célula da epiderme
P_Atm_Adj_Estom	Atmosfera Adjacente ao estômato
P_CE	Conexão com a célula da epiderme
P_CS	Conexão com a Câmara Subestomática
P_CS_V_C	Tensão no capacitor da Câmara Subestomática
P_EI	Conexão com o Espaço Intercelular
P_EI_V_C	Tensão no capacitor do Espaço intercelular
P_EST	Conexão com o estômato
P_ESTOM_V_C	Tensão no capacitor do estômato
P_PL	Conexão com o Parênquima Paliçádico
P_PL_V_C	Tensão no capacitor do Parênquima Lacunoso
P_PP	Conexão com o Parênquima Lacunoso
P_PP_V_C	Tensão no capacitor do Parênquima Paliçádico

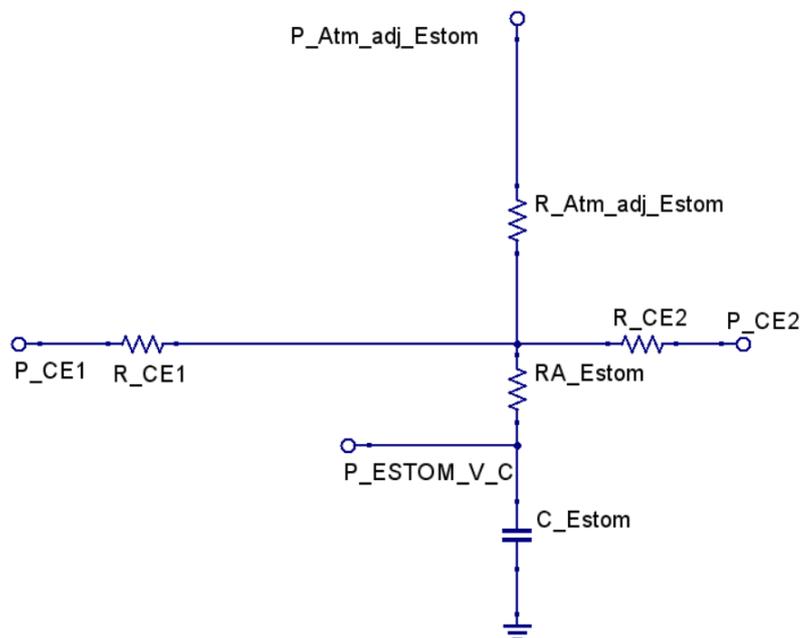
Os resistores nos ramos referem-se à dificuldade à passagem de fluxo hídrico entre os nós, e os capacitores referem-se aos armazenamentos de água nos circuitos das estruturas foliares.

3.3.1 – Estômato

O circuito hídrico-elétrico do estômato (Figura 13) apresenta as resistências aos fluxos hídricos entre estômato e células da epiderme. Haverá fluxo hídrico, em ambas direções, em função da diferença de potencial entre as células. A resistência ao fluxo hídrico para a atmosfera adjacente é devida à membrana da célula. Há também resistência ao fluxo hídrico ao armazenamento de água no capacitor. Foi colocada uma ponteira para medição do potencial no capacitor.

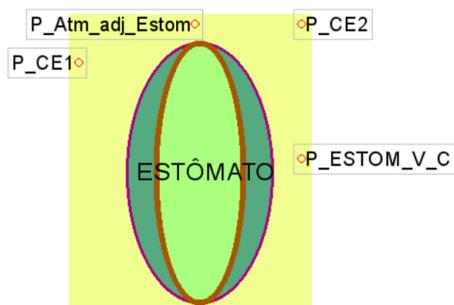
O ostíolo foi modelado separadamente do estômato, de tal modo que, apesar da abertura do ostíolo ser função do grau de turgidez dos estômatos, o sinal, com relação ao funcionamento do dispositivo ostíolo, é externo – passado do circuito célula-guarda e da célula da epiderme para o circuito ostíolo.

Figura 13 – Circuito análogo hídrico-elétrico do Estômato



O circuito foi encapsulado (Figura 14) com o intuito de caracterizar a sua função e facilitar o uso de réplicas no módulo base.

Figura 14 – Símbolo do encapsulamento do circuito análogo do Estômato



O retângulo amarelo, (presente em todos os circuitos), significa que são circuitos integrados. Esse é um recurso de edição do QUCS, denominado encapsulamento, realizado a partir do desenho de um símbolo para o circuito.

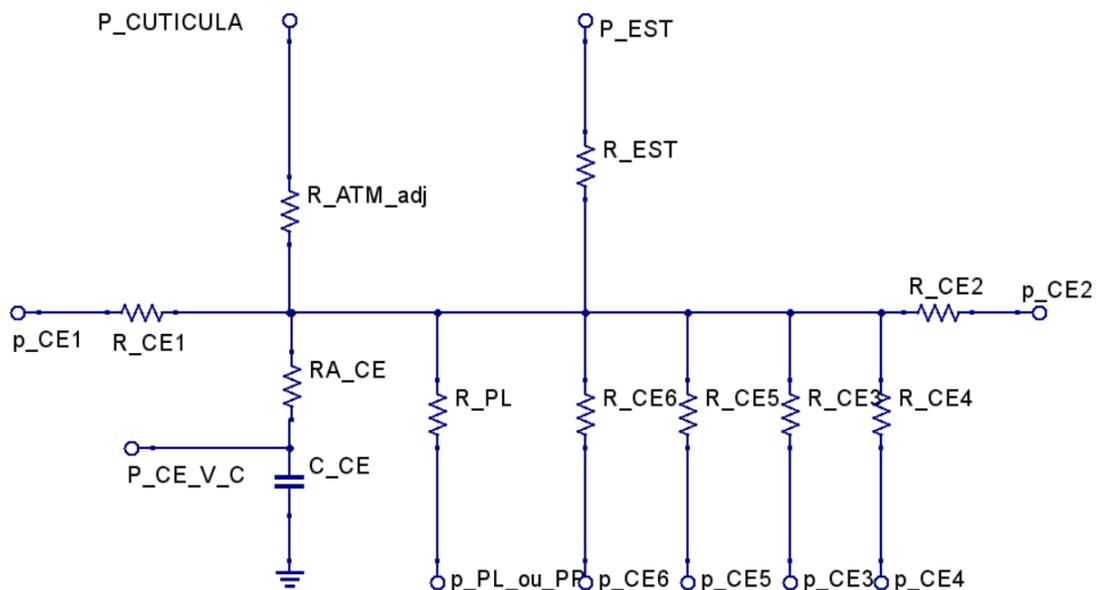
3.3.2 – Célula da Epiderme

Os fluxos hídricos entre células da epiderme, estômatos e células parenquimáticas ocorrem de modo bidirecional. Pelas células da epiderme, a planta fornece à atmosfera adjacente, a partir do fluxo hídrico, pequenas quantidades de vapor de água. Os

diversos ramos do circuito análogo do modelo interligam a célula da epiderme aos outros circuitos adjacentes, conforme a indicação das portas.

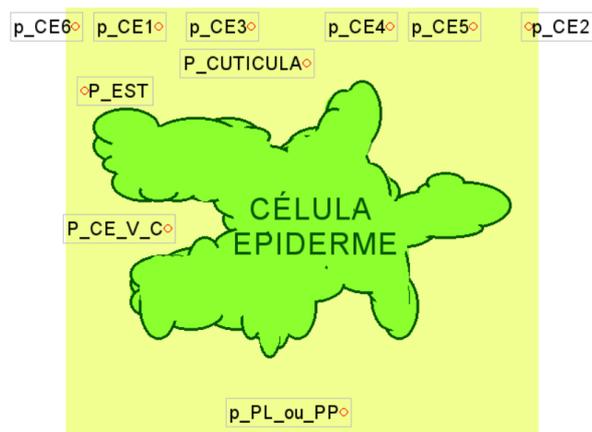
A Figura 15 apresenta o modelo análogo hídrico-elétrico da célula da epiderme. As células subsidiárias do estômato e as células da epiderme possuem características muito semelhantes do ponto de vista do fluxo e do armazenamento hídricos. Desta forma, não serão diferenciadas, isto é, serão modeladas pelo mesmo circuito.

Figura 15 – Modelo análogo hídrico-elétrico da célula da epiderme



O modelo do circuito encapsulado no QUCS é apresentado na Figura 16.

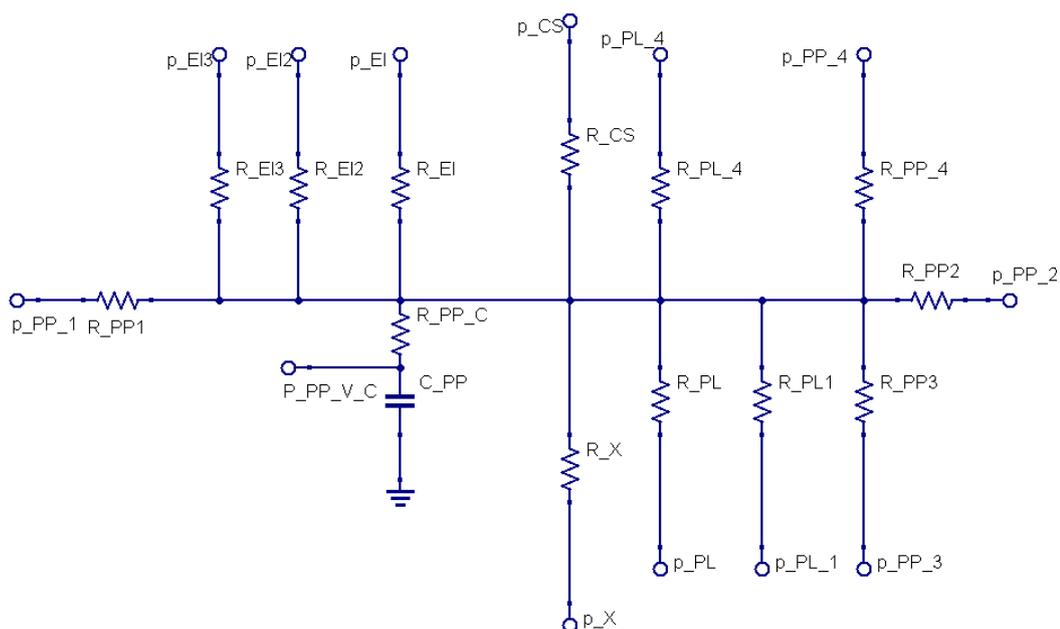
Figura 16 – Símbolo do circuito da célula da epiderme



3.3.3 – Parênquima Paliçádico

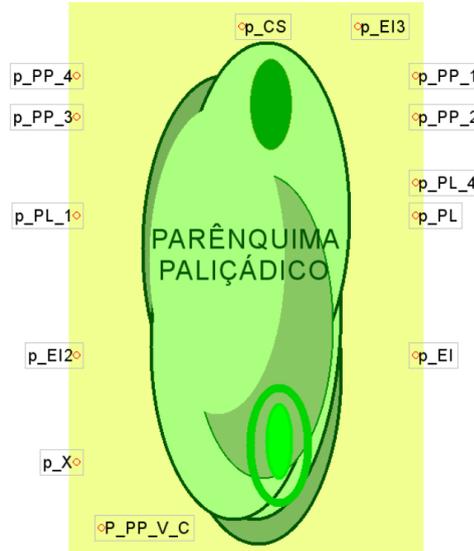
O análogo hídrico-elétrico de uma célula do parênquima paliçádico é apresentado na Figura 17. A principal entrada de fluxo hídrico dá-se pelo xilema, ponto de acesso P_X . Fluxos, em ambos os sentidos (entradas e saídas) entre células adjacentes através das portas de contato P_{PP1} , P_{PP2} , P_{PL} e P_{CE} , ligam-se à célula do parênquima paliçádico com, respectivamente, outras células do parênquima paliçádico e do lacunoso adjacentes e também a células da epiderme. P_{EI} e P_{CS} modelam os contatos da célula com o espaço intercelular e com a câmara subestomática, respectivamente. A porta P_{PPA} é uma sonda na qual pode-se medir o valor do potencial hídrico de armazenamento. As resistências nos ramos limitam o fluxo hídrico correspondente. A porta P_{FL} liga a célula do parênquima paliçádico ao floema, por onde a seiva orgânica será distribuída às demais células da planta.

Figura 17 – Análogo hídrico-elétrico da célula do parênquima paliçádico.



O símbolo do circuito encapsulado do parênquima paliçádico é apresentado na Figura 18.

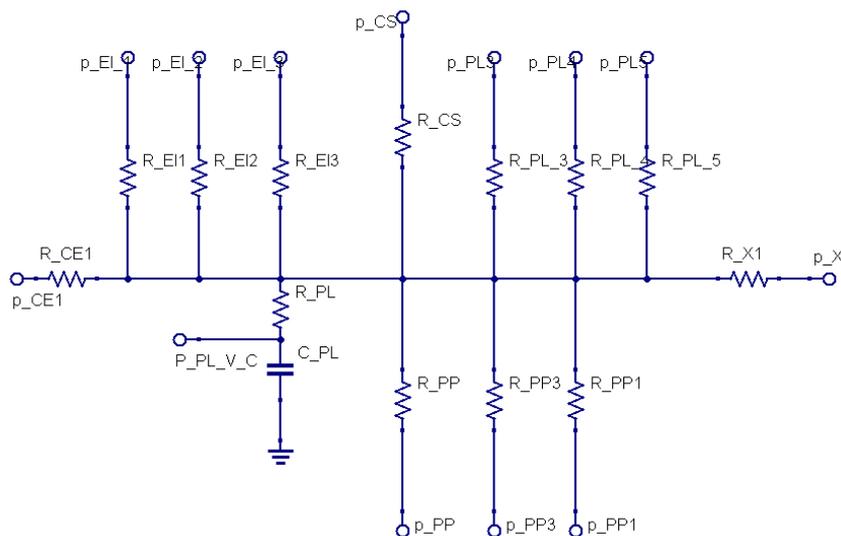
Figura 18 – Símbolo do Circuito do parênquima paliçádico



3.3.4 – Parênquima Lacunoso

A Figura 19 retrata o modelo do análogo hídrico-elétrico de uma célula do parênquima lacunoso. P_X é a porta de contato com o xilema, por onde entra o principal fluxo hídrico. O contato com o espaço intercelular e com a câmara subestomática se dão nas portas P_{EI} e P_{CAM} , respectivamente, locais onde ocorre a mudança de fase da água. O fluxo de seiva orgânica produzida pelas células do parênquima lacunoso, que será distribuído a todas as células da planta, é escoado para o floema pela porta P_{FL} .

Figura 19 – Análogo hídrico-elétrico da célula do parênquima lacunoso



O símbolo do circuito encapsulado do análogo hídrico-elétrico da célula do parênquima lacunoso é apresentado na Figura 20.

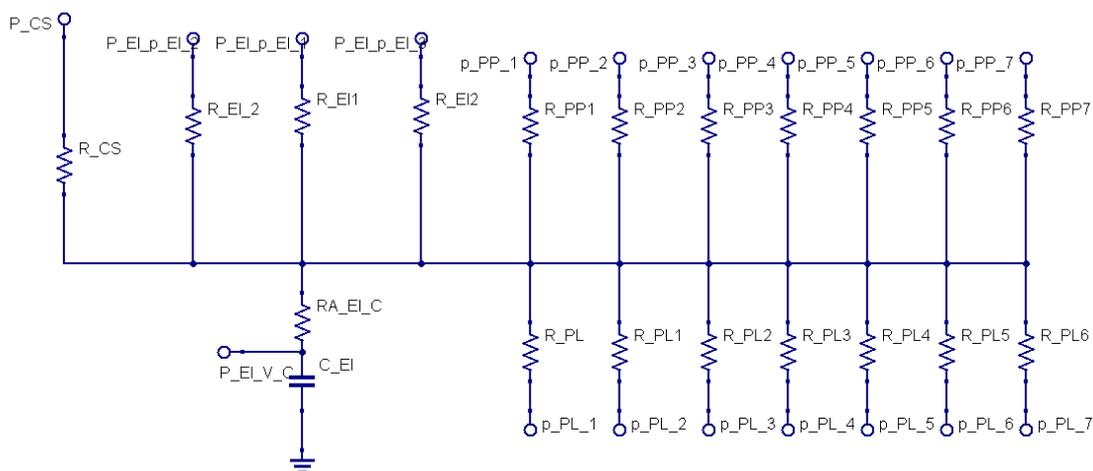
Figura 20 – Símbolo do Circuito análogo da célula do parênquima paliçádico



3.3.5 – Espaço Intercelular

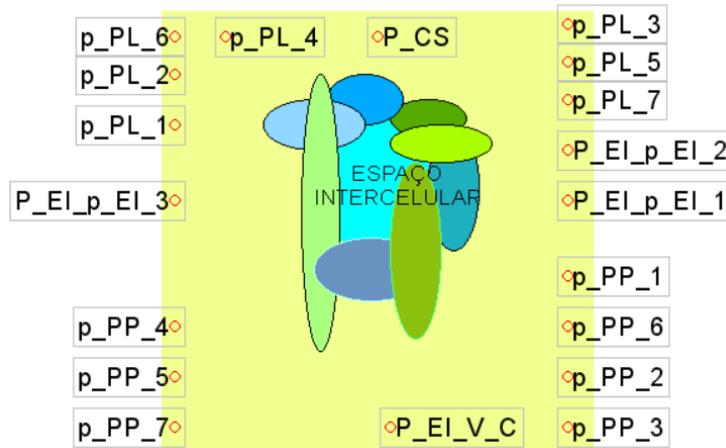
A Figura 21 retrata o modelo análogo hídrico-elétrico do espaço intercelular, onde a água encontra-se nos estados líquido e em vapor. C_{EI} é a capacitância de armazenamento de água líquida e gasosa no espaço intercelular. Em $P_{EI_V_C}$ pode ser medido o potencial hídrico do espaço intercelular. As resistências ao fluxo hídrico estão representadas nos ramos de acordo com a nomenclatura adotada.

Figura 21 – Análogo hídrico-elétrico do espaço intercelular do mesofilo,



O símbolo do encapsulamento do modelo análogo hídrico-elétrico do espaço intercelular do mesofilo é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Encapsulamento do espaço intercelular do mesofilo



3.3.6 – Câmara Subestomática

A água na câmara subestomática encontra-se na fase gasosa, com exceção da fina camada aderida às paredes das células do mesofilo. Como o potencial hídrico da atmosfera adjacente ao ostíolo (P_{Atm_Adj}) é bem menor que o da câmara subestomática ($P_{CS_V_C}$), ocorre o fluxo hídrico para fora da folha. A intensidade do fluxo depende da maior ou menor abertura do ostíolo. As células do parênquima paliçádico e do lacunoso fornecem o fluxo hídrico na fase gasosa para a câmara subestomática através dos pontos de contato P_{PL} e P_{PP} , respectivamente. A porta $P_{CS_V_C}$ é uma sonda que, ao se ligar uma ponteira de potencial, permite medir o potencial hídrico na câmara subestomática.

