

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

DENILTON CARLOS GAIO

ORIENTADOR: PROF. DR. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. GEORGE LOUIS VOURLITIS

**ANÁLOGO ELÉTRICO DA DINÂMICA HÍDRICA EM
PLANTAS VASCULARES**

Cuiabá, MT, agosto de 2011.

DENILTON CARLOS GAIO

**ANÁLOGO ELÉTRICO DA DINÂMICA HÍDRICA EM
PLANTAS VASCULARES**

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. SÉRGIO ROBERTO DE PAULO

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. GEORGE LOUIS VOURLITS

Cuiabá, MT, agosto de 2011.

FICHA CATALOGRÁFICA

G143a Gaio, Denilton Carlos.

Análogo elétrico da dinâmica hídrica em plantas vasculares
/ Denilton Carlos Gaio. – 2011.

xvi, 86 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo.

Co-orientador: Prof. Dr. George Louis Vourlitis.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Mato Grosso,
Instituto de Física, Pós-graduação em Física Ambiental, 2011.

Bibliografia: f. 81-85.

Inclui apêndice.

1. Meio ambiente – Interação atmosfera-biosfera. 2. Dinâmica hídrica – Plantas. 3. Análogo elétrico – Dinâmica hídrica. 4. Oscilações estomáticas. I. Título.

CDU – 53:504

Ficha elaborada por: Rosângela Aparecida Vicente Söhn – CRB-1/931

Autorizo a reprodução deste trabalho

Cuiabá, 25 de agosto de 2011.

Denilton Carlos Gaio

DEDICATÓRIA

À Heloisa, amiga e companheira de todos os momentos, e aos nossos filhos, Otávio, Marina e Érico, que enriquecem nossas vidas de alegria.

IN MEMORIAN

A meus pais, Dahilton Gaio e Clarinda Gaio,
que me ensinaram o valor da vida, do trabalho e da família.

AGRADECIMENTOS

De maneira especial, agradeço a meu orientador Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo pela orientação sempre amiga traduzida em paciência em me ouvir, incentivo, apoio, confiança e entusiasmo com que conduziu este trabalho. Aproveito para dizer que é para mim uma alegria tê-lo como orientador e amigo.

Ao Prof. Dr. George Louis Vourlitis, meu coorientador pelas explicações e incentivo ao trabalho;

Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira pela confiança e apoio ao meu trabalho.

À Prof. Dra. Luciana Sanches pelas colaborações e amizade;

À Prof. Dra. Iramaia Jorge Cabral de Paulo pela amizade e suas contribuições na conclusão desta tese.

Aos membros da banca examinadora, professores Dr. Júlio César Hadler Neto e Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz pelos comentários e sugestões apresentadas com o objetivo de valorizar o trabalho.

Ao colega Geraldo pelo apoio no uso dos programas de simulação de circuitos elétricos;

À Nara pelo trabalho conjunto que possibilitou a conclusão deste curso;

Aos professores Dr. Carlo de Muis, Dr. Francisco Lobo, Dr. Geraldo Diniz e Dr. Campelo, do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, que, com dedicação, transmitiram seus conhecimentos.

Aos colegas de turma de doutoramento: Ângela, Caju, João Coelho, José Carlos, Luciane, Maricéia, Mariele, e Ojeda, pelo aprendizado conjunto, colaborativo;

Ao colega Jaison pelas boas conversas sobre o meu trabalho;

Aos Professores Dr. Osvaldo Pinto Júnior e Dr. Marcelo Bildes pela cessão de informações valiosas para esse trabalho e futuros;

A todos os colegas de curso pelos momentos de discussão sobre os mais diversos temas da Física Ambiental e pelos momentos de alegria no convívio;

À Soilce e ao Cesário pela colaboração nos serviços de secretaria, que nos auxiliou para o desenvolvimento deste trabalho;

À FAPEMAT pelo apoio financeiro ao Projeto de Pesquisa “Sistema de Modelagem da Interação Atmosfera-Biosfera da Região de Transição Amazônia-Cerrado” - processo nº 732233/2008, no qual esse trabalho está inserido.