A modelagem da câmara subestomática é apresentada na Figura 23. O símbolo do encapsulamento do análogo hídrico-elétrico da célula do parênquima lacunoso é apresentado na Figura 24.

Figura 23 – Câmara Subestomática

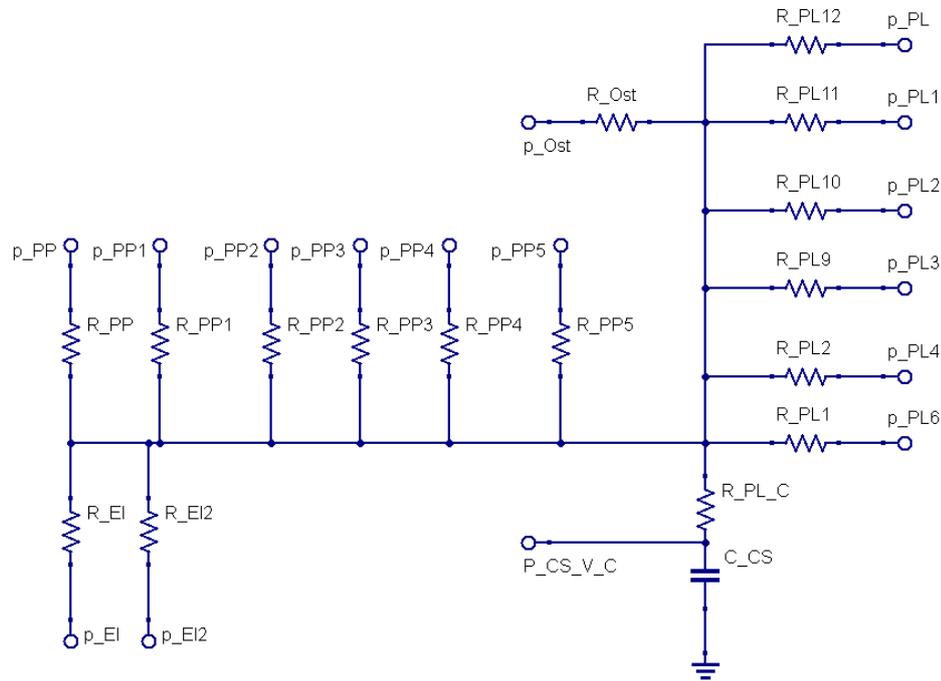
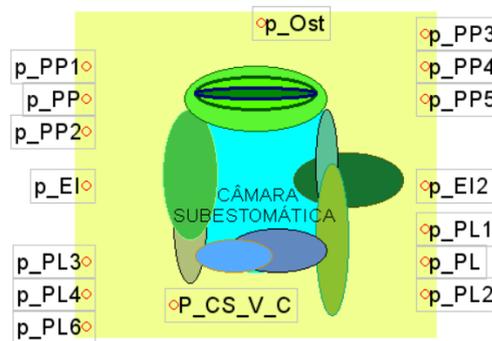


Figura 24 - Circuito análogo à câmara subestomática

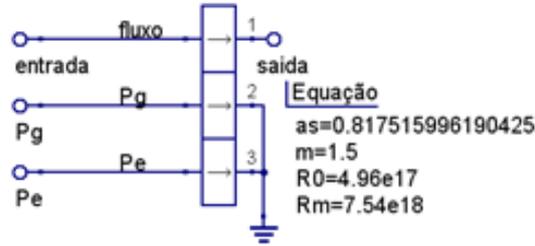


3.3.7 – Ostíolo

A complexidade da dinâmica da abertura estomática exigiu o uso de um dispositivo EDD (sigla em inglês para *Device Defined by Equation*), isto é, um dispositivo cujo funcionamento é definido por Equação. Desse modo, a modelagem da resistência estomática – que controla o fluxo hídrico que atravessa o ostíolo – considera sua dependência com os potenciais das células da epiderme e do estômato, os quais variam com as condições micrometeorológicas e com a quantidade de água no solo. Na Figura 25, é apresentado o modelo do circuito do ostíolo, com base no circuito utilizado por GAIO (2011).

Figura 25 – Circuito análogo hídrico-elétrico do ostíolo.

$$I1=V1/((V2>=V3)?((V2<=(m*V3+0.1)?(R0:Rm+as*(R0-Rm))):(V2>(m*V3)?Rm:(Rm+as*(R0-Rm)))$$



A Tabela 6 resume a proposição da variação da resistência do ostíolo (R) em função dos valores assumidos dos potenciais hídricos do estômato e das células da epiderme.

Tabela 6 – Variação da resistência do ostíolo

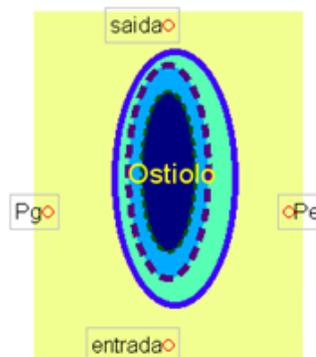
RESISTÊNCIA DO OSTÍOLO	RELAÇÃO ENTRE $P_g(V_2)$ e $P_e(V_3)$
R_m	$\Psi_{Pg} < 1,5 * \Psi_{Pe}$
$R_m + as * (R_0 - R_m)$	$1,5 * \Psi_{Pe} \leq \Psi_{Pg} \leq \Psi_{pe} + 0,1$
R_0	$\Psi_{Pg} > 1,5 * \Psi_{pe} + 0,1$

R varia em função da relação entre os valores dos potenciais de turgescência do estômato e da célula da epiderme (m), considerando a vantagem mecânica da epiderme e a razão de antagonismo (A_r), de acordo com Gaio (2011).

Haverá fluxo hídrico da porta de entrada para a porta de saída, em função da resistência estomática que, por sua vez, depende dos valores do potencial hídrico do estômato P_g (V_2) e da célula da epiderme P_e (V_3).

O símbolo do circuito do ostíolo encapsulado é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Símbolo do Circuito análogo hídrico-elétrico do ostíolo

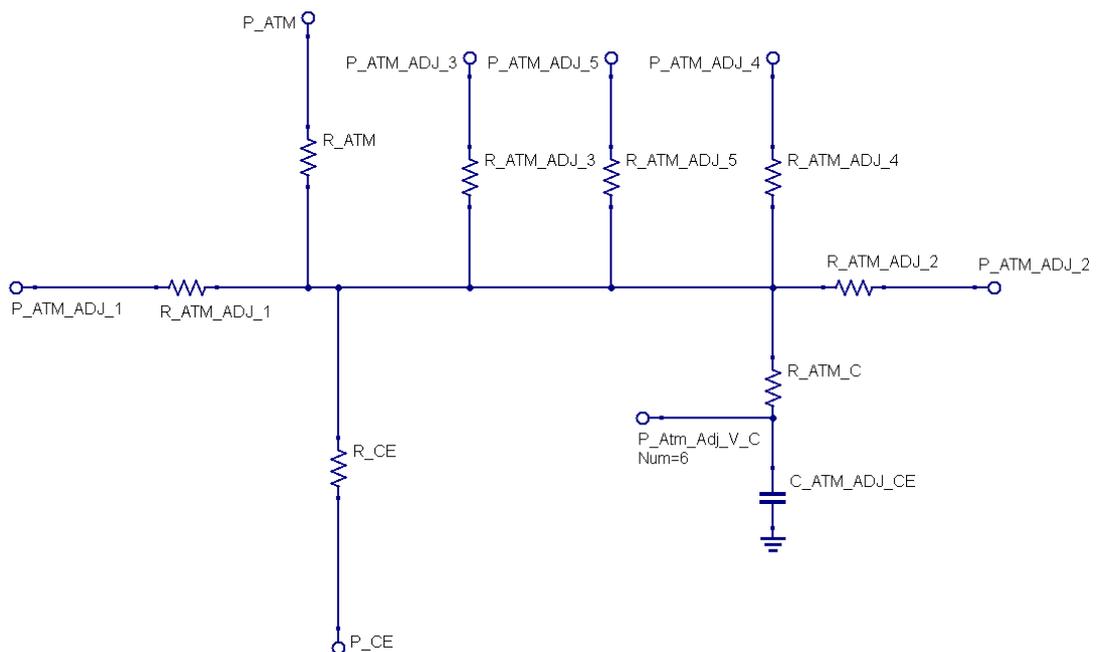


3.3.8 – Atmosfera Adjacente

A modelagem do dispositivo da atmosfera segue a mesma escala dos elementos anteriores, isto é, os dispositivos que representam a atmosfera têm volumes de ar com valores próximos aos das células da epiderme e do ostíolo. É a camada de ar que se comunica diretamente com a cutícula e os estômatos.

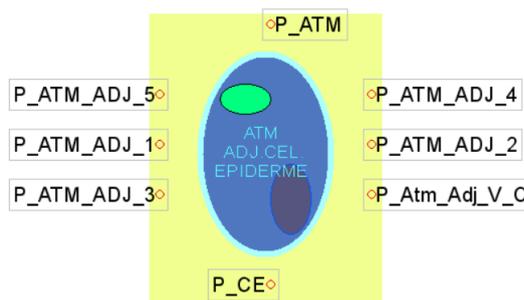
A altura das camadas atmosféricas modeladas tanto sobre as células da epiderme como sobre as células-guarda do estômato serão consideradas iguais. Como as áreas da célula da epiderme e do estômato são diferentes, serão diferentes os volumes destas camadas atmosféricas adjacentes. Como consequência, as capacitâncias são também diferentes. Portanto, foram construídos circuitos específicos para cada tipo. Assim, na Figura 27, é apresentado o circuito análogo da atmosfera adjacente à célula da epiderme.

Figura 27 – Circuito do elemento de atmosfera adjacente à célula da epiderme



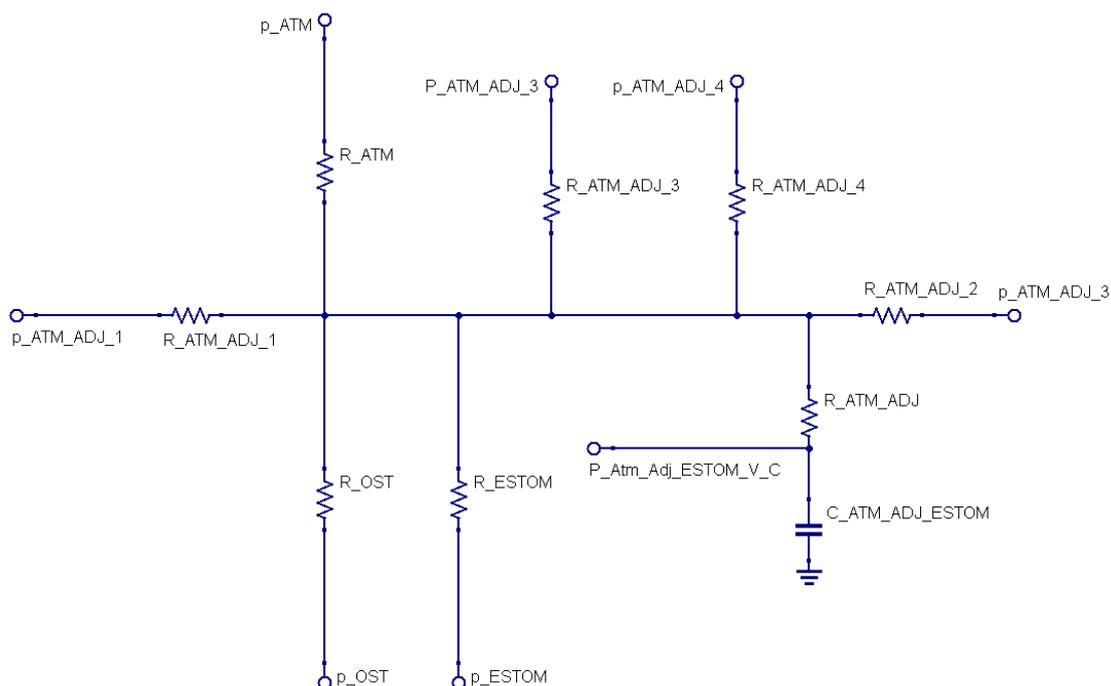
Na Figura 28, tem-se o símbolo do encapsulamento do circuito da atmosfera adjacente à célula da epiderme.

Figura 28 - Circuito encapsulado do elemento da atmosfera adjacente



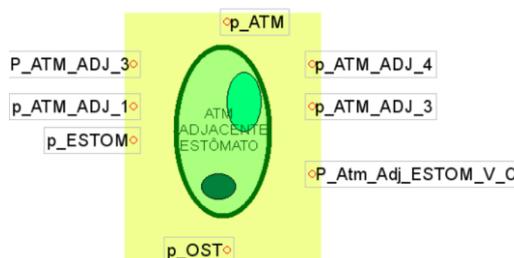
O circuito da atmosfera adjacente ao estômato, por onde flui a maior parte do fluxo hídrico principal de uma planta, é apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Circuito análogo do elemento de atmosfera adjacente ao estômato



O símbolo do encapsulamento do análogo hídrico-elétrico da atmosfera adjacente ao estômato é apresentado na Figura 30.

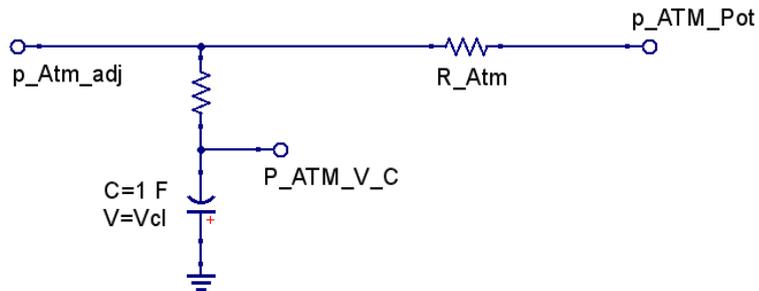
Figura 30 – Símbolo do módulo da atmosfera adjacente ao estômato



3.3.9 – Atmosfera

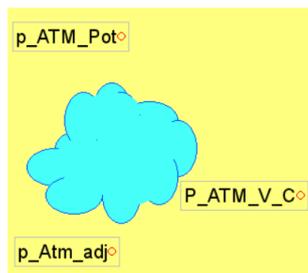
O circuito da atmosfera, Figura 31, liga-se a cada uma das células que compõe a lamina foliar, através da atmosfera adjacente.

Figura 31 – Circuito da atmosfera



Na Figura 32 é apresentado o símbolo do encapsulamento do circuito da atmosfera.

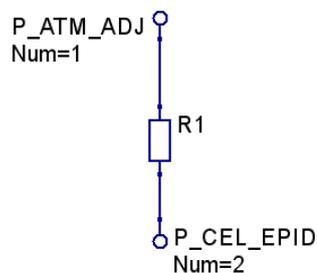
Figura 32 – Símbolo do Circuito da atmosfera



3.3.10 – Cutícula

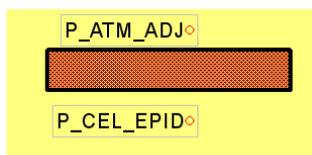
A cutícula atua na retenção de água nas células da epiderme, assim é modelada como uma resistência à passagem de fluxo hídrico da folha para a atmosfera. O seu circuito é apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Circuito da cutícula



Na Figura 34, o circuito da cutícula é apresentado encapsulado.

Figura 34 – Símbolo do Circuito da cutícula



3.4 – CALIBRAÇÃO DO MODELO

Calibrar o modelo, neste contexto, significa definir valores de potenciais, resistências e capacitâncias hídricas para cada dispositivo desenvolvido, com base, prioritariamente, nos dados do experimento realizado em 10/08/2019 com *Phaseolus Vulgaris L.* e, quando isso não for possível, na literatura.

De acordo com Taiz e Zeiger (2017), a água move-se pelo xilema, em consequência do gradiente de potencial hídrico ($\Delta\Psi_p$). Por seu turno, os potenciais hídricos na planta são funções das condições micrometeorológicas e do conteúdo de água no solo. Porém, apesar da extensão do experimento, a modelagem exige valores inacessíveis no arranjo experimental desenvolvido. Assim, os valores adotados apoiam-se em dados da literatura.

O potencial hídrico do xilema adotado será de -0,8 MPa, com base nos valores propostos por Nobel (2009).

Os valores dos potenciais hídrico de vapor, internos à folha, foram calculados, a partir da Equação 5, com base nos percentuais de Umidade relativa do ar nos Espaços Intercelulares e nas Câmaras Subestomáticas (Taiz e Zeiger, 2017).

Para o cálculo dos potenciais hídricos de vapor da atmosfera adjacente à folha e da atmosfera, foram utilizados valores de temperatura e umidade relativa do ar obtidos do INMET no dia experimento (Figura 10). Os valores obtidos são médias dos potenciais por período de medição dos fluxos hídricos.

Taiz e Zeiger (2017) estimam que 95% da transpiração foliar ocorrem nos estômatos, pois, a cutícula cerosa que recobre as folhas oferece grande resistência ao fluxo hídrico que provém das células da epiderme. Desta forma, podemos calcular o fluxo hídrico por estômato a partir da Equação 16.

$$f_{ostíolo} = 0,95 \times \frac{f_{planta}}{N_{ostíolo}} \quad (16)$$

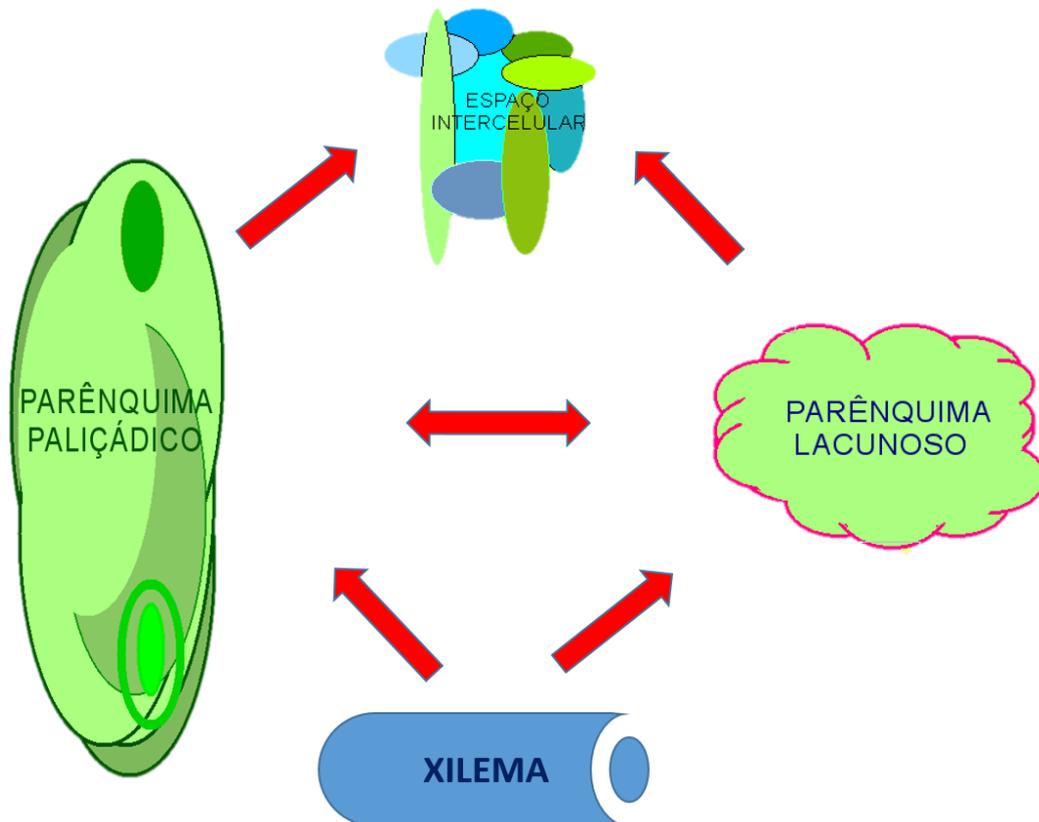
$f_{ostíolo}$ é o fluxo hídrico por estômato, f_{planta} é o fluxo hídrico por planta do experimento, $N_{ostíolo}$ é o número de ostíolos por planta. O fator 0,95 refere-se ao percentual de fluxo hídrico em uma folha que ocorre somente nos estômatos.

3.5 – MÓDULOS

As relações entre os circuitos modelados que compõe o módulo base, de acordo com a organização da estrutura foliar, descrita por Taiz e Zeiger (2017), são apresentadas nas Figuras 35 a 41. As setas vermelhas representam o fluxo hídrico entre circuitos.

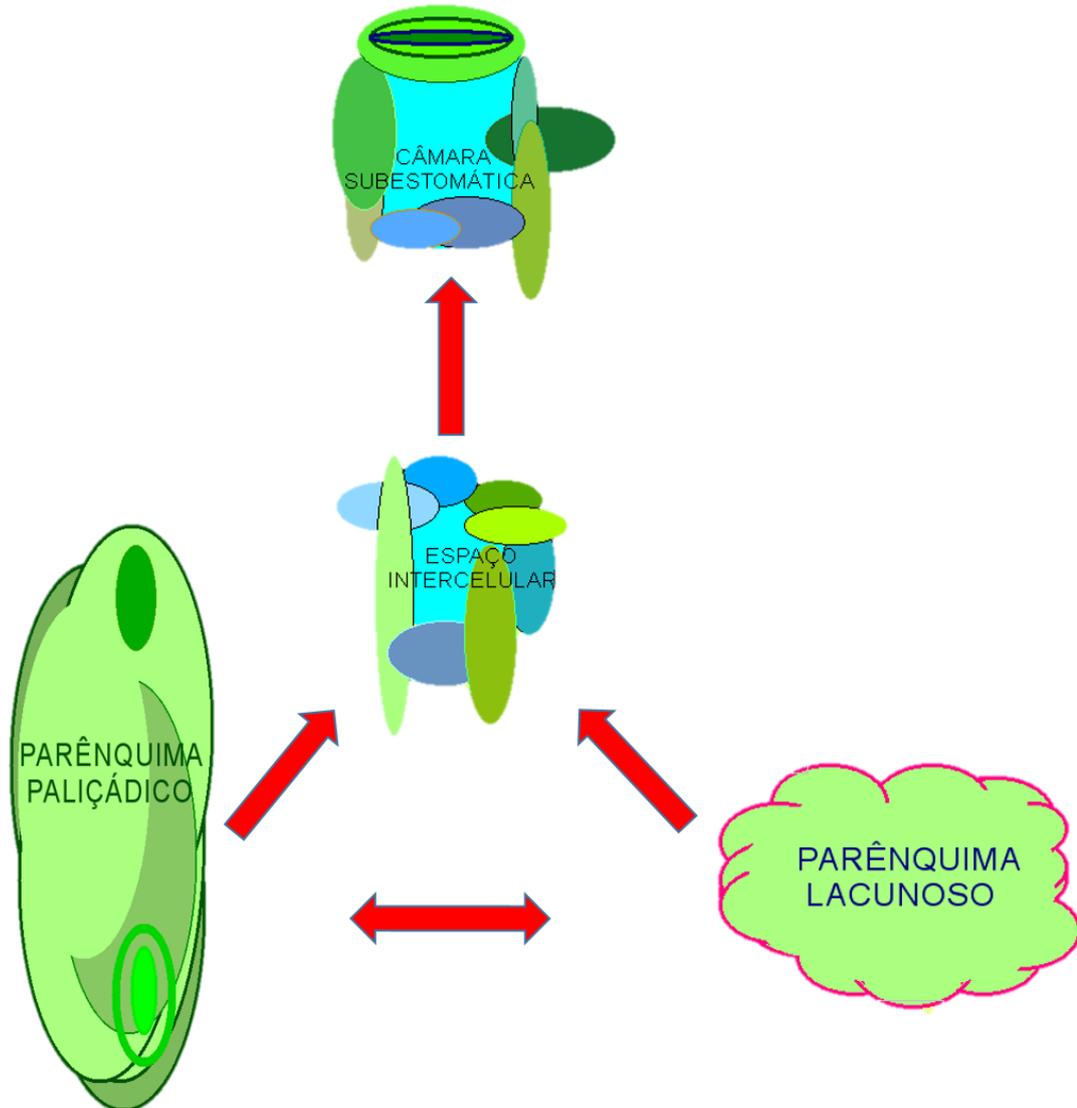
A Figura 35 A) ilustra essas relações, mostrando simplificada, apenas um circuito de cada tipo que compõe o Mod_1. O fluxo hídrico chega à folha pelo xilema e difunde-se pelo mesofilo por meio dos circuitos parênquima lacunoso e do paliçádico. Entre os circuitos do parênquima o fluxo pode ocorrer em ambas direções em função da diferença de potencial osmótico entre os circuitos células. O espaço intercelular recebe o fluxo das circuitos do parênquima.

Figura 35 (A) – Entrada do fluxo hídrico na folha



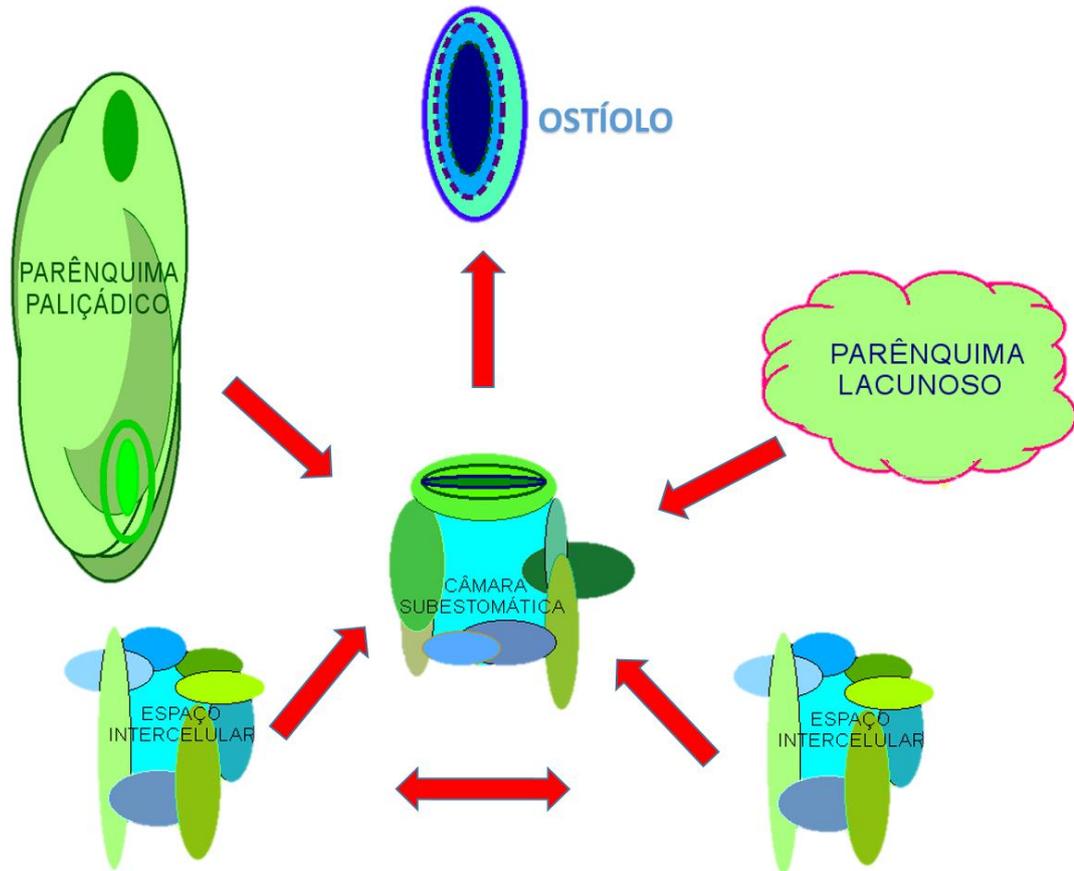
O espaço intercelular recebe o fluxo hídrico das células do parênquima lacunoso e do paliádico. Nele ocorre a mudança de estado da água para vapor d'água. O fluxo hídrico é canalizado para a câmara subestomática (Figura 36).

Figura 36 – Fluxo hídrico do espaço intercelular



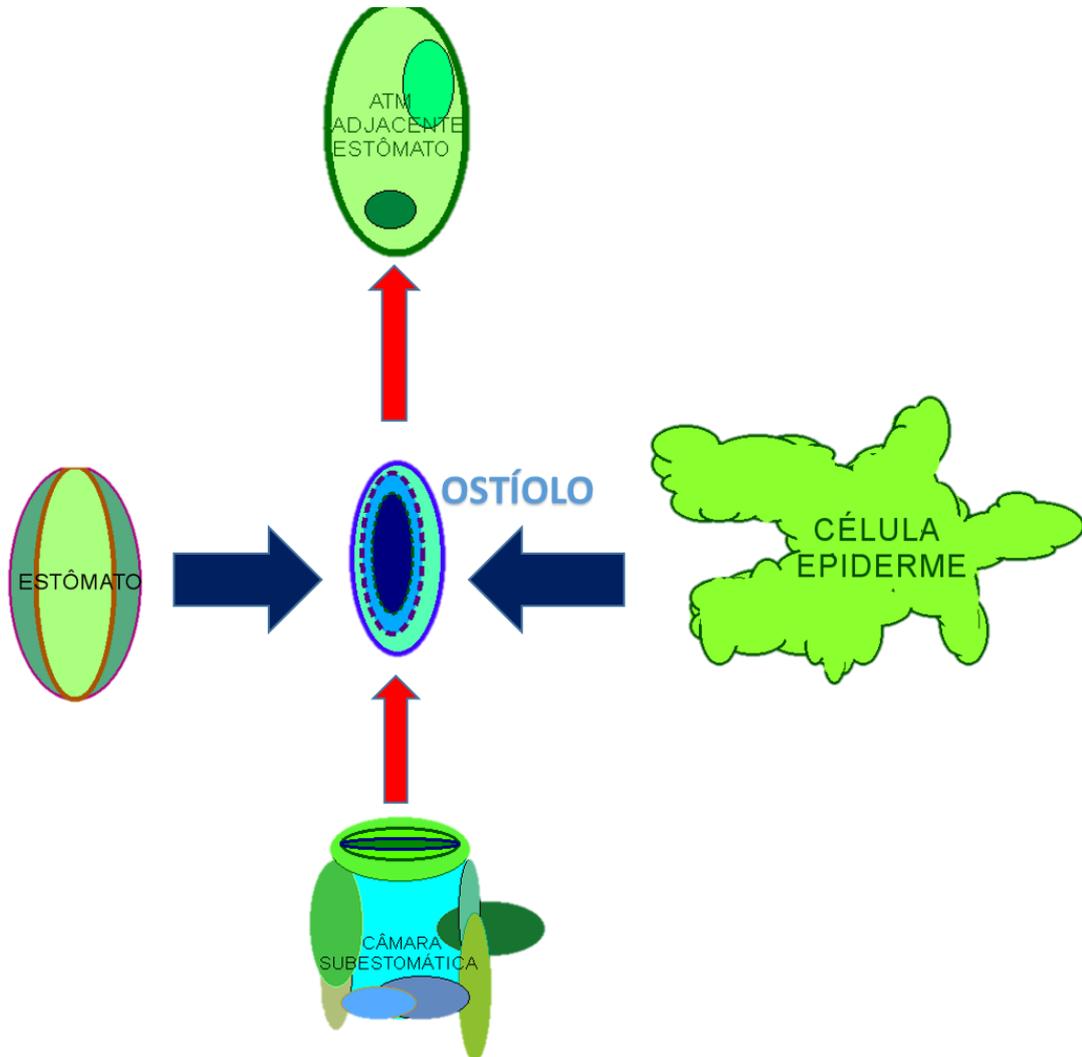
A câmara subestomática recebe o fluxo hídrico dos circuitos parênquima lacunoso, do paliádico e dos espaços intercelulares, armazenando-o. O fluxo entre espaços intercelulares ocorre devido à diferença da Umidade relativa do ar. Haverá fluxo hídrico, atravessando o ostíolo, para o exterior da folha. A quantidade depende do valor da abertura estomática (Figura 37).

Figura 37 – Relações da câmara subestomática



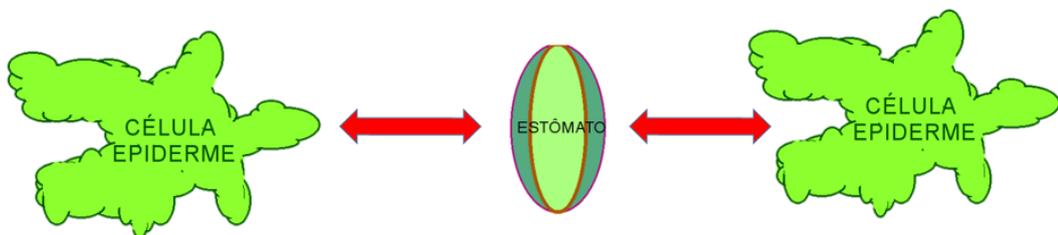
A câmara subestomática tem grande quantidade de água em forma de vapor. Esse vapor d'água alcançará a atmosfera adjacente, através do ostíolo, se não estiver fechado. A relação de forças mecânicas (indicadas pelas setas azuis), causada pelo grau de turgidez das células na epiderme (células-guarda e células da epiderme) fará o ostíolo abrir-se ou fechar-se, parcial ou totalmente (Figura 38). A turgidez das células-guarda do estômato e das células da epiderme adjacentes é causada pela diferença de potencial osmótico com o meio intracelular.

Figura 38 – Relação do ostíolo com circuitos adjacentes



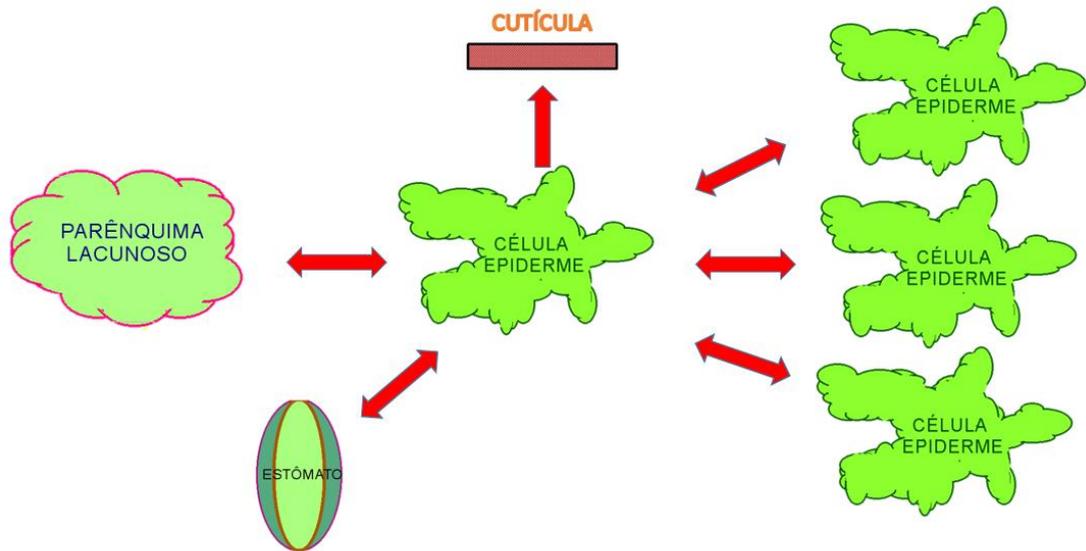
Em função da diferença de concentração de solutos, no estômato e nas células adjacentes da epiderme, pode ocorrer fluxo hídrico para dentro ou para fora das células-guarda, tornando o estômato parcial ou totalmente turgido. (Figura 39).

Figura 39 – Relação hídrica do estômato.