À NATUREZA, divina, mágica, incomensurável que o homem insiste em mensurar para torná-la compreensível.

*O mundo não foi feito em alfabeto.
Senão que primeiro
em água e luz.
Depois árvore.*

Manoel de Barros, Poeta Mato-Grossense.

RESUMO

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

A analogia da dinâmica hídrica nas plantas à dos circuitos elétricos tem permitido a aplicação de princípios físicos básicos ao fluxo hídrico. A definição de resistência como uma constante de proporcionalidade entre a diferença de potencial hídrico e o fluxo de água é análoga a Lei de Ohm, na qual uma resistência elétrica constante é definida. Leis análogas de Kirchhoff das malhas e dos nós garantem a conservação de energia e o princípio de continuidade, respectivamente. Todavia, a observação da relação linear da transpiração foliar com a umidade do solo; de oscilações na abertura estomática e, conseqüentemente, na taxa de evapotranspiração, impõe a definição de novos dispositivos equivalentes, além de resistores, para elucidar sua dinâmica. Uma modelagem para a dinâmica hídrica, que contempla também a função capacitiva do circuito e a presença de transistores – é, neste trabalho, desenvolvida. Como consequência, é possível obter, com um sistema elétrico análogo ao contínuo Solo-Planta-Atmosfera, resultados similares aos do experimento de Denmead e Shaw e aos de Thornthwaite e Mather e observar oscilação do fluxo hídrico devido à existência de um oscilador astável. O trabalho tem sua importância no desenvolvimento de metodologia para o estudo da dinâmica hídrica nas plantas em que as propriedades dos fluxos são associadas a dispositivos, de modo a permitir o uso de programas sofisticados de análise de circuitos. Observa-se correspondência da modelagem pretendida com valores estimados ou medidos encontrados na literatura.

Palavras Chaves: Interação atmosfera-biosfera; dinâmica hídrica em plantas; análogo elétrico – dinâmica hídrica e oscilações estomáticas.

ABSTRACT

GAIO, D.C. **Analog electric water dynamics in vascular plants**. Cuiabá. 2011. 104 f. Doctoral Thesis (Environmental Physics), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

The analogy of water dynamics in plants to electric circuits has allowed the application of basic physical principles to the water flow. The definition of resistance as a constant of proportionality between the difference of water potential and water flow is analogous to Ohm's Law, in which an electrical resistance constant is defined. Similar to Kirchhoff's current and voltage laws guarantee the conservation of energy and the principle of continuity, respectively. Therefore, the observation of the linear relationship of leaf transpiration with soil moisture; oscillations in stomatal aperture and hence the rate of evapotranspiration, requires the definition of new equivalent devices, and resistors, to elucidate its dynamics. A model for water dynamics, which also includes the function of the capacitive circuit and the presence of transistors - is, in this work developed. As a result, you can get with an electrical analogue to the continuous Soil-Plant-Atmosphere, results similar to the experiment of Denmead and Shaw and of Thornthwaite and Mather and watch the water flow oscillation due to the existence of an astable oscillator modified with relaxation. The work is important in development of methodology for the study of water dynamics in plants in which the properties of the flows are associated with devices in order to allow the use of sophisticated programs for circuit analysis. There is correspondence the desired model with estimated or measured values in the literature.

Key Word: Atmosphere-biosphere interaction; water dynamics in plants; analogous electric - water dynamics e stomatal oscillations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço Hídrico do Solo.....	9
Figura 2 – Corte Transversal de uma Folha	11
Figura 3 – Fluxo de água devido aos gradientes de pressão hídrica.	12
Figura 4 – Esquema do modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado.....	13
Figura 5 – Taxa de Transpiração Real Diária em Função da Umidade do Solo.	15
Figura 6 – Planta com estruturas de transporte de água.....	16
Figura 7 – Esquema das vias de transporte de água na raiz.	17
Figura 8 - Micrografias da Raiz.	18
Figura 9 – Célula vegetal.	20
Figura 10 – Estômatos da epiderme abaxial do Buriti.	22
Figura 11 – Abertura estomática e teor de solutos.....	23
Figura 12 – Influência dos potenciais (ψ_{pg}) e (ψ_{pe}) sobre a abertura estomática.	24
Figura 13 – Oscilações do potencial da água e dos fluxos hídricos.....	25
Figura 14 – Análogo elétrico de uma planta com raízes em potencial zero.....	26
Figura 15 – Modelo para descrever e simular a regulação oscilatória da água.....	27
Figura 16 – Transistores NPN e PNP – diagrama de montagem e símbolo.....	28
Figura 17 – Visão convencional do ganho de um transistor NPN	28
Figura 18 - Oscilador de desvio de fase de rede progressiva de três estágios.....	29
Figura 19 – O potencial hídrico em um diagrama Entropia \times Volume.....	32
Figura 20 – Estrutura do circuito básico	33
Figura 21 - Símbolo do módulo do circuito básico da Figura 20.....	34
Figura 22 – Relatório de propriedades do subcircuito Exemplo.....	34
Figura 23 – Associações dos módulos em série e em paralelo	35
Figura 24 - Áreas de apresentação do esquemático	36
Figura 25 – Fontes de potencial.....	37
Figura 26 - Circuito básico modificado com um capacitor em série	37
Figura 27 – Esquemáticocom dois circuitos RC.....	38
Figura 28 – Fluxo medido e calculado no circuito RC	40
Figura 29 – Símbolos dos módulos.....	42
Figura 30 – Circuito Solo-Planta-Atmosfera	43
Figura 31 – Circuito do solo.	45
Figura 32 – Circuito do solo para uma simulação transiente	46
Figura 33 – Circuito da raiz	48
Figura 34 – Circuito da raiz para uma simulação transiente.....	50
Figura 35 – Acoplamento solo e parte subterrânea da planta até o colo da raiz	51
Figura 36 – Circuito do caule.....	52
Figura 37 – Circuito da folha.	55
Figura 38 – Simulação de regime transiente para a folha.	56
Figura 39 – Circuito do estômato.....	59
Figura 40 – Simulação transiente do circuito do estômato com V_g e V_e constantes.	60
Figura 41 – Simulação transiente do circuito do estômato com descarga de P_g	61
Figura 42 – Módulo atmosfera.....	62
Figura 43 – Simulação transiente do Modulo Atmosfera	63
Figura 44 – Circuito Chuva.....	65
Figura 45 – Esquema mínimo de controle de fluxo no SPA.....	66