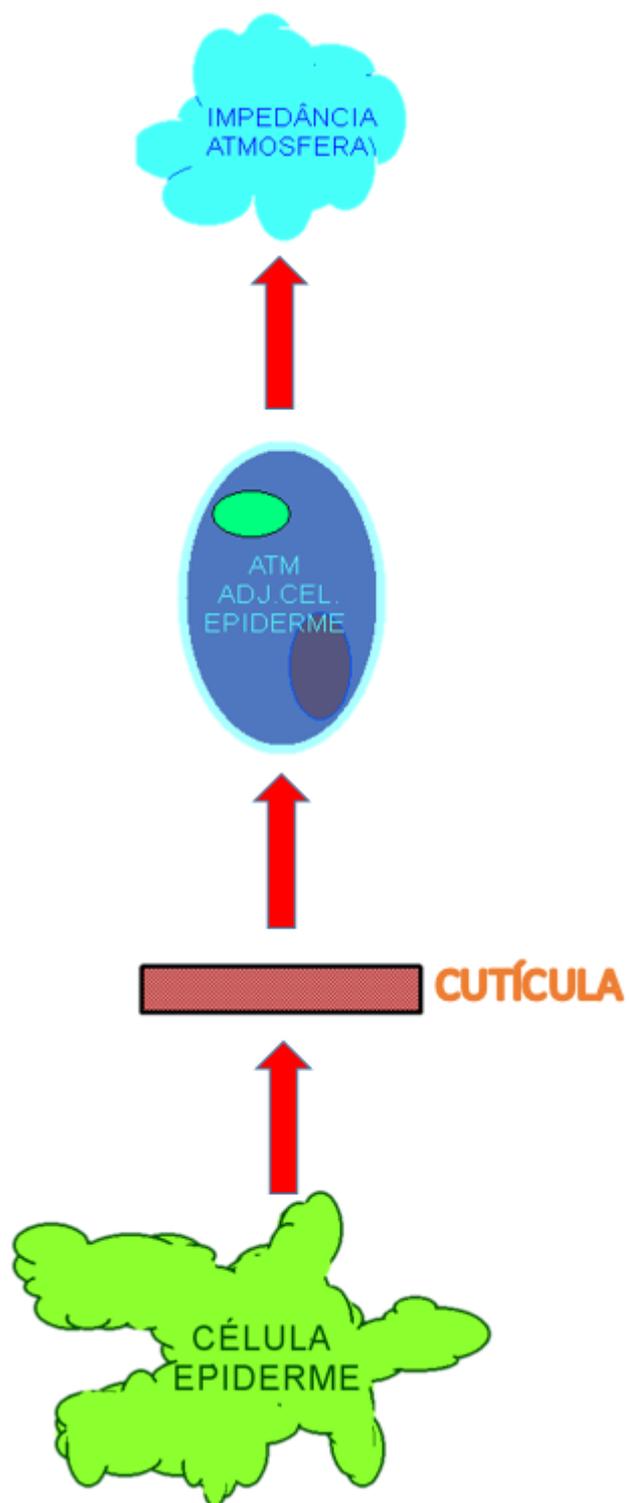
A célula da epiderme (Figura 40) está conectada à outras células da epiderme e às células do mesofilo. Algumas células epidérmicas ligam-se ao estômato (adjacentes). Essa conexão permite fluxo hídrico, em ambas os sentido dependendo das diferenças de potencial osmótico. Em relação à cutícula, o fluxo é apenas unidirecional, isso é, em direção e sentido para o exterior da planta.

Figura 40 – Relações da célula da epiderme na estrutura foliar



A cutícula, por ter alta resistência, recebe fluxo hídrico da célula da epiderme, em pequena quantidade (5% do total da transpiração foliar), a envia para a atmosfera adjacente e, esta, para a atmosfera (Figura 41).

Figura 41 – Fluxo hídrico pela cutícula



Por meio do Método Planimétrico de Jeffries obtém-se a proporção de número de estômatos e de células da epiderme ao se analisar micrografias como por exemplo a apresentada na Figura 12.

A criação dos módulos Mod_9, Mod_15, Mod_25 e Mod_49 foi realizada por meio de ligações das portas do Mod_1 com suas réplicas, de acordo com a relação fisiológica apresentada por Taiz e Zeiger (2017) e figuras 35 a 41. As réplicas foram dispostas formando número crescente de camadas ao redor do Mod_1 central.

3.6 – SIMULAÇÃO DOS MÓDULOS

Para a simulação de cada módulo, foi ligada à porta do xilema uma fonte com potencial de -0,8 MPa, de acordo com a Tabela 1. O circuito atmosfera foi ligado ao módulo à porta de acesso à atmosfera. Foi colocada uma ponteira de corrente para a medição do fluxo hídrico do estômato central. Os potenciais hídricos da atmosfera utilizados para a simulação são os da Tabela 7. A simulação foi realizada no QUCS em modo transiente. Como são quatro medições para cada um dos quinze tratamentos, o total de simulações para cada módulo é sessenta. Foram colocados, para cada simulação, valores das aberturas do ostíolo de cada medição (Tabela 13) na Equação do circuito EDD do ostíolo, potencial hídrico e tratamento correspondente.

3.7 - VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo baseou-se nas análises estatísticas quantitativa e qualitativa entre os fluxos hídricos obtidos no experimento (Tabela 9) e os fluxos hídricos resultantes da simulação dos módulos Mod_1, Mod_9, Mod_25 e Mod_49. Os testes realizados foram Erro médio absoluto, Erro percentual médio absoluto, Correlação de Spearman, Regressão linear simples, e diagrama de dispersão por Scatterplot matrix.

3.8 – ESCALABILIDADE DO MODELO

Trazendo os conceitos, utilizado por Gregol (2013) e Henderson (2006), para os módulos construídos neste trabalho, escalabilidade é a capacidade que o modelo tem de, mesmo sendo incorporadas novas camadas de Mod_1 na formação de um novo módulo, continua havendo uma forte correlação direta dos fluxos hídricos obtidos nas simulações com os fluxos hídricos do experimento, em como com valores obtidos nas simulações próximos aos dos experimentos.

Os módulos Mod_1, Mod_9, Mod_25 e Mod_49 foram confeccionados nesta tese, observando-se as proporções das quantidades de circuitos que os formam apresentadas na Tabela 14. A criação de novos módulos e, por consequência aproximando-se a quantidade dos valores equivalentes aos existentes na área foliar, o modelo deve corresponder aos fluxos hídricos praticados pela planta no experimento.

Definiu-se fluxos normalizados a razão de cada fluxo obtido na simulação pelo correspondente fluxo hídrico do experimento.

Relacionando os valores médios dos fluxos normalizados com a quantidade de Mod_1, necessários para formar os demais módulos, ajustou-se uma curva logarítmica a essa relação. Por extrapolação, tem-se valores dos fluxos normalizados para módulos com camadas de Mod_1 superiores aos construídos (Mod_9 a Mod_49). A hipótese de escalabilidade do modelo foi analisada a partir de inferência estatística.

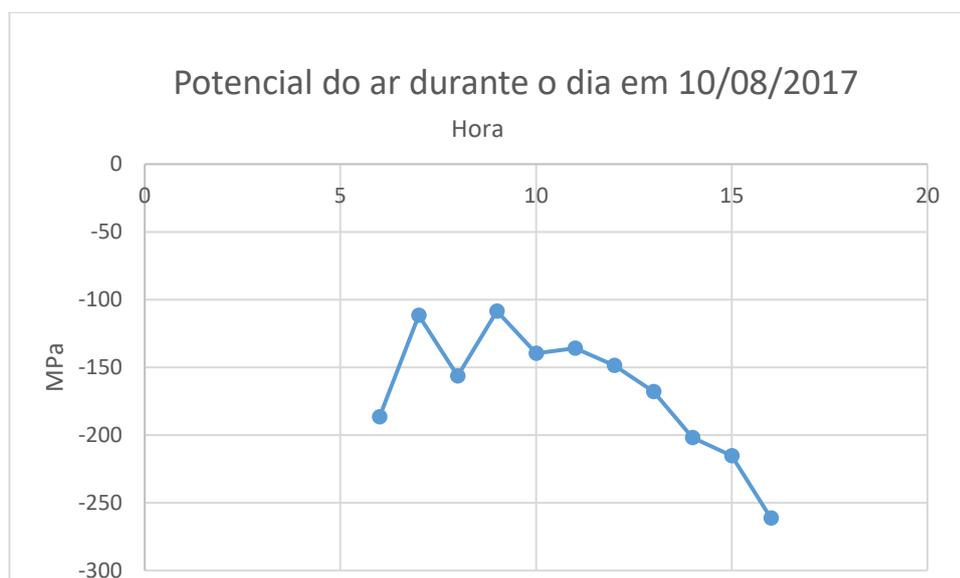
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – EXPERIMENTO

4.1.1 – Potenciais Hídricos no Dia do Experimento

Para o cálculo dos potenciais hídricos de vapor da atmosfera (Figura 42), foram utilizados os valores de temperatura e umidade relativa do ar obtidos do INMET no dia experimento na Equação 5.

Figura 42 – Potencial hídrico de vapor da atmosfera - dia do experimento



Os valores dos potenciais hídricos de vapor médios da atmosfera, de acordo com os períodos de medição do fluxo, obtidos a partir dos valores da Figura 42, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Potenciais hídricos de Vapor médios da atmosfera

PERÍODO	Ψ_{ATM}
6h a 9h	-140,8
9h a 12h	-133,23
12h a 14h	-172,82
14h a 16h	-226,24

Do mesmo modo, os valores dos potenciais hídricos de vapor internos à folha foram calculados a partir da Equação 5, com base nos percentuais de umidade

relativa de vapor nos Espaços Intercelulares e nas Câmaras Subestomáticas propostos por Taiz e Zeiger (2017) e temperatura obtidos do INMET no dia do experimento.

Os potenciais hídricos de vapor da câmara subestomática (-4,26 MPa) e dos espaços intercelulares (-1,40 MPa) são bem menores que os da atmosfera adjacente (-103,44) de modo a promover um intenso fluxo hídrico para fora da folha.

4.1.2 - Proporções na Estrutura Foliar

Os valores obtidos com as fotografias e micrografias do *Phaseolus Vulgaris L.*, obtidos pelo Método Planimétrico de Jeffries, *estão apresentados na Tabela 8.*

Tabela 8 – Quantidades de folha média do *Phaseolus Vulgaris L.* do experimento

MEDIDA	QUANTIDADE
Área foliar média em mm ²	30932,05
Nº de células da epiderme por mm ²	2980,06
Nº de ostíolos por mm ²	484,6
Proporção de estômatos por célula da epiderme	6,15
Área média de uma célula da epiderme em m ²	7,92E-10
Área média de um estômato fechado m ²	1,20E-10
Nº de ostíolo por planta	1,50E+07
Nº de células da epiderme da folha por planta	9,20E+07

4.1.3 – Fluxo Hídrico Médio por Ostíolo obtido no Experimento

Os fluxos hídricos médios por ostíolo obtidos, por tratamento, em cada um dos períodos de medição no experimento são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Medições do fluxo hídrico

FLUXO DO EXPERIMENTO				
Tratamento	6h a 9h	9h a 12h	12h a 14h	14h a 16h
1	1,24E-16	4,59E-17	1,07E-16	4,90E-17
2	1,18E-16	4,85E-17	8,60E-17	5,82E-17
3	1,16E-16	7,16E-17	8,34E-17	6,76E-17
4	1,32E-16	6,26E-17	1,17E-16	6,37E-17
5	1,62E-16	7,41E-17	1,11E-16	7,87E-17
6	1,43E-16	5,01E-17	1,18E-16	9,06E-17
7	1,13E-16	5,56E-17	7,21E-17	6,90E-17
8	1,69E-16	3,50E-17	1,06E-16	1,04E-16
9	1,45E-16	8,45E-17	1,27E-16	1,24E-16
10	1,32E-16		1,18E-16	5,56E-17
11	1,51E-16		5,72E-17	
12	1,65E-16	6,62E-17	7,85E-17	5,71E-17
13	1,59E-16	1,09E-16	7,13E-17	1,07E-16
14	1,78E-16	6,69E-17	8,51E-17	9,60E-17
15	1,58E-16	5,41E-17	5,98E-17	1,27E-16

As hachuras nos tratamentos 10 e 11 da Tabela 9 foram valores desconsiderados por serem *outliers*.

4.2- IN SILICO

4.2.1 – Resistência da Atmosfera

A resistência da atmosfera ao fluxo hídrico varia, fundamentalmente, de acordo com a umidade relativa do ar e da temperatura, portanto pode ser escrita em função da razão de Bowen (β), que expressa a razão entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE). Em seu estudo, Gaio (2011) considerou essa relação linear e estabeleceu a Equação 17 e os valores $R_{max}=10^8\text{MPa.s.m}^{-3}$ e $R_0=10^7\text{MPa.s.m}^{-3}$, com $\beta_{seco}=1,5$ e $\beta_{úmido}= - 0,7$.

$$R_{atm} = R_0 + (R_{max} - R_0) \times \left(\frac{\beta - \beta_{seco}}{\beta_{úmido} - \beta_{seco}} \right) \quad (17)$$

A ocorrência do experimento em período de seca, de acordo com Betts et al (2007), permite estimar o valor da razão de Bowen em $\beta=0,85$, de forma que o valor da resistência da atmosfera é aproximadamente $3,66 \times 10^7 \text{MPa.s.m}^{-3}$.

4.2.2 – Resistências de Carregamento e da Membrana

Os valores das resistências de carregamento, localizados em série com os capacitores de carregamento, e da resistência ao fluxo hídrico que atravessa a membrana são, respectivamente $9,82 \times 10^9 \text{ MPa.s.m}^3$ e $2,95 \times 10^{11} \text{ MPa.s.m}^{-3}$ (SIQUEIRA, 2014).

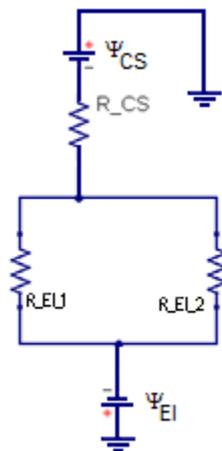
4.2.3 - Resistência da Câmara Subestomática e do Espaço Intercelular

A diferença entre o potencial hídrico de vapor da câmara subestomática (-4,26 MPa) e potencial hídrico do xilema (-0,8 MPa) de acordo com Nobel (2009) é de -3,46 MPa. Considerando que o menor fluxo hídrico ($9,3 \times 10^{-17} \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), Tabela 9, é causado pela maior resistência equivalente na fase de vapor do fluxo hídrico, interno aos espaços intercelulares e à câmara subestomática e, utilizando a 1ª Lei de Ohm, calcula-se a resistência equivalente ao vapor que flui nos espaços intercelulares e na câmara subestomática.

$$R_{vapor} = \frac{|-4,26 - (-0,8)|}{9,3 \times 10^{-17}} = 3,72 \times 10^{16} \text{ MPa.s.m}^{-3} \quad (18)$$

Conforme o modelo base (Tabela 14), o fluxo hídrico parte de dois espaços intercelulares para chegar à câmara subestomática. As resistências dos espaços intercelulares, portanto, estão associadas em paralelo, e a resistência equivalente dos espaços intercelulares associa-se em série com a resistência da câmara subestomática (Figura 43).

Figura 43 – Composição das resistências ao fluxo hídrico em forma de vapor



Desta maneira, os valores da resistência da câmara subestomática e do espaço intercelular são calculados (Equações 19 e 20).

$$R_{VAPOR} = R_{CS} + R_{EI} \quad (19)$$

$$\frac{1}{R_{EI}} = \frac{1}{R_{VAPOR}} + \frac{1}{R_{VAPOR}} \quad e \quad \frac{1}{R_{E2}} = \frac{1}{R_{VAPOR}} + \frac{1}{R_{VAPOR}} \quad (20)$$

Os valores das resistências da câmara subestomática e do espaço intercelular são, respectivamente, $1,86 \times 10^{16}$ MPa.s.m⁻³ e $3,72 \times 10^{16}$ MPa.s.m⁻³.

4.2.4 – Resistências máxima e mínima do ostíolo

No experimento, realizado em 10/08/2017, a quantidade de água, disponibilizada às plantas foi (em média) crescente do primeiro ao décimo quinto tratamento. A Tabela 9 mostra os valores obtidos dos fluxos hídricos por estômato.

Com base na metodologia apresentada por Nobel (2009), os potenciais hídricos na câmara subestomática e na atmosfera adjacente, apresentados na Tabela 1, são, respectivamente, -6,9 Mpa e -95,1 Mpa. O fluxo hídrico atravessa o ostíolo devido à diferença de potencial hídrico entre câmara subestomática e a atmosfera adjacente. O maior fluxo obtido no experimento refere-se à menor resistência do ostíolo e o menor fluxo à maior resistência. Utilizando-se a 1ª Lei de Ohm encontram-se os valores de $7,54 \times 10^{+18}$ MPa.s.m⁻³ e $4,96 \times 10^{+17}$ MPa.s.m⁻³ para as resistências máxima (R_m) e mínima (R_0), respectivamente.

4.2.5 – Resistência da Cutícula

Segundo Taiz e Zeger (2017), somente 5% do fluxo hídrico da transpiração ocorre através da cutícula. O fluxo hídrico médio por planta (f_{planta}), obtido no experimento, é de $4,71 \times 10^{-9}$ m³.s⁻¹. Os potenciais hídricos são os indicados na Tabela 1. O número de células da epiderme está indicado na Tabela 8. Utilizando-se a 1ª Lei de Ohm, encontra-se o valor de $3,72 \times 10^{+21}$ MPa.s.m⁻³ para a resistência cuticular.

4.2.6 – Capacitâncias de Carregamento da água líquida na folha

No experimento, realizado em 10/08/2017, foi obtido o volume de água armazenada nas folhas, a partir da diferença de pesagem das folhas antes e após secagem. O valor médio foi de $4,9 \times 10^{-7}$ m³ por planta.

A capacitância hídrica é calculada considerando razão da quantidade armazenada de água pelo potencial hídrico (Tabela 1), de acordo com a Equação 21.

$$C = \frac{\Delta W}{\Delta \Psi} \quad (21)$$

C é a capacitância, ΔW é a quantidade de água armazenada e $\Delta \Psi$ é o potencial hídrico.

Para o cálculo das capacitâncias, foram considerados os potenciais hídricos apresentados na Tabela 1 e os percentuais de água armazenada, propostos por Nobel (2009), sendo 10% para as células da epiderme 20% para os estômatos e 70% para as células do mesofilo.

Como o mesofilo compõe-se de células dos parênquimas paliçádico e lacunoso, foi feita a proporção da quantidade de água comparando-se a média das medidas dos valores encontrados no experimento de Silva et al (1988) para algumas espécies de *Phaseolus vulgaris* L. cultivado em ambiente sem sombreamento. Os valores percentuais para a capacidade de armazenamento de água do parênquima paliçádico e do lacunoso são, respectivamente 48,4% e 51,6% do percentual (70%) proposto por Gaio para as células do mesofilo.

A Tabela 10 resume os valores da quantidade de água armazenada e da capacitância das células do mesofilo e da epiderme.