Figura 46 – Fluxo Hídrico x Disponibilidade Hídrica	66
Figura 47 – Circuito SPA.....	67
Figura 48 – Gráfico transpiração versus quantidade de água no solo.....	69
Figura 49 – Simulação transiente do trabalho de Thornthwaite e Mather	70
Figura 50 – Transpiração foliar em função do Conteúdo de água no solo.....	71
Figura 51 – Conexão dos módulos chuva e solo.....	72
Figura 53 – Encapsulamento do subcircuito Planta	73
Figura 54 - Circuito de precipitação conectado ao contínuo solo-planta-atmosfera.....	74
Figura 55 – Oscilações diárias no potencial hídrico de componentes da planta.	75
Figura 56 – Oscilador Hídrico de Desvio de Fase de Rede Progressiva.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos solos segundo o diâmetro médio das partículas.	8
Tabela 2 – Umidade do solo em função do potencial hídrico.....	10
Tabela 3 – Valores de referência da razão de Bowen.	14
Tabela 4 – Avaliação da capacitância do caule de uma árvore.....	21
Tabela 5 – Grandezas Análogas entre o fluxo elétrico e o fluxo hídrico.....	31
Tabela 6 – Perfil do Potencial hídrico no SPA a 25°C.....	41
Tabela 7 – Cálculo das resistências do circuito principal por módulo.....	43
Tabela 8 – Potencial hídrico e concentração de vapor d'água, para o estômato.....	58
Tabela 9 – Estimativa da Resistência Estomática.....	58
Tabela 10 – Relação linear entre razão de Bowen e resistência atmosférica.....	62
Tabela 11 – Células de Chuva segundo o modelo BLPRM.....	64
Tabela 12 – Fluxo hídrico para dia seco e claro.....	68
Tabela 13 – Fluxo hídrico para dia úmido e encoberto.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Fórmula Química do Dióxido de Carbono
H ₂ O	Fórmula Química da Água
HF	Fórmula Química do Ácido Fluorídrico
HCl	Fórmula Química do Ácido Clorídrico
H ₂ S	Fórmula Química do Ácido Sulfídrico
NH ₃	Fórmula Química da Amônia
PH ₃	Fórmula Química da Fosfina
SPA	Contínuo Solo-Planta-Atmosfera
k	Condutividade hídrica
ψ	Potencial hídrico (MPa)
f	Fluxo hídrico (m ³ .s ⁻¹)
μ	Potencial químico da água
μ_0	Potencial químico da água pura à altura de referência
V_M	Volume parcial molar da água ($V_M=18,05 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ a 20°C e 1 atm)
U	Energia interna do sistema
S	Entropia do sistema
G	Energia livre de Gibbs
MPA	Megapascal
ψ_g	Potencial hídrico gravitacional
ψ_s	Potencial hídrico osmótico
ψ_p	Potencial hídrico de pressão hidrostática
ψ_m	Potencial hídrico matricial
ψ_v	Potencial hídrico de vapor
ψ_w	Potencial hídrico total
μ_w	Massa específica da água pura ($\mu_w= 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ a 20°C e 1 atm)
g	Campo gravitacional da Terra ($g = 9,81 \text{ N.kg}^{-1}$ ao nível do mar)
z	Altura de medida
z_0	Altura de referência
γ_s	Coefficiente de tensão superficial ($\gamma_s = 7,2 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ para a água)
A	Área de uma superfície (m ²)
R	Constante dos gases ou constante de Clayperon ($R= 8,32\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
T	Temperatura termodinâmica (K)
c_σ	Concentração de solutos
c_σ	Concentração de vapor d'água no ar

k_v	Condutividade hidráulica do vapor d'água ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$)
g_v	Condutividade hidráulica do vapor d'água ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
N	Número de partículas de um sistema
M	Massa molar da água ($M=18 \text{ g}$)
e	Pressão parcial de vapor d'água
e_s	Pressão parcial de saturação de vapor d'água
w_w	Massa de água contida em uma porção de solo
w_s	Massa de solo seco
w	Umidade relativa do solo
Z_r	Comprimento (na direção z) característico de raízes
q	Taxa de variação da quantidade de água em uma porção de solo
η	Porosidade do solo
V_p	Volume de ar que o solo completamente seco pode conter nos poros
V_s	Volume total de solo
P_p	Taxa de Precipitação (em mm)
I_n	Interceptação pela copa (em mm)
ϕ_{lat}	Vazão lateral em uma porção de solo
A_s	Águas superficiais sobre o solo
L_z	Perdas de água no solo por infiltração
E	Evaporação
ET	Evapotranspiração
Tr	Taxa de Transpiração diária ($\text{m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$)
ET_p	Evapotranspiração potencial
Ac	Quantidade de água acumulada no solo
Az	Variação máxima da umidade de solo
Lac	Perda acumulada potencial de água no solo
A	Taxa média de perda de água do solo no intervalo de tempo Δt
w_0	Umidade do solo no instante inicial, em cada ponto do perfil do solo
w_t	Umidade do solo no instante de tempo t , em cada ponto do perfil do solo
GV	Gradiente de tensão de vapor
DPD	Défice de tensão de difusão
GS	Gradiente de sucção
λ_p	Média da distribuição Poisson do início de cada evento de precipitação
η_p	Média da distribuição Poisson do início de cada célula de chuva
μ_p	Inverso da média da distribuição Poisson da largura de cada célula de chuva
Rn	Radiação solar líquida

LE	Fluxo de calor latente
H	Fluxo de calor sensível
FCS	Fluxo de calor do solo
P	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
β	Razão de Bowen
j	Taxa de precipitação diária em unidades de precipitação (mm.dia^{-1})
K^+	Íons Potássio
Cl^-	Íons Cloro
H^+	Próton
$H+ATPase$	Enzima da bomba iônica que atua no transporte de íons na membrana
ABA	Ácido Abscísico
ψ_{Pg}	Pressão de turgescência das células guarda
ψ_{Pe}	Pressão de turgescência das células epidérmicas
a_s	Abertura estomática
m	Vantagem mecânica da epiderme
A_p	Constante de proporcionalidade da abertura estomática
Ar	Razão de Antagonismo
Ao	Fase de tensão da abertura estomática
a_g	Coefficiente do potencial hídrico da célula guarda
a_e	Coefficiente do potencial hídrico da célula epidérmica
\dot{m}_1	Fluxo de massa através do ostíolo
\dot{m}_2	Taxa de variação de massa no interior da folha
\dot{m}_3	Taxa de variação de massa devido à transpiração foliar
Δ	Mudança osmótica induzida pela luz na célula guarda
α_i	Constantes análogas às resistências no modelo de Johnsson e Prytz
α_{ij}	Constantes análogas às frequências no modelo de Johnsson e Prytz
h	Função peso da equação não linear no modelo de Johnsson e Prytz
PNP	Transistor de junção de três camadas Positiva-Negativa-Positiva
NPN	Transistor de junção de três camadas Negativa-Positiva-Negativa
IB	Corrente da Base do transistor
IC	Corrente do Coletor do transistor
IE	Corrente do Emissor do transistor
β_T	Ganho do transistor
RC	Associação de Resistor e Capacitor
φ_i	Potencial hídrico definido no componente i do SPA
R_i	Resistência ao fluxo hídrico no componente i do SPA.

C_i	Capacitância do componente i do SPA.
W_i	Volume de água armazenada no componente i do SPA
R_{eq}	Resistência ao fluxo hídrico equivalente no SAP
R_{sl}	Resistência ao fluxo hídrico no solo
R_{rz}	Resistência ao fluxo hídrico na raiz
R_{cl}	Resistência ao fluxo hídrico no caule
R_{fl}	Resistência ao fluxo hídrico nas folhas
R_{cf}	Resistência ao fluxo hídrico na camada limite foliar
R_{cortex}	Resistência ao fluxo hídrico no córtex
R_{sim}	Resistência ao fluxo hídrico na via simplástica do córtex
R_{apo}	Resistência ao fluxo hídrico na via apoplástica do córtex
Pa	Pascal
QUCS	<i>Quite Universal Circuits Simulation</i> Simulador de Circuitos Totalmente Universal
GUI	<i>General User Interface</i> – Interface Geral para Usuários
GPL	<i>General Public License</i> – Licença Pública Geral
Qt	Conjunto de Ferramentas para Interface Gráfica GUI
Spice	<i>Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis</i> Programa de simulação com ênfase em circuitos integrados.
$f_{entrada}$	Fluxo hídrico de entrada no componente do circuito
$f_{saída}$	Fluxo hídrico de saída no componente do circuito
$f_{armazenagem}$	Fluxo de armazenagem de água no componente do circuito
$P_{entrada}$	Ponto de entrada do fluxo hídrico
$P_{saída}$	Ponto de saída do fluxo hídrico
P_{sonda}	Ponto de sondagem da quantidade de água no capacitor do componente
$R_{potencial}$	Resistência ao fluxo relativa à diferença de potencial hídrico no componente
$R_{capacitor}$	Resistência ao fluxo de armazenagem no capacitor do componente
$D_{sentido}$	Diodo determinando o sentido do fluxo hídrico
τ	Tempo característico de circuito Resistivo-Capacitivo
$\rho_{água}$	Massa específica da água (10^3 kg.m^3)