Tabela 10 – Valores das capacitâncias da fase líquida da água.

Local de armazenamento do modelo base	Percentual de água armazenada	Quantidade de água armazenada	Potencial considerado	Capacitância
	%	ΔW (m ³)	$\Delta \Psi$ (MPa)	(m ³ .MPa ⁻¹)
Parênquima Paliçádico	33,8	2,61E-12	0,8	3,26E-12
Parênquima Lacunoso	36,2	2,80E-12	0,8	3,49E-12
Estômato	20	1,54E-14	99,18	1,56E-16
Célula da epiderme	10	7,72E-15	99,18	7,79E-17

*-99,18 é a diferença entre potenciais -103,44 e -4,26 da Tabela 1.

4.2.7 – Capacitância da Atmosfera Adjacente

Para o cálculo da capacitância da atmosfera adjacente da célula da epiderme e do estômato foram considerados volumes cujas áreas da base dessas células estão na Tabela 8 e as alturas sendo a espessura da camada limite iguais e determinadas a partir da Equação 22 (LIER, 2019).

$$d_{cl} = kf \sqrt{\frac{l_f}{v}} \quad (22)$$

d_{cl} é a espessura da camada limite (em m), kf é um parâmetro empírico com relação ao formato da folha. Para folha pouco rugosa, o valor de $kf=0,002$ é adequado, $l_f = 0,03m$ é a largura média da folha e $v = (3 \text{ m/s})$ (ambiente aberto) é a velocidade do vento. A espessura da camada limite é de $2 \times 10^{-4} \text{ m}$ tanto para o estômato quanto para a célula da epiderme. Os volumes das células da epiderme e do estômato são de $1,58 \times 10^{-13} \text{ m}^3$ e $2,141 \times 10^{-14} \text{ m}^3$, respectivamente.

Utilizando as equações 10, 11, 12 e os valores dos potenciais hídricos e da temperatura do dia do experimento, da umidade relativa, da pressão de vapor de saturação e da massa de vapor d'água, calculam-se os valores das capacitâncias da atmosfera adjacente da célula da epiderme e do estômato (Tabela 11).

Tabela 11 – Capacitância Média da célula da epiderme e do estômato

Hora	Temperatura (°C)	UR(%)	ES	MV CEL EPID	MV ESTOM	Ψ_{ar} (MPa)	CAP CEL EPID	CP ESTOM
6	27,8	26	3730,798	5,66168E-10	8,62291E-11	-186,525	3,03535E-12	4,62292E-13
7	22,6	44	2738,87	4,2295E-10	6,44164E-11	-111,714	3,78599E-12	5,76617E-13
8	25,2	32	3201,481	4,90078E-10	7,46402E-11	-156,411	3,13327E-12	4,77206E-13
9	22,3	45	2689,45	4,1574E-10	6,33184E-11	-108,546	3,83007E-12	5,83331E-13
10	23,9	36	2962,305	4,55451E-10	6,93664E-11	-139,632	3,2618E-12	4,96781E-13
11	24,2	37	3016,069	4,63249E-10	7,05541E-11	-136,024	3,40563E-12	5,18688E-13
12	26,3	34	3416,839	5,21122E-10	7,93684E-11	-148,635	3,50605E-12	5,33982E-13
13	29,9	30	4212,407	6,34823E-10	9,66854E-11	-167,874	3,78155E-12	5,75941E-13
14	34,4	24	5429,718	8,06297E-10	1,22801E-10	-201,942	3,99271E-12	6,08102E-13
15	36,1	22	5963,241	8,80654E-10	1,34126E-10	-215,439	4,08772E-12	6,22571E-13
16	36,8	16	6195,789	9,12929E-10	1,39042E-10	-261,341	3,49325E-12	5,32033E-13
						MAIOR	4,08772E-12	6,22571E-13

As maiores capacitâncias obtidas na Tabela 11 foram definidas como da célula da epiderme e do estômato $4,09 \times 10^{-12} \text{ m}^3 \text{MPa}^{-1}$ e $6,23 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \text{MPa}^{-1}$, respectivamente.

4.2.8 – Capacitância da Câmara Subestomática e do Espaço Intercelular

Moreira (2014) encontrou o valor médio da espessura de uma folha de *Phaseolus vulgaris* L. como sendo de $408,76 \mu\text{m}$. A área total do Mod_1 $4,876 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, a qual é a soma das áreas de seis células da epiderme e de um estômato (Tabela 8). Assim, multiplicando-se a espessura da folha com a área do Mod_1, obtém-se o volume total do Mod_1 de $1,99 \times 10^{-12} \text{ m}^3$.

A relação de 40% entre os volumes dos espaços intercelulares e o volume total das folhas de tabaco (TAIZ; ZEIGER, 2017), dicotiledônea como o feijoeiro,

fornece uma estimativa de $7,95 \times 10^{-13} \text{ m}^3$ para o volume total dos espaços intercelulares do Mod_1.

Com os valores de temperatura e Umidade relativa do ar da Figura 10 e utilizando as equações 10, 11 e 12, constrói-se a Tabela 12.

Tabela 12 – Capacitância equivalente dos espaços intercelulares do Mod_1

Capacitância Equivalente dos Espaços Intercelulares e da Câmara Subestomática						
Hora	T (°C)	UR(%)	ES	MV CEL EPID	Ψ_{ar} (MPa)	CAP esp interc
6	27,8	26	3730,79838	2,8398E-09	-186,5252	1,52E-11
7	22,6	44	2738,87027	2,1214E-09	-111,7145	1,89897E-11
8	25,2	32	3201,4806	2,4581E-09	-156,411	1,57158E-11
9	22,3	45	2689,44993	2,0853E-09	-108,5463	1,92108E-11
10	23,9	36	2962,30458	2,2844E-09	-139,6317	1,63604E-11
11	24,2	37	3016,06886	2,3236E-09	-136,0243	1,70819E-11
12	26,3	34	3416,83949	2,6138E-09	-148,635	1,75856E-11
13	29,9	30	4212,40668	3,1841E-09	-167,8738	1,89674E-11
14	34,4	24	5429,71822	4,0442E-09	-201,9422	2,00265E-11
15	36,1	22	5963,241	4,4172E-09	-215,4389	2,05031E-11
16	36,8	16	6195,78904	4,579E-09	-261,3405	1,75214E-11
MAIOR						2,05031E-11

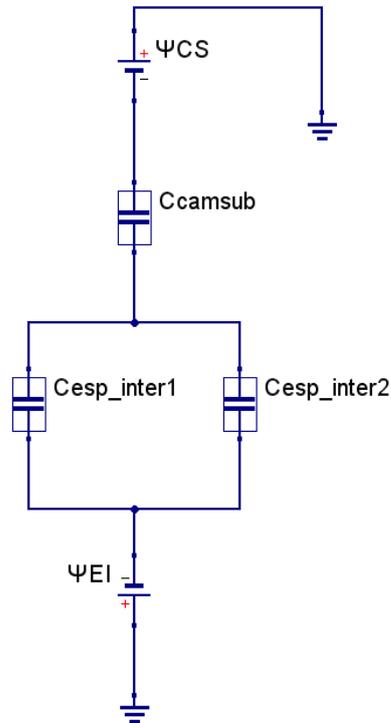
ES é o vapor de saturação (equação 10); MV é a massa de vapor d' água (Equação 11);

Ψ_{ar} é o potencial hídrico de vapor (Equação 5); CAP é a capacitância (Equação 12)

A capacitância equivalente vale $2,05 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{MPa}^{-1}$ por ser o maior valor.

O fluxo hídrico chega à câmara subestomática, partindo dos espaços intercelulares, conforme o modelo base (Tabela 14). As capacitâncias dos espaços intercelulares estão associadas em paralelo, pois ambos os caminhos vertem seu fluxo na câmara subestomática. Finalmente, a capacitância equivalente dos espaços intercelulares associa-se em série com a capacitância da câmara subestomática (Figura 44).

Figura 44 – Capacitâncias dos espaços intercelulares e câmara subestomática



Assim, considerando-se iguais as capacitâncias dos espaços intercelulares, os espaços intercelulares dispostos em paralelo e utilizando as propriedades dos capacitores, somados e da câmara subestomática (em série), obtém-se ambas, ao se resolver a Equação 23,

$$\frac{1}{C_{EQ}} = \frac{1}{C_{CAM_SUB}} + \frac{1}{C_{ESP_INTER_1} + C_{ESP_INTER_2}} \quad (23)$$

Os valores da capacitância da câmara subestomática e do espaço intercelular são de $4,1 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{MPa}^{-1}$ e $2,05 \times 10^{-11} \text{ m}^3\text{MPa}^{-1}$, respectivamente.

4.2.9 – Capacitância da Atmosfera

Para o cálculo da capacitância da atmosfera foi utilizado um volume de ar acima da superfície do conjunto de células da epiderme e estômato do Mod_1 ($4876,06 \mu\text{m}^2$) multiplicado pela altura do volume de ar acima da superfície do Mod_1 foi calculada a espessura da camada limite foliar a partir da equação do número de Reynolds (Equação 24), considerando-se escoamento laminar é 2000, massa específica do ar

(1,225 kgm⁻³), velocidade de escoamento 5ms⁻¹ de acordo com Leão (2007) e a viscosidade do ar (17,4×10⁻⁶ Pas)

$$Esp = Re * \mu / (\rho * v) \quad (24)$$

Esp é a espessura da camada limite foliar de escoamento do ar sobre a folha, *Re* é o número de Reynolds para escoamento laminar, μ é a viscosidade dinâmica do ar, ρ é a massa específica do ar, *v* é a velocidade de escoamento.

O volume encontrado é de 2,7×10⁻¹¹ m³. Sendo a saturação da atmosfera de 4%, o de vapor d'água máximo que pode ser retido, para o volume considerado, é de 1,1×10⁻¹³ m³.

Utilizando-se as equações 10,11 e 12, encontra-se o valor da capacitância da atmosfera para o volume considerado que é de 6,76×10⁻⁹ m³MPa⁻¹.

4.2.10 – Abertura do Ostíolo

Com os valores de R_0 e R_m , os potenciais hídricos da Tabela 7, os fluxos obtidos no experimento apresentados na Tabela 9 e com base na 1ª Lei de Ohm, foram calculados os valores da abertura do ostíolo por medição e por tratamento (Tabela 13).

A abertura do ostíolo pode variar de zero (ostíolo totalmente fechado) a um (ostíolo totalmente aberto). Os valores suprimidos na Tabela 13 (nos tratamentos 10 e 11 – células hachuradas da tabela) referem-se aos fluxos hídricos do experimento que são *outliers*.

Tabela 13 – Variação da abertura do ostíolo para o experimento de 10/08/2017

ABERTURA DO OSTÍOLO				
Tratamento	6h a 9h	9h a 12h	12h a 14h	14h a 16h
1,00	0,909216	0,658345	0,841121	0,414943
2,00	0,901019	0,680436	0,785131	0,518557
3,00	0,898099	0,806253	0,776238	0,595294
4,00	0,918985	0,768274	0,860719	0,566206
5,00	0,947028	0,815165	0,849384	0,662306
6,00	0,930634	0,69289	0,862496	0,71591
7,00	0,893524	0,730235	0,730132	0,604935
8,00	0,952139	0,530015	0,838958	0,761587
9,00	0,932562	0,846581	0,877231	0,811397
10,00	0,918985		0,862496	0,492751
11,00	0,938039		0,641492	
12,00	0,949271	0,846581	0,757875	0,507926
13,00	0,9447	0,896892	0,726314	0,770245
14,00	0,958119	0,787695	0,782114	0,735851
15,00	0,943904	0,720803	0,660141	0,817516

4.2.11 – Módulo Base

A quantidade de células-guarda, epidérmicas, espaços intercelulares, etc. de um módulo base, isto é, composto por um único ostíolo central (Mod_1), corresponde às quantidades apresentadas na Tabela 8. A proporção encontrada que forma o módulo base corresponde à proporção média encontrada na folha do Feijão para todos os dispositivos modelados por onde o fluxo hídrico percorre no processo de transpiração. Há, por exemplo, seis células da epiderme para cada ostíolo. A Tabela 14 contempla essas proporções.

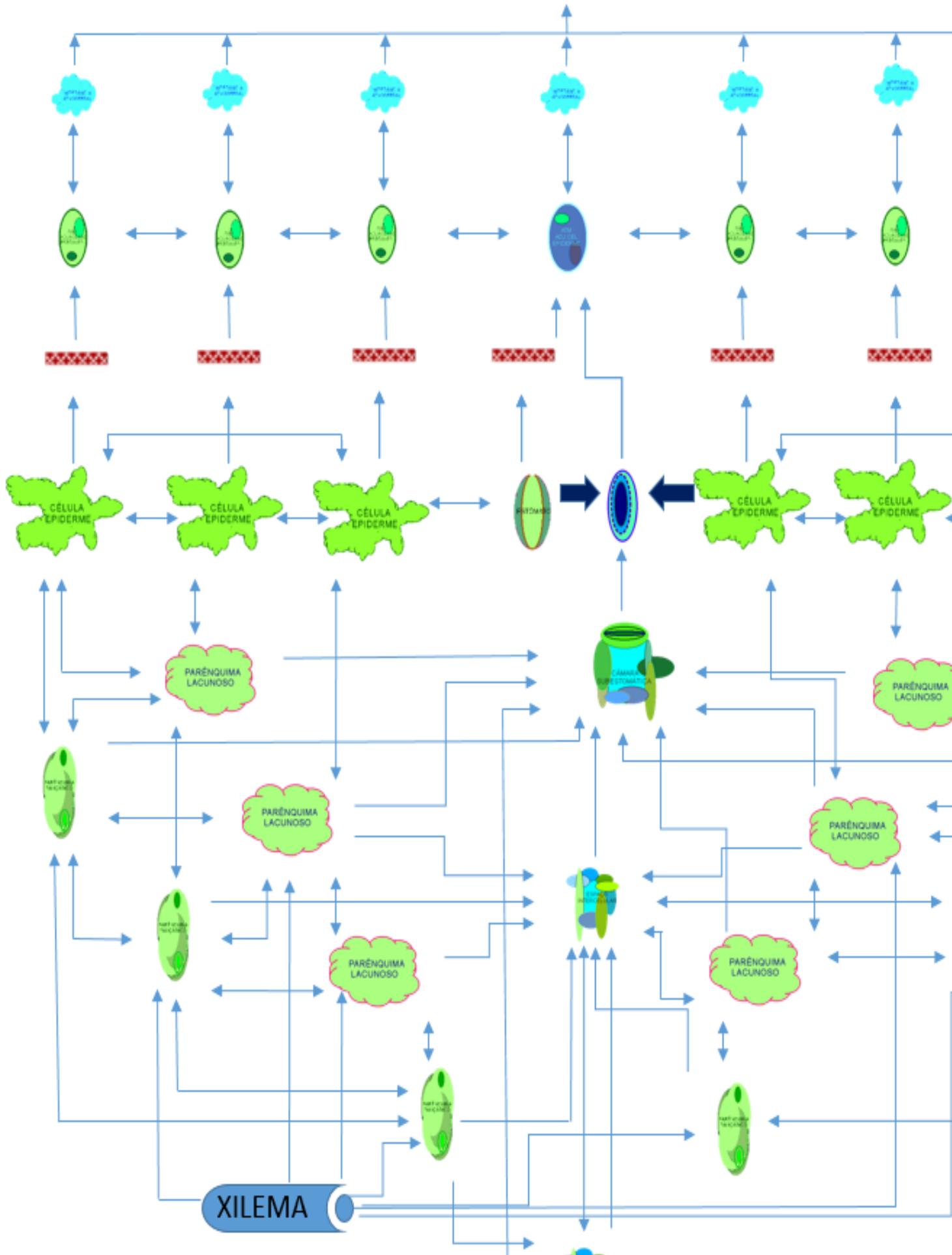
Tabela 14 – Proporção de circuitos do Módulo base

CIRCUITO ANÁLOGO-ELÉTRICO	QUANTIDADE
Ostíolo	1
Estômato	1
Espaço Intercelular	2
Cutícula	6
Circuito da Atmosfera	7
Célula-guarda	2
Célula do Parênquima Paliçádico	6
Célula do Parênquima Lacunoso	6
Célula da Epiderme	6
Câmara Subestomática	1
Atmosfera Adjacente ao Estomato	6
Atmosfera Adjacente à Célula da Epiderme	1

Para a confecção do módulo base (Mod_1), foi utilizado o QUCS para a interligação dos circuitos encapsulados dos análogos elétricos de acordo com a Tabela 14, considerando a organização e as ligações fisiológicas descritas por Taiz e Zeiger (2017) apresentadas as figuras 35, 36, 37, 38, 39, 40 e 41. A Figura 45 apresenta um diagrama com as indicações das ligações realizadas.

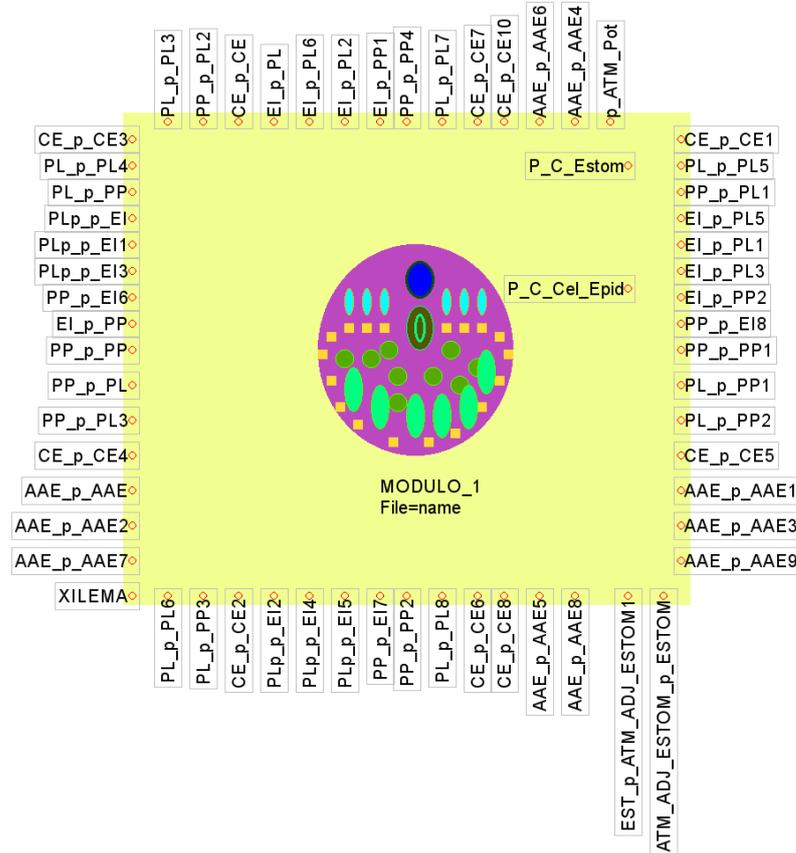
Figura 45 – Diagrama com as indicações de ligações do Mod_1

Potencial da Atmosfera



O módulo (Mod_1), cujo símbolo do encapsulamento é apresentado na Figura 46, possui sessenta portas para expansão que podem ser ligadas com suas réplicas e/ou sondas de medida de potencial e fluxos.