Observação: Os símbolos específicos utilizados para cada circuito dos módulos de modelagem dos componentes do contínuo solo-planta-atmosfera estão descritos nos relatórios de parâmetros conexos aos circuitos.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. POTENCIAL HÍDRICO.....	5
2.2. ÁGUA NO SOLO.....	8
2.3. TEORIA TENSÃO-COESÃO.....	11
2.4. PRECIPITAÇÃO.....	13
2.5. ATMOSFERA	13
2.6. ANATOMIA VEGETAL DA ASCENSÃO DE ÁGUA.....	16
2.7. OSCILAÇÕES ESTOMÁTICAS.....	25
2.8. OSCILAÇÕES EM CIRCUITOS ELÉTRICOS	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. LEIS DE KIRCHHOFF	30
3.2. O ANÁLOGO ELÉTRICO BÁSICO	32
3.3. SIMULADORES DE CIRCUITO.....	35
3.4. CIRCUITOS RC.....	38
3.5. VALORES REPRESENTATIVOS.....	40
4. RESULTADOS	42
4.1. MÓDULOS.....	42
4.1.1. SOLO	45
4.1.2. RAIZ	47
4.1.3. CAULE	52
4.1.4. FOLHA	53
4.1.5. ESTÔMATO.....	57
4.1.6. ATMOSFERA	61
4.1.7. PRECIPITAÇÃO.....	64
4.2. TRANSPIRAÇÃO FOLIAR	66
4.3. UMIDADE DO SOLO	70
4.4. BALANÇO HÍDRICO	71
4.5. RADIAÇÃO SOLAR	74
4.6. OSCILAÇÕES ESTOMÁTICAS.....	76
5. CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICE A – CONDUTIVIDADE DO SOLO.....	86

1. INTRODUÇÃO

O gás carbônico, ingrediente fundamental para a vida vegetal, flui da atmosfera para as células responsáveis pela fotossíntese, através dos estômatos, estruturas encontradas nos tecidos verdes. Quando essas estruturas estão abertas, flui CO_2 em direção aos cloroplastos, onde se processa a fotossíntese. Todavia, a entrada de CO_2 implica na perda de água. Assim, minimizar as perdas de água e, ao mesmo tempo, maximizar a captura de dióxido de carbono é o desafio que as plantas enfrentam a partir de um sofisticado controle da abertura estomática. O desafio da pesquisa nessa área, por seu turno, é descrever a complexa dinâmica estomática considerando o grande número de variáveis e mecanismos que influenciam o processo.

Depois de extraída do solo pelas plantas, a água ascende até a copa e flui em proporção à demanda evaporativa da atmosfera. As condições meteorológicas em que, principalmente, a parte aérea está sujeita – temperatura, pressão de vapor na camada de ar junto às folhas, balanço da radiação solar, velocidade do vento sobre o dossel (JARVIS e DAVIES, 1997) – e as características do solo (HARRIS et al, 2004) são fatores exógenos importantes, além da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e da diferença de concentração de CO_2 entre as atmosferas intra e extrafoliar.

O controle é ainda mais sofisticado quando há restrição hídrica: a presença de hormônios vindos da raiz e a retroalimentação positiva das células epidérmicas vizinhas às células do complexo estomático são exemplos de fatores importantes que devem ser agregados ao estudo.

Uma forma de estudar o problema é ocultar sua complexidade. A análise do processo é simplificada com a aplicação de expressão linear para a resistência ao fluxo de água, em analogia à definição de resistência elétrica, de modo a se considerar as inter-relações dos diversos componentes do contínuo Solo-Planta-Atmosfera (PHILIP, 1966). Assim, a resistência de uma planta ao fluxo de água desde o solo até a atmosfera é dada por $T = \Delta\psi/R$, em que T é a transpiração da planta e $\Delta\psi$ é a diferença de potencial hídrico entre o solo e a atmosfera. A expressão é conhecida como “análoga à Lei de Ohm” para a transpiração, apesar de a resistência ao fluxo ser obviamente uma variável. Resumidamente, a quantidade de água transpirada pela planta depende de fatores

exógenos e endógenos acoplados, representados, simplificada, pelas grandezas: diferença de potencial hídrico e resistência ao fluxo de água.

O fluxo contínuo de água inicia-se no solo, de modo que o balanço hídrico permite estimar a quantidade de água evapotranspirada a partir do armazenamento de água no solo e dos fluxos de entrada e saída, isto é, precipitações, descontadas as águas interceptadas, de superfície e infiltração. Por outro lado, considerando que a água transpirada muda de estado de líquido para gasoso e consome uma parcela da energia líquida disponível, é possível também se estimar a evapotranspiração utilizando-se o princípio de conservação de energia ao se aplicar, por exemplo, a razão de Bowen (1926 apud VILLA NOVA, 1973).

Quando não há restrição hídrica, a principal variável na determinação da abertura dos estômatos é a taxa de radiação solar. O grau de turgescência das células guarda depende da concentração de solutos no citosol, a qual esta associada à incidência da radiação solar. A transpiração foliar e o fluxo de CO_2 estão, portanto, fortemente associados ao ciclo sinusoidal, como indicado na dissertação de mestrado de Galon (2005): “a radiação solar incidente (R_n) e a dinâmica estomatal são variáveis de fundamental importância” para a descrição do fluxo líquido de CO_2 .

No entanto, a aplicação do método de espectro de potências para séries históricas de fluxos de calor latente obtidas no Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental apresentaram períodos na ordem de 1,14 hora; 1,28 hora; 1,33 hora e 1,38 hora (MARIANO, 2008). O interesse do estudo da dinâmica estomática, em particular, surgiu na busca das razões para essas frequências dominantes.

No caminho desta pesquisa encontram-se descrições de oscilações na abertura estomática da ordem de 1 hora, em ambiente controlado ou não. Essas oscilações podem ser produzidas, por exemplo, ao se submeter a planta a intervalos periódicos de luz e sombra (LANG et al, 1969) ou a perturbações no valor da pressão de vapor da atmosfera adjunta à superfície foliar (FARQUHAR e COWAN, 1974).

Não há ainda um modelo definitivo para a oscilação estomática. Cowan (1972b) sugere, de um ponto de vista conceitual, uma analogia com circuitos elétricos com um número maior de componentes, sem introduzir, no entanto, funções capacitivas relativas ao armazenamento de água na planta. Uma modelagem para a dinâmica hídrica, que contempla também a função capacitiva

do circuito foi proposta por Johnsson e Prytz (2002). Os autores propõe uma função não linear para o fluxo de água armazenada com a resistência estomática. Se, por um lado, há compromisso da descrição com características fisiológicas da planta, por outro, parece não haver com o próprio análogo elétrico proposto.

O caráter sistêmico do fluxo hídrico se impôs: houve de se considerar o comportamento do solo de armazenamento de água, dos vasos do xilema, do forte poder evaporativo da atmosfera. Uma relação importante, que norteou parte desse trabalho, é a estabelecida entre transpiração foliar e umidade do solo. Procurou-se assim, estabelecer uma analogia com a estrutura da planta e, com o próprio método experimental de Denmead e Shaw (1962), de modo a comparar os resultados.

O comportamento resistivo próprio do ostíolo estomático é dependente do potencial hidrostático das células guarda. A resistência do circuito é controlada por um sinal, a modelagem dessa função como transistor parece, portanto, adequada. O conjunto de componentes (resistor, capacitor e transistor) permite a construção de osciladores (BAKSHI e GODSE, 2009), que modificados, dão conta de descrever as retroalimentações entre as células estomáticas e epidérmicas. O sistema apresentou oscilação do fluxo hídrico com relaxação conforme indicava a literatura.

Estabeleceu-se assim, um protocolo de modelagem que permite acoplar os diferentes tempos característicos dos circuitos hídricos resistivo-capacitivos do fluxo e armazenamento de água em cada célula, tecido ou órgão da planta; da diversidade espacial de solo e de sua cobertura; que admite também estabelecer regras de controle sobre esses tempos característicos pela própria planta a partir de resistências de transferência. Assim, este trabalho, do ponto de vista teórico, estende a analogia com os sistemas elétricos e procura associar equivalentes elétricos às funções da fisiologia vegetal responsáveis pelo fluxo hídrico. A metodologia proposta, dessa forma, permite estabelecer também um procedimento análogo ao experimental.