Figura 46 – Mod_1: Módulo base com um único ostíolo e suas conexões



4.2.12 – Expansão em Módulos

Para estudo da escalabilidade, foram construídos módulos com n^2 réplicas de Mod_1. O número n assume apenas valores ímpares ($n = 2 * n_{cam} + 1$), de modo que se tenha um ostíolo central, com n_{cam} , o número inteiro de camadas de Mod_1 entorno deste central. O fluxo hídrico que atravessa o ostíolo central do circuito de cada módulo é o objeto de estudo e comparação com os fluxos obtidos no experimento.

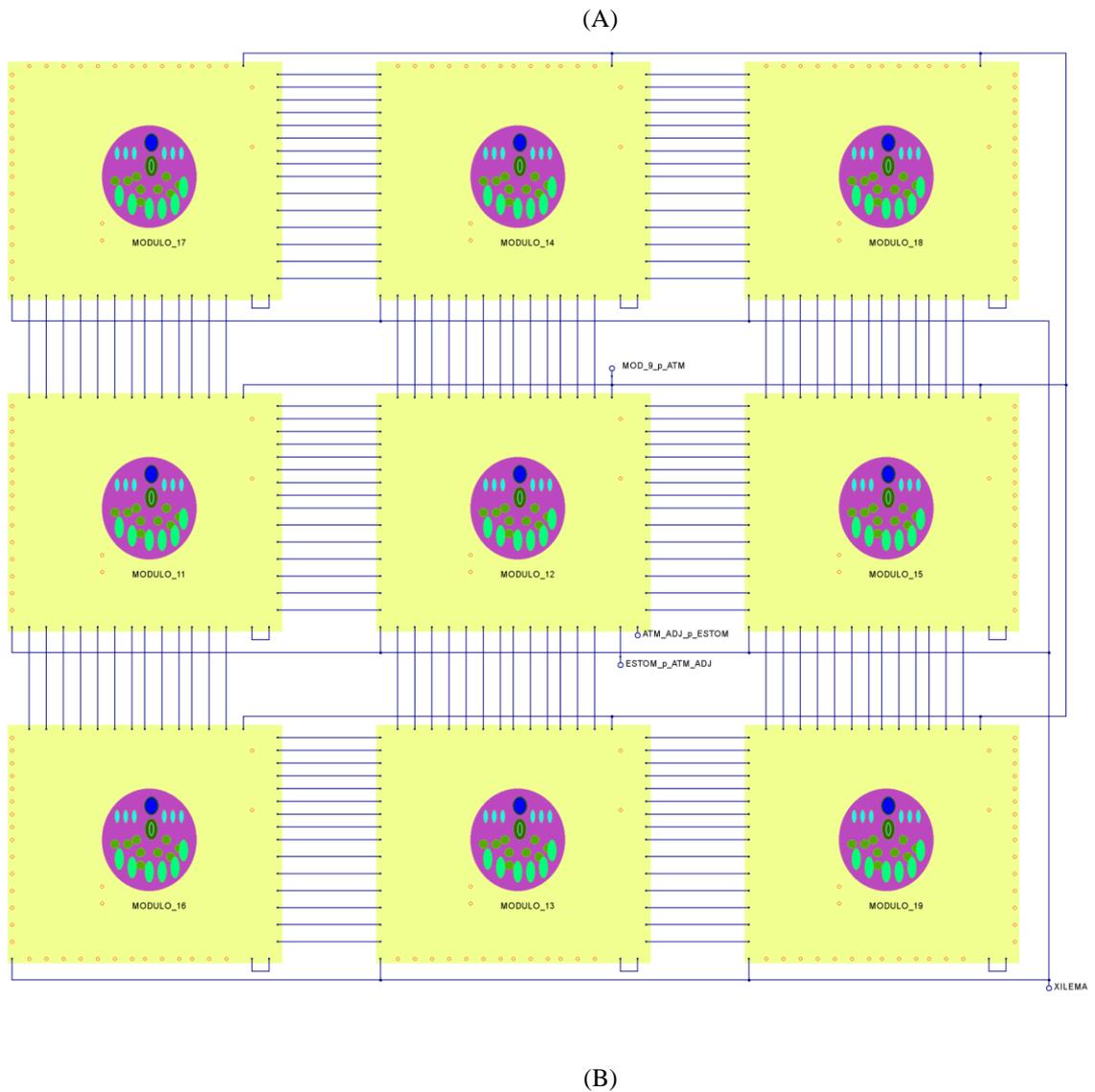
Os módulos Mod_(n^2), com $n = 3, 5, 7, (2 * n_{cam} + 1)$, isto é, Mod_9, Mod_25, Mod_49 foram construídos interligando réplicas do Mod_1, conforme a proporção descrita na Tabela 8. n_{cam} é o número de camadas de réplicas de Mod_1 no entorno do módulo central. A quantidade de circuitos existentes em cada um dos módulos, $Q_(n^2)$, é dada pela Equação 25.

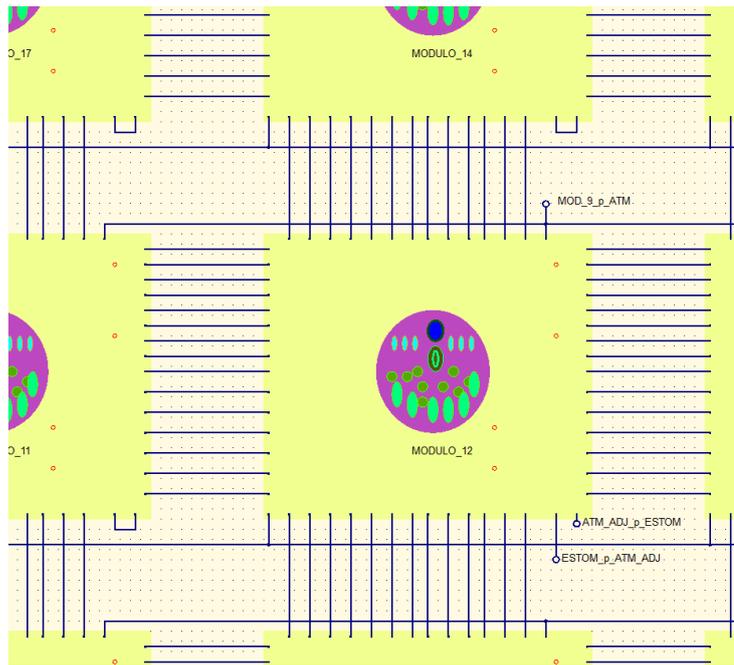
$$Q_{-}(n^2) = n_{circ} * (2 * n_{cam} + 1)^2 \quad (25)$$

n_{circ} é a quantidade de circuito no Mod_1.

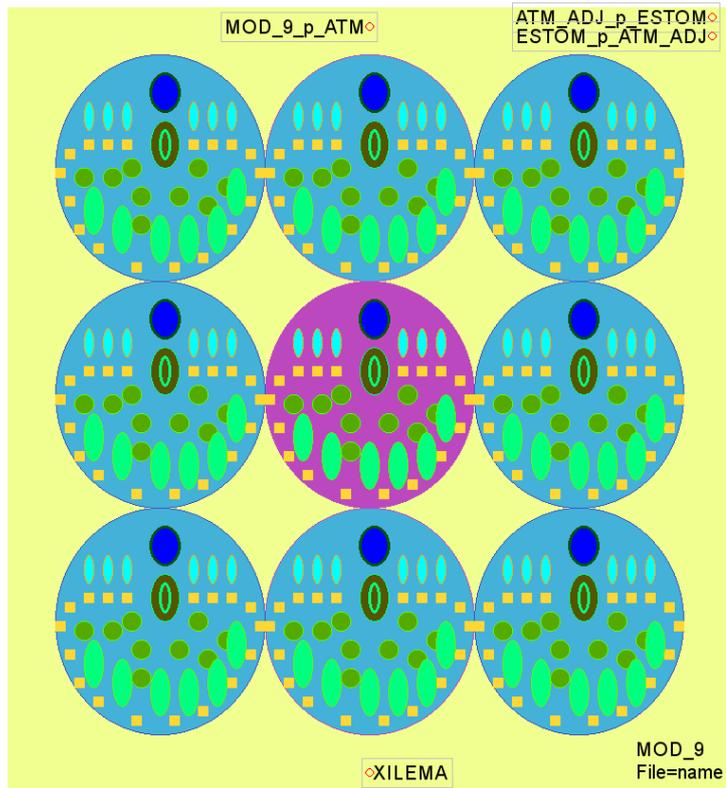
O módulo Mod_9 (Figura 47), por exemplo, foi construído a partir da interligação de nove módulos Mod_1, topologia adotada para que houvesse uma camada de Mod_1 circundando o módulo principal. De modo semelhante, os números de camadas de Mod_1 aumentam para 2 e 3 nos módulos Mod_25 e Mod_49, respectivamente (Figuras 47, 48 e 49).

Figura 47 – Módulo para estudo da escalabilidade (Mod_9)





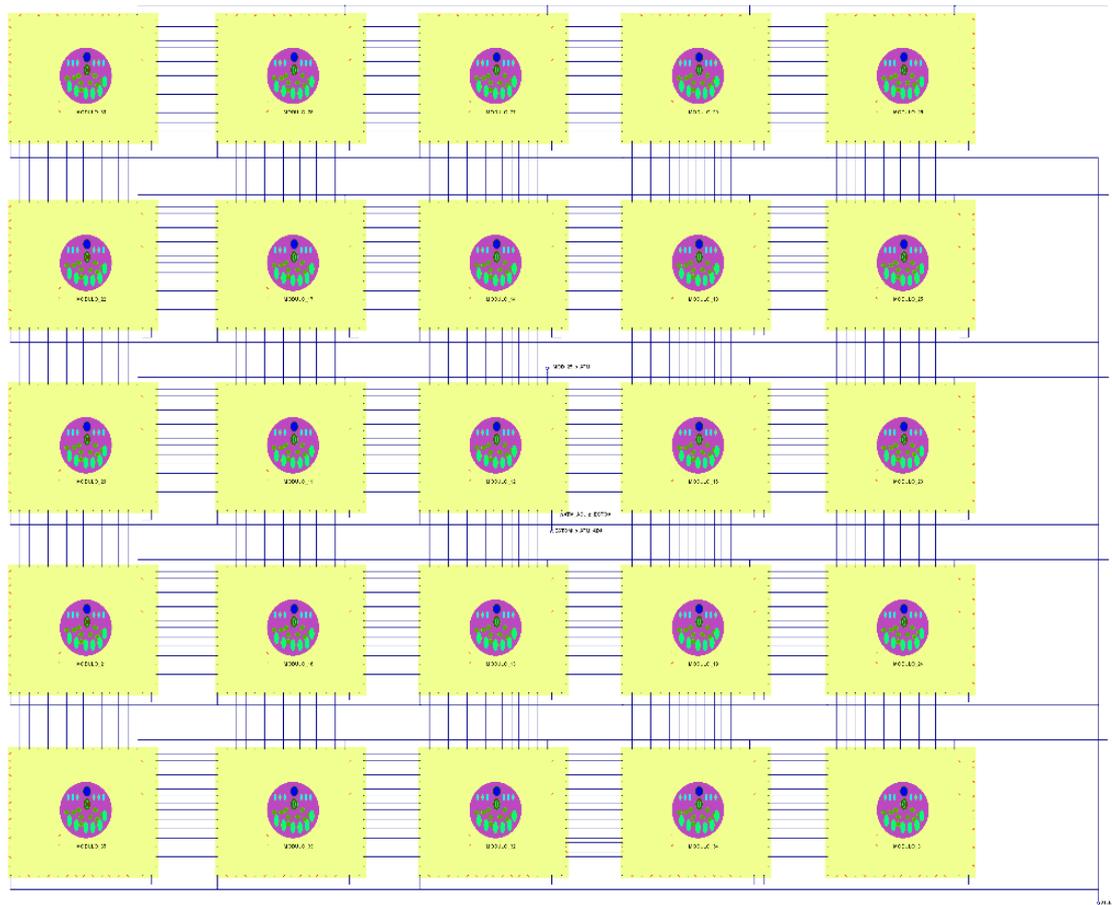
(C)



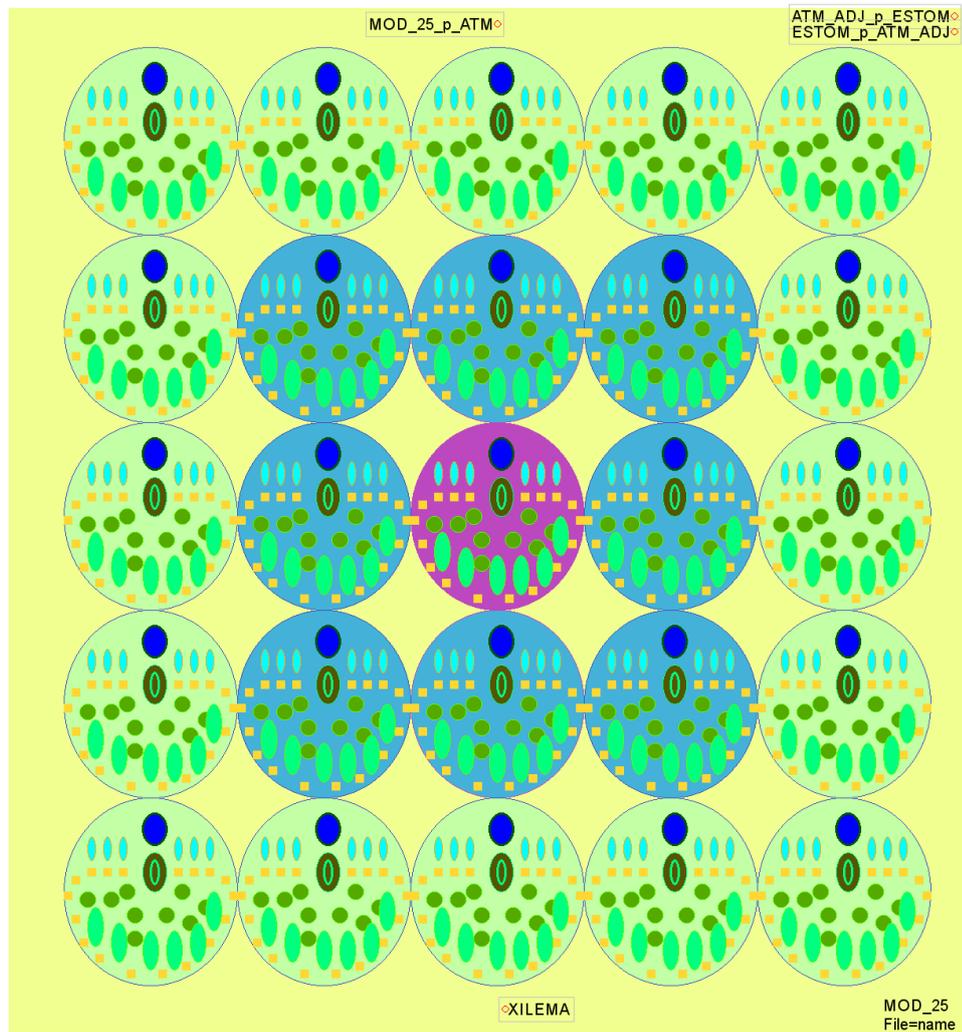
(A) Interligação de nove módulos Mod_1 para a confecção do Mod_9, (B) Detalhe das ligações do Mod_1 central e (C) Encapsulamento do módulo Mod_9 com o circuito central em destaque pela presença do ostíolo principal.

Figura 48 – Módulo para estudo da escalabilidade (Mod_25)

(A)



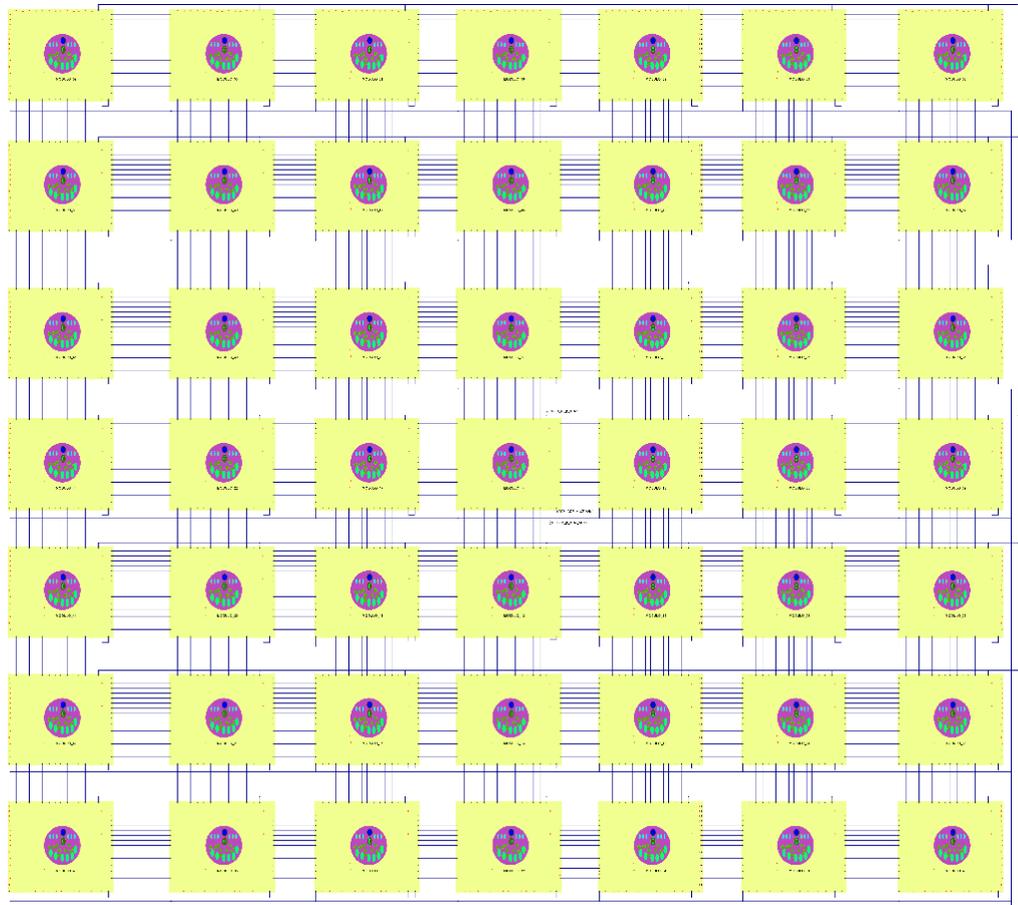
(B)

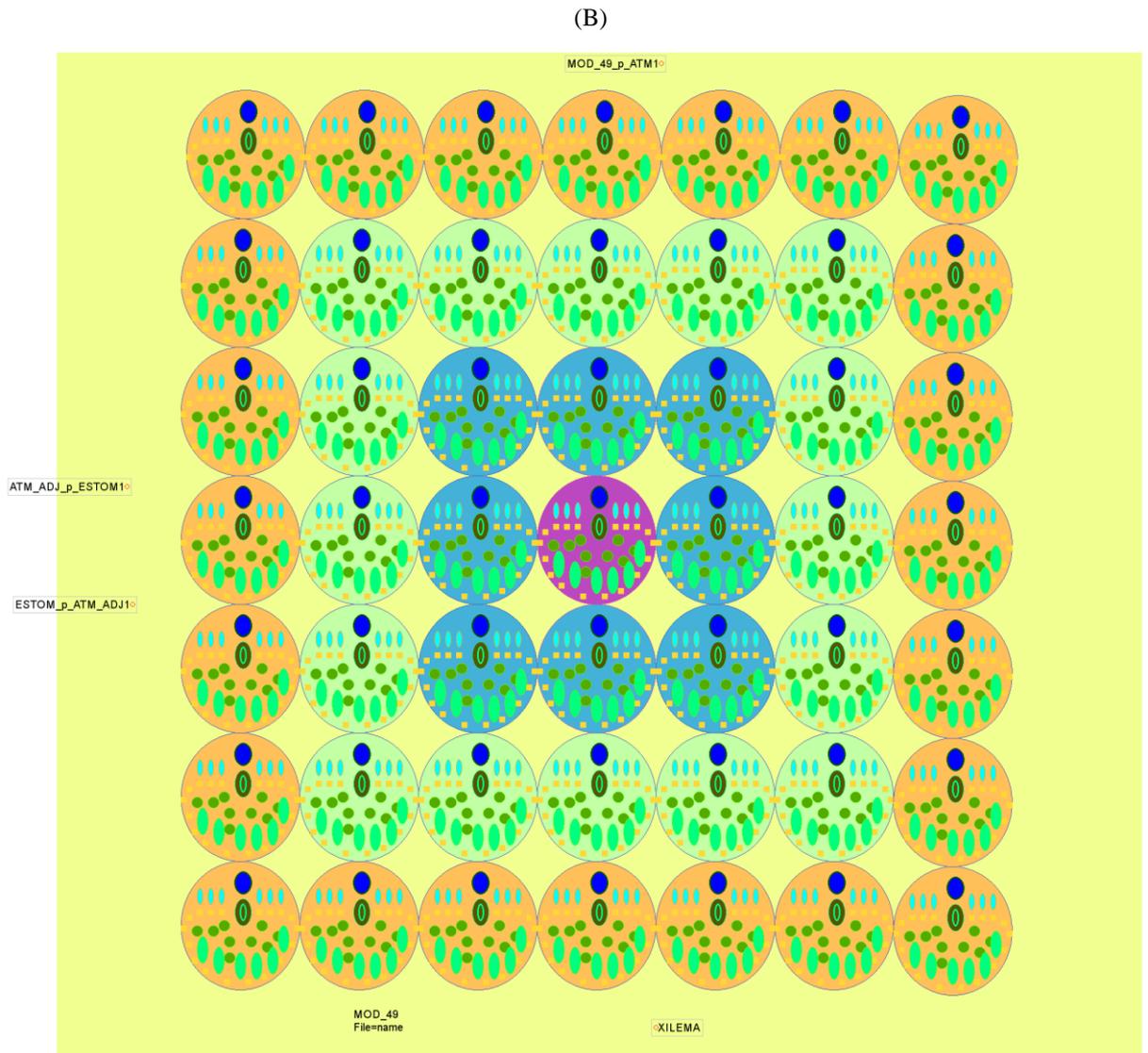


(A) Interligação de vinte e cinco módulos Mod_1 para a confecção do Mod_25 e (B) Encapsulamento do módulo Mod_25 com o circuito central em destaque pela presença do ostíolo principal.

Figura 49 – Módulo para estudo da escalabilidade (Mod_49)

(A)



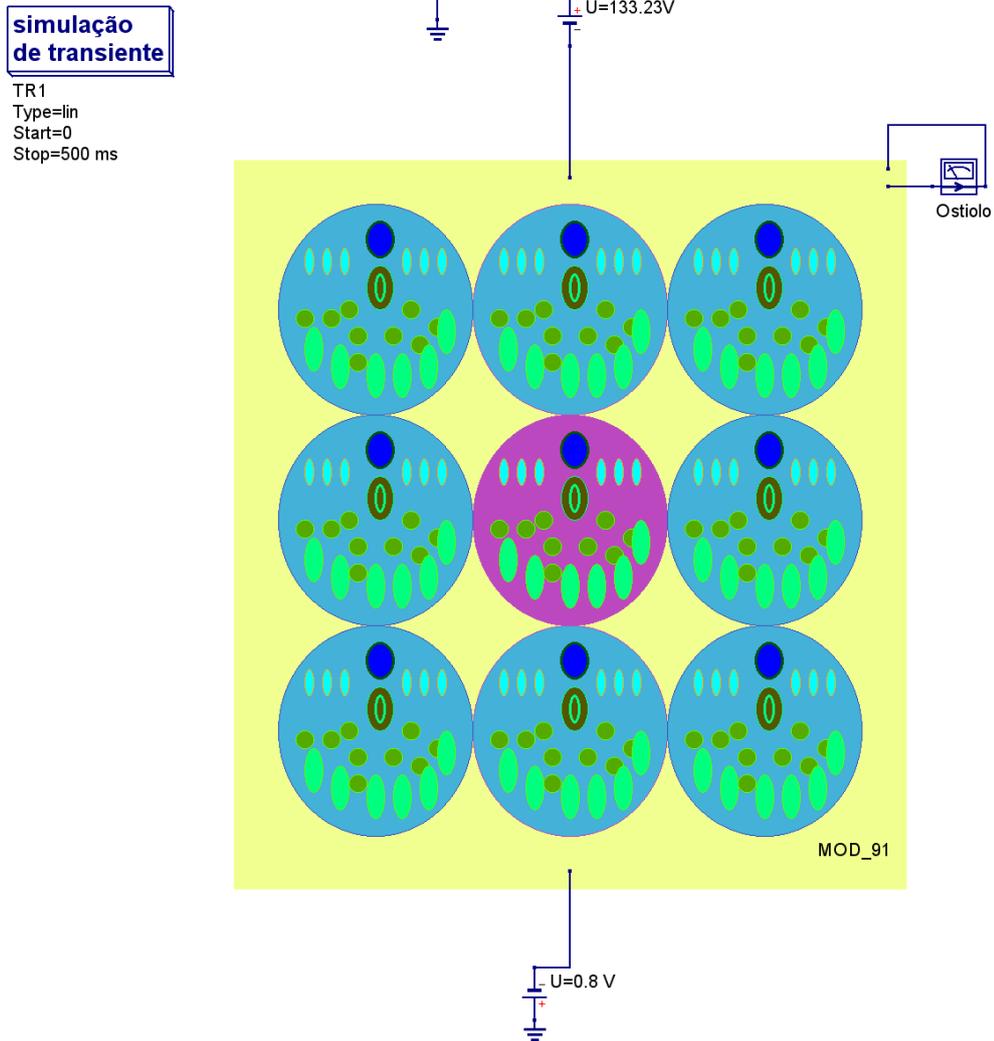


(A) Interligação de cinco módulos Mod_1 para a confecção do Mod_49 e (B) Encapsulamento do módulo Mod_49 com o circuito central em destaque pela presença do ostíolo principal.

A diferença de cores nas Figuras entre os encapsulamentos evidencia as camadas sucessivas adicionadas ao mod_1 central.

A Figura 50 ilustra as ligações no Mod_9 para que se pudessem realizar as simulações. Os procedimentos e ligações para a realização das simulações do Mod_1, Mod_25 e Mod_49 foram os mesmos do módulo Mod_9.

Figura 50 – Ligações do Mod_9



4.2.14 – Fluxo hídrico obtido das simulações

O Mod_9 liga-se com o xilema que tem potencial hídrico de $-0,8$ MPa e com a atmosfera com os valores dos potenciais hídricos da Tabela 7. Na Figura 50, o potencial hídrico foi colocado como exemplo $-133,2$ MPa de uma das simulações. A ponteira (Ostíolo) mede o fluxo hídrico que atravessa o ostíolo central. A simulação foi feita no modo transiente. Cada um dos quinze tratamentos tem abertura estomática (*as*) diferente para um mesmo valor de potencial. Assim, foram realizadas 60 simulações para cada módulo (Mod_1, Mod_9, Mod_25 e Mod_49).

Os resultados obtidos na simulação são apresentados nas Tabelas 15, 16, 17 e 18.

Tabela 15 – Fluxos hídricos do estômato central obtido da simulação do Mod_1

MOD_1				
Tratamento	6h a 9h	9h a 12h	12h a 14h	14h a 16h
1,00	1,22E-16	4,55E-17	1,06E-16	4,88E-17
2,00	1,16E-16	4,81E-17	8,51E-17	5,79E-17
3,00	1,14E-16	7,07E-17	8,25E-17	6,72E-17
4,00	1,29E-16	6,19E-17	1,15E-16	6,33E-17
5,00	1,58E-16	7,32E-17	1,09E-16	7,81E-17
6,00	1,40E-16	4,97E-17	1,16E-16	8,98E-17
7,00	1,11E-16	5,51E-17	7,14E-17	6,85E-17
8,00	1,65E-16	3,48E-17	1,05E-16	1,03E-16
9,00	1,42E-16	8,33E-17	1,25E-16	1,23E-16
10,00	1,29E-16		1,16E-16	5,53E-17
11,00	1,48E-16		5,68E-17	
12,00	1,61E-16	6,55E-17	7,77E-17	5,68E-17
13,00	1,55E-16	1,07E-16	7,07E-17	1,06E-16
14,00	1,73E-16	6,61E-17	8,42E-17	9,51E-17
15,00	1,54E-16	5,36E-17	5,93E-17	1,26E-16

Valores em (m³.s⁻¹)

Tabela 16 – Fluxos hídricos do estômato central obtido da simulação do Mod_9

MOD_9				
Tratamento	6h a 9h	9h a 12h	12h a 14h	14h a 16h
1,00	1,22E-16	4,55E-17	1,06E-16	4,88E-17
2,00	1,16E-16	4,81E-17	8,51E-17	5,79E-17
3,00	1,14E-16	7,07E-17	8,25E-17	6,72E-17
4,00	1,29E-16	6,19E-17	1,15E-16	6,33E-17
5,00	1,58E-16	7,32E-17	1,09E-16	7,81E-17
6,00	1,40E-16	4,97E-17	1,16E-16	8,98E-17
7,00	1,11E-16	5,51E-17	7,14E-17	6,85E-17
8,00	1,65E-16	3,48E-17	1,05E-16	1,03E-16
9,00	1,42E-16	8,33E-17	1,25E-16	1,23E-16
10,00	1,29E-16		1,16E-16	5,53E-17
11,00	1,48E-16		5,66E-17	
12,00	1,61E-16	6,55E-17	7,74E-17	5,68E-17
13,00	1,55E-16	1,07E-16	7,07E-17	1,06E-16
14,00	1,73E-16	6,61E-17	8,42E-17	9,51E-17
15,00	1,54E-16	5,36E-17	5,92E-17	1,26E-16

Valores em (m³.s⁻¹)

Tabela 17 – Fluxos hídricos do estômato central obtido da simulação do Mod_25

MOD_25				
Tratamento	6h a 9h	9h a 12h	12h a 14h	14h a 16h
1,00	1,21E-16	4,53E-17	1,05E-16	4,86E-17
2,00	1,15E-16	4,79E-17	8,48E-17	5,77E-17
3,00	1,13E-16	7,04E-17	8,22E-17	6,70E-17
4,00	1,29E-16	6,16E-17	1,15E-16	6,31E-17
5,00	1,57E-16	7,28E-17	1,09E-16	7,79E-17
6,00	1,39E-16	4,94E-17	1,16E-16	8,96E-17
7,00	1,11E-16	5,48E-17	7,12E-17	6,83E-17
8,00	1,64E-16	3,46E-17	1,04E-16	1,03E-16
9,00	1,41E-16	8,29E-17	1,25E-16	1,22E-16
10,00	1,29E-16		1,16E-16	5,51E-17
11,00	1,47E-16		5,66E-17	
12,00	1,60E-16	6,53E-17	7,74E-17	5,66E-17
13,00	1,55E-16	1,07E-16	7,04E-17	1,06E-16
14,00	1,73E-16	6,58E-17	8,39E-17	9,49E-17
15,00	1,54E-16	5,34E-17	5,91E-17	1,25E-16

Valores em (m³.s⁻¹)

Tabela 18 – Fluxos hídricos do estômato central obtido da simulação do Mod_49

MOD_49				
Tratamento	6h a 9h	9h a 12h	12h a 14h	14h a 16h
1,00	1,21E-16	4,53E-17	1,05E-16	4,86E-17
2,00	1,15E-16	4,79E-17	8,48E-17	5,77E-17
3,00	1,13E-16	7,04E-17	8,22E-17	6,70E-17
4,00	1,29E-16	6,16E-17	1,15E-16	6,31E-17
5,00	1,57E-16	7,28E-17	1,09E-16	7,79E-17
6,00	1,39E-16	4,94E-17	1,16E-16	8,96E-17
7,00	1,11E-16	5,48E-17	7,12E-17	6,83E-17
8,00	1,64E-16	3,46E-17	1,04E-16	1,03E-16
9,00	1,41E-16	8,29E-17	1,25E-16	1,22E-16
10,00	1,29E-16		1,16E-16	5,51E-17
11,00	1,47E-16		5,66E-17	
12,00	1,60E-16	6,53E-17	7,74E-17	5,66E-17
13,00	1,55E-16	1,07E-16	7,04E-17	1,06E-16
14,00	1,73E-16	6,58E-17	8,39E-17	9,49E-17
15,00	1,54E-16	5,34E-17	5,91E-17	1,25E-16

Valores em (m³.s⁻¹)

4.3 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MODELO

4.3.1 – Correlação de Spearman

Por meio da correlação de Spearman, com nível de significância de 1%, foram comparados, os fluxos medidos no experimento com os fluxos hídricos obtidos nas simulações dos módulos Mod_1, Mod_9, Mod_25 e Mod_49. Os resultados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Correlações de Spearman

			Correlações				
			Experimento	Mod_1	Mod_9	Mod_25	Mod_49
rô de Spearman exp	Coefficiente de	Correlação	1,000	1,000**	1,000**	1,000**	1,000**
		Sig. (bilateral)	.	,000	,000	,000	,000
		N	57	57	57	57	57

** A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

As correlações de Spearman entre os fluxos hídricos do experimento e dos modelos são todas significativas ao nível de 0,01 (bilateral)

Em relação aos coeficientes de Spearman, pode-se dizer que os dados simulados em todos os módulos apresentaram forte correlação positiva (ρ igual a 1) em relação aos dados experimentais.

Os resultados indicam que os valores dos fluxos hídricos simulados dos módulos Mod_1, Mod_9, Mod_5 e Mod_49 correspondem às do fluxo hídrico do experimento.

4.3.2 – Regressão Linear Simples

Foram realizadas análises de regressão entre o fluxo hídrico do experimento e os fluxos obtidos na simulação dos módulos Mod_1, Mod_9, Mod_5 e Mod_49. As análises de regressão entre o fluxo hídrico do experimento e os fluxos obtidos na simulação dos módulos apresentaram R, R^2 e R^2 ajustado iguais a 1,000 e o Erro padrão da estimativa ficou igual a $4,5 \times 10^{-19}$, $4,5 \times 10^{-19}$, $4,7 \times 10^{-19}$ e $4,5 \times 10^{-19}$ para todos os módulos (Mod_1, Mod_9, Mod_5 e Mod_49), respectivamente.

O coeficiente de correlação linear (R) igual a 1 assinala que a relação entre os fluxos hídricos do experimento e simulados é perfeita e direta. O coeficiente de determinação (R^2) igual a 1 mostra que podemos prever o fluxo hídrico do

experimento a partir do fluxo hídrico simulado. E R^2 ajustado igual a 1 aponta que a predição do fluxo hídrico simulado é exata em relação ao fluxo hídrico do experimento. Assim, os resultados da regressão indicam que a variação dos fluxos hídricos obtidos da simulação de cada um dos módulos explicam as variações do fluxo hídrico do experimento.

4.3.3 – Erro Médio Absoluto e Erro Percentual Médio Absoluto

O erro absoluto entre os valores dos fluxos hídricos do experimento (Tabela 20) com os obtidos nas simulações dos módulos Mod_9, Mod_25 e Mod_49 foi de $1,91 \times 10^{-17}$, ou seja, foi o mesmo em função da proximidade dos valores obtidos nas simulações.

Tabela 20 – Erro Médio Absoluto ($m^3 s^{-1}$) e Erro Percentual Médio Absoluto (%)

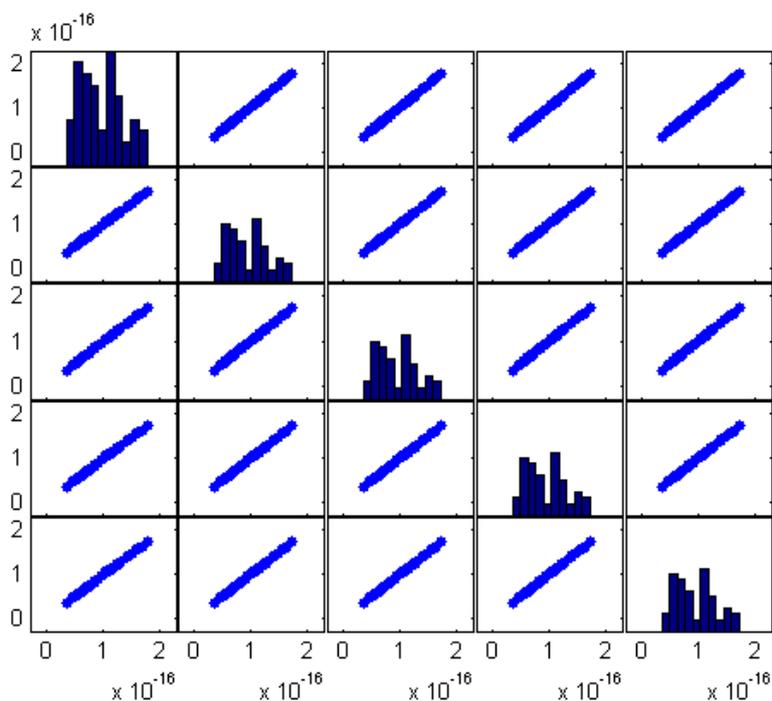
	MOD_1	MOD_9	MOD_25	MOD_49
Erro médio absoluto	1,47E-18	1,48E-18	1,83E-18	1,83E-18
Erro percentual médio absoluto	1,31%	1,32%	1,68%	1,68%

Diferenças entre o fluxo volumétrico experimental (por estômato) e o fluxo simulado pelos módulos Mod_1, Mod_9, Mod_25 e Mod_49.

4.3.4 – Diagrama de Dispersão

Por meio de *scatterplot matrix* (Figura 51) entre o fluxo do experimento e os módulos Mod_1, Mod_9, Mod_25 e Mod_49, bem como entre os módulos, foi verificada a correspondência linear e direta entre os valores dos fluxos hídricos obtidos. Também foi verificado que os valores dos coeficientes de determinação R^2 foram muito próximos à 1.

Figura 51 – Scatterplot matrix entre fluxo do experimento e da modelagem



4.4 – ESCALABILIDADE DO MODELO

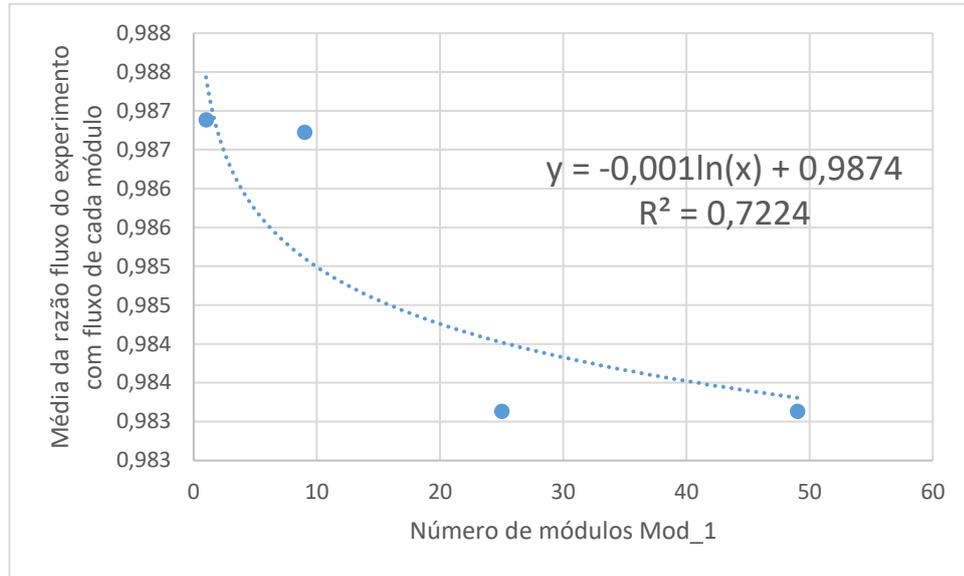
Para o estudo de escalabilidade do modelo, foram calculados fluxos hídricos relativos dos módulos Mod_1, Mod_9, Mod_25 e Mod_49, definidos como a razão entre os valores de fluxo obtidos no experimento para cada um dos tratamentos (Tabela 9) e os valores do fluxo hídrico *in silico* correspondentes (Tabelas 15, 16, 17 e 18), obtendo-se os valores médios para cada módulo (Tabela 21).

Tabela 21 – Média da razão entre fluxo hídrico do experimento e dos módulos

	MOD 1	MOD 9	MOD 25	MOD 49
Fluxo hídrico relativo	0,987	0,987	0,983	0,983
Erro padrão	0,0064	0,0063	0,0065	0,0065

Para identificar a tendência de ajuste dos fluxos hídricos relativos, da Tabela 21, quando implementados novos módulos com quantidades de réplicas de Mod_1, foi feita uma curva de expansão logarítmica (Figura 52).

Figura 52 – Fluxo hídrico relativo



Considerando que no experimento uma planta do *Phaseolus Vulgaris L.*, que estava no estágio V4, tem 10 folhas, o número de estômatos é $1,5 \times 10^8$ (Tabela 8). Desta forma o modelo que representa uma folha tem 12247 réplicas de Mod_1.

Para verificar, por extrapolação, o valor do fluxo hídrico resultante do Mod_12247, que pode ser chamado de Mod_folha, basta substituir na equação obtida da curva (Figura 52) o número de módulos Mod_1 necessários para obter a quantidade de ostíolos da folha. O valor do fluxo hídrico relativo obtido é de 0,98. Assim, o fluxo hídrico da modelagem manteve-se a 98% do fluxo obtido no experimento. A partir de extrapolação, conclui-se que a modelagem é escalável.

5 - CONCLUSÃO

A realização do experimento na Estação Micrometeorológica “Mestre Bomble” proporcionou, dada a proximidade com a sede do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental/UFMT, o acompanhamento diário da cultura do *Phaseolus Vulgaris L.* Tal acompanhamento apresentou-se como exigência para o bom desenvolvimento das plantas, de modo a obtenção de dados confiáveis de fluxo hídrico ao longo do dia da coleta, de área foliar e a densidade das células da epiderme e do ostíolo de um grande número de plantas, o que foi necessário para a calibração e a validação do modelo.

A obtenção da área foliar média da planta, do número de células da epiderme e de estômatos, com base no método de Jeffries e por meio do software livre ImageJ permitiram definir as proporções e densidades das células da epiderme e dos estômatos do *Phaseolus Vulgaris L.* Estas informações, obtidas a partir do experimento, juntamente com a base de conhecimentos disponíveis na literatura foram basilares para a obtenção das resistências e capacitâncias dos circuitos *in silico*, bem como nas relações entre circuitos. Componentes análogos elétricos da estrutura de uma folha do *Phaseolus Vulgaris L.* responsáveis pelo fluxo hídrico foram desenvolvidos, conectados e submetidos a condições de potencial semelhantes aos esperados pelas condições de solo e tempo dos dias do experimento.

As simulações realizadas nos módulos construídos Mod_1, Mod_9, Mod_25 e Mod_49 apresentaram fluxo hídrico com resultados estatísticos, quando comparados aos dados obtidos do experimento no período de seca, com uma forte correlação direta e erro percentual médio absoluto menor que 2%. Os resultados indicam que os módulos respondem similarmente às variações de condições micrometeorológicas para o período de seca. Quanto à escalabilidade, os resultados indicam que o modelo pode ser ampliado para quantidades de circuitos semelhantes às de uma folha, respondendo com valores dos fluxos hídricos simulados semelhantes aos coletados no experimento.

O modelo é de fácil reconfiguração em sua topologia, proporção, disposição e medição, o que permite aplica-lo ao processo de transpiração foliar a plantas de outras espécies em diferentes condições edafoclimáticas.

O modelo poderá ser aplicado em estudos de oscilações estomáticas, análise de crescimento, produtividade, condutância estomática, estudo de clones e outros.

A análise da analogia entre fluxo hídrico e elétrico na folha, com foco na modelagem da transpiração, contribui na mesma direção dos trabalhos de Lang e colaboradores (1969), Cowan (1972), Farquar e Cowan (1974), Kramer e Boyer (1995), Hills et al. (2012), Sun et al. (2014), Mott e Peak (2007), Stavrinidou et al. (2015) e outros. Em especial, com os trabalhos realizados no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da UFMT de modelagem *in silico* do fluxo hídrico em plantas vasculares: Gaio (2011), Pereira (2013, 2016), Pereira et al. (2015), Siqueira (2014) e Lima (2017).

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M.; ALMEIDA, C. V. **Morfologia da folha de plantas com sementes**. Coleção Botânica. ESALQ/USP. 2018.
- APEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO. **Anatomia vegetal**. 2ª edição. Ed. UFV. UFV. 2006.
- ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J. R. S, SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; GRIENSVEN A. V. **Swat: Model Use, Calibration, And Validation**. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2012.
- BETTS, K. A.; DESJARDINS R. L.; WORTH D. **Impact of agriculture, forest and cloud feedback on the surface energy budget in BOREAS**. Agricultural and Forest Meteorology. 2007.
- BERG, David. **Creating an Electronic Analog of a Stomatal Network**. Physics Capstone Project. 2014.
- BILDES, M.S. **Balço de energia em area de vegetação monodominante de camará e pastagem no norte do pantanal**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical. UFMT. 2008.
- BIOLOGIAEMFOCO. Disponível em <http://biologiaemfococeara.blogspot.com/2013/05/a-molecula-de-agua-h2o-e-formada-pelo.html>. Acesso em janeiro de 2020.
- BUCKLEY, T.N. **The control of stomata by water balance**. Tansley Review. New Phytologist. 168: 275–292. 2005.
- CID, L. P. B.; TEIXEIRA, J. B. **Fisiologia vegetal – definições e conceitos**. Documento 356. EMBRAPA. 2017.
- CASTRO, N. M. **Anatomia vegetal**. UFU. Disponível em: http://www.anatomiavegetal.ib.ufu.br/folha_texto.htm. Acesso em dezembro de 2019.
- COWAN, I.R. **Oscilations in stomatal conductance and plant functioning associated with stomatal conductance: Observations and a model**. 1972.
- DIXON H. H.; JOLY J. On the ascent of sap. Phil. Trans. Royal Society o London B, **Biological Sciences**. 1894.
- FARQUAR, G.; COWAN I. **Oscillations in Stomatal Conductance: The Influence of Environmental Gain**. *Plant Physiol*. 1974.

- FIELD, Andy. **Descobrimo a estatística usando SPSS**. Tradução Lorí Vali. 2ª Edição. Porto Alegre. 2014.
- GAIO, Denilton Carlos. **Análogo elétrico da dinâmica hídrica em plantas vasculares**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental. UFMT. 2011.
- GARDNER, W.R. **Dynamic aspects of water availability to plants. "Soil Science"**. **Madison**.1960.
- GREGOL, R. E.; SCHUTZ, F. **Recursos de Escalabilidade e Alta Disponibilidade para Aplicações Web**. Revista Eletrônica Científica de Inovação Tecnológica. ECA-MEDITEC. UTFPR. 2013.
- GUIMARÃES, R. C.; SHAHIDIAN, S.; RODRIGUES, C. M. **Hidrologia agrícola**. Livro. 2ª Ed. ICAAM. Universidade de Évora. 2017.
- HENDERSON, Cal. **Building Scalable Web Sites**. O'Reilly Media, Inc. 1ª Edição. 2006.
- HILL, M. D. **What is scalability?** ACM Sigarch Computer Architecture News, v. 18, n. 4.1990.
- HILLS, A.; CHEN, Z.H.; AMTMANN, A.; BLATT, M. R.; LEW, V. L. **OnGuard, a computational platform for quantitative kinetic modeling of guard cell physiology**. Plant Physiology. 2012.
- HUNT E.R; RUNNING, S.W.; FEDERER, C.A. **Extrapolating plant water flow resistances and capacitances to regional scales**. **Agricultural and Forest Meteorology**. 1991.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em outubro de 2018.
- JUNQUEIRA, C. Luiz; CARNEIRO, José. **Biologia Celular e Molecular**. Editora Guanabara/Koogan, 8ª edição. 2005.
- KERBAUY, Giberto B. **Fisiologia Vegetal**, Livro 2ª Edição. Ed. Guanabara Koogan. 2004.
- KOBIYAMA, Masato; CHAFFE P. L. B. e NETTO, A. O. A. **Manejo de bacias hidrográficas na produção de água**. Cap. 11. Livro Agricultura Conservacionista do Brasil. EMBRAPA.2014.

- JOHNSSON, A.; G. Prytz. **Period Doubling of Rhythmic Water Regulation in Plants**. Biological Rhythms. Cap. 4. Narosa Publishing House. India. 2002.
- JONES, H. G. **Plants and Microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. New York: Cambridge University Press. 1992.
- KAPPES C.; WRUCK F. J.; CARVALHO M. A. C.; YAMACHITA O. M. **Feijão comum: características morfo-agronômicas de cultivares**. IAC Campinas. 2008.
- KRAMER, P.J.; Boyer, J.S. **Water relations of plants and soils**. Academic Press, San Diego. 1995.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo .Rima. 2000
- LAW, Averill. **Simulation Modeling and Analysis**. Series in Industrial Engineering and Management). Ed. Mcgraw-hill. 5ª Ed. 2016
- LAWSON, Tracy. **Guard Cell photosynthesis and stomatal function**. Department of Biological Sciences. University of Essex-UK. 2008.
- LEÃO, E. F. T. Borges. **Carta Bioclimática de Cuiabá - Mato Grosso**. Dissertação. PPGFA. UFMT. 2007
- LIER, Quirijn de J. V. **Balanco de energia de uma folha**. ESALQ/USP. Disponível em:
http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce200/Balanco_de_energia_de_uma_folha.pdf
. Acessado em dezembro de 2019.
- LIMA, L. P. de Arruda **Estudo do Análogo Hídrico-Elétrico do Fluxo e Armazenamento Hídrico em Caules de Angiospermas**. Dissertação. PPGFA. UFMT. 2017.
- NOBEL, P.S. **Physicochemical and Environmental Plant Physiology**, 4th edition, San Diego, CA Academic Press/Elsevier 1-582. 2009.
- MARIN, Fábio R. **Evapotranspiração e Transpiração Máxima em Cafezal Adensado**. Tese de Doutorado. USP. Piracicaba. 2003.
- MOREIRA. Suyá S. **Aspectos do desenvolvimento em feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) inoculados com *Trichoderma* spp.** UFG. Instituto de Ciências Biológicas. Mestrado em Biodiversidade Vegetal. 2014.
- MOTT, Keith, A.; PEAK DAVID. **Stomatal Patchiness and Task-performing Networks**. Annals of Botany. Oxford Journal. USA. 2007.

NIST/SEMATECH. **Handbook of statistical Methods**. Disponível em: <https://itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/scatterp.htm>. Acesso em janeiro de 2020.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”. USP. 2007.

PEREIRA, V. M. R.; GAIO Denilton C.; PAULO, Iramaia J. C. de; CURADO, Leone F. A.; NOGUEIRA, José de S. **Estimativa do volume e da turgescência do estômato de vicia faba ao longo do dia**. Revista Ciência e Natura, v. 37, n. 2. 2015.

PEREIRA, V. M. R. **Análogo Elétrico da Dinâmica Estomática em função da radiação solar e potencial hídrico atmosférico**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental. UFMT. 2016.

PEREIRA, V.M.R. **Análogo Elétrico da Pressão de Turgescência em Células-guarda de Vicia Faba: Modelo Científico e Conceitual**. Mestrado em Física Ambiental. Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso. 2013.

PES, Luciano Z.; ARENHARDT, M. H. **Fisiologia Vegetal**. UFSM. 2015.

PHILIP, J. R. **Plant water relations: Some physical aspects**. Annu. Rev. Plant Physiol., Palo Alto. 1966.

RAVEN, P., Evert, R.; EICHHORN, S. **Biology of Plants**, 8ª Ed., W.H. Freeman and Company / Worth Publishers. 2013.

REICHARD, Klaus; TIMM, Luis Carlos. **Solo, planta e atmosfera: conceitos e aplicações**. Livro. 2ª Edição. Ed. Manole. 2012.

RODRIGUES, M. T. **ImageJ para microscopia**. Universidade Nacional Autónoma de México. Disponível em: <https://www.biomedicas.unam.mx/wp-content/pdf/unidad-de-microscopia/guia-de-imagej-para-microscopia.pdf?x21431> em dezembro de 2019.

SENTELHAS, Paulo Cesar. **Meteorologia Agrícola**. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce306/lce306.html> . Acesso em dezembro de 2019.

STAVRINIDOU, Eleni; GABRIELSSON, Roger; GOMEZ, Eliot, CRISPIN, Xavier; NILSSON Ove; SIMON, Daniel T.; BERGGREN, Magnus. **Electronic plants**. Research Article. 2015.

- SUN, Z.; JIN, X.; ALBERT, R.; ASSMANN, S.M. **Multi-level Modeling of Light-Induced Stomatal Opening Offers New Insights into Its Regulation by Drought**. PLoS Computational Biology. 2014.
- TAIZ, Lincon; ZEIGER, Eduardo. **Fisiologia Vegetal**, 6ª Edição- Porto Alegre. Artmed, 2017.
- TYREE M.; EWERS F. W. **The hydraulic architecture of trees and other wood plants**. Tansley Review, nº 34. New Phytol. 1991.
- UNESP. **Estereologia e materialografia quantitativa**. Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/aula8_cmm.pdf. Acesso em dezembro de 2019.
- VIEIRA, Elvis Lima; SOUZA G. S.; SANTOS A.R.; SILVA J.S. **Manual de Fisiologia Vegetal**. Livro. EDUMA. 2010.
- WEYERS, J.D.B.; MEIDNER H. **Methods in Stomatal Research**. Essex: Longman Scientific and Technical. 1990.
- 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. 2006.
- SIQUEIRA, Willany L. C. **Modelagem das vias de transporte hídrico da raiz em plantas vasculares – Análogo Elétrico**. Tese de Doutorado. PGFA, UFMT. 2014.
- SOURCEFORGE. Disponível em: <https://sourceforge.net/projects/qucs/?source=directory>. Acesso em novembro de 2019.
- THOMAZ, L. D.; SILVA, C. T. M.; DUTRA, S. S.; LORENCINI, T. S. **Morfologia vegetal - organografia**. Ed. UFES. UFES. 2009.
- VENKATESH B.; LAKSMAN N.; PURANDARA B.K.; REDDY V.B. **Analysis of observed soil moisture patterns under different land covers in Western Ghats, India**. Journal of Hydrology. 2011.