Na revisão bibliográfica, as relações hídricas nos diversos meios por onde a água passa no contínuo solo-planta-atmosfera (SPA) são descritas de modo a se estabelecer, na metodologia, relações análogas com sistemas elétricos. Nisto reside o foco deste trabalho: desenvolver metodologia para o estudo da dinâmica hídrica nas plantas em que as propriedades dos fluxos são associadas a dispositivos, de modo a permitir o uso de programas sofisticados que resolvem

complexos e extensos problemas de análise de circuitos, ou por outra, complexos e extensos sistemas de equações acopladas. Os resultados obtidos mostram a potencialidade da metodologia e estendem o horizonte de sua aplicação.

OBJETIVO GERAL:

Construir uma estrutura formal, para o estudo da dinâmica hídrica em plantas vasculares, análoga à eletricidade.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

FORMULAÇÃO “A PRIORI” DO MODELO

1. Determinar as quantidades necessárias e suficientes para a dinâmica hídrica, dentro de um extenso número de variáveis;
2. Utilizar simuladores para análise de circuitos

FORMULAÇÃO “A POSTERIORI” DO MODELO

Reproduzir resultados experimentais, como por exemplo, da Experiência de Denmead e Shaw, do balanço hídrico e das oscilações estomáticas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. POTENCIAL HÍDRICO

A água é um composto simples, abundante na superfície terrestre e capital para a existência da vida. Por ser uma molécula polar é solvente de sais iônicos – presentes no solo e importantes para a nutrição mineral – bem como de compostos polares orgânicos, como a glicose. Ligações intermoleculares relativamente fortes entre o hidrogênio e o oxigênio, chamadas pontes de hidrogênio, permitem que a água seja uma substância líquida a temperaturas e pressões ambientais, diferentemente de compostos análogos do hidrogênio com os vizinhos do oxigênio na tabela periódica (HF, HCl, H₂S, NH₃ e PH₃): todos gasosos.

São também as pontes de hidrogênio que permitem, no SPA, o fluxo hídrico contínuo, isto é, sem a quebra da coluna de água no xilema, mesmo sob fortes diferenças de pressão entre a atmosfera exterior às folhas e o solo (da ordem de -100 MPa). De maneira análoga ao que acontece em dispositivos elétricos, o fluxo hídrico, f (em m³.s⁻¹), através do SPA é proporcional à diferença de potencial hídrico:

$$f = -k \Delta\psi \quad (1)$$

A condutividade hídrica, k , é a constante de proporcionalidade entre o fluxo e o potencial hídrico, definido como o potencial químico da água por unidade volumétrica molal:

$$\psi = \frac{\mu - \mu_0}{V_M} \quad (2)$$

A quantidade μ é o potencial químico da água no estado considerado, enquanto que μ_0 é o potencial químico da água pura à altura de referência (z_0) e V_M é o volume parcial molal da água pura.

Seja ΔU a variação da energia interna ocorrida em um sistema constituído de um único componente (isto é, um único tipo de partícula, por exemplo, molécula de água) que sofreu um processo isentrópico (entropia constante) e isocórico (volume constante), a partir do estado de referência, mantendo constante o número de partículas do sistema. Nesse processo, o potencial químico do sistema é a energia interna por partícula:

$$\mu(S, V) = U(S, V, N)/N \quad (3)$$

Para processos espontâneos em que a temperatura e a pressão sejam variáveis de melhor acesso experimental, o potencial hídrico pode ser obtido a partir da energia livre de Gibbs. Para um sistema com um único componente, tem-se que “o potencial químico como função da temperatura e da pressão é a energia livre de Gibbs por partícula” (SALINAS, 2005):

$$\mu(T, p) = \frac{G(T, p, N)}{N} \quad (4)$$

Como consequência, o potencial hídrico é uma variável que descreve o estado energético do sistema, em unidades de densidade volumétrica de energia, ou, equivalentemente, em unidades de pressão. O valor de referência é zero, quando a água está disponível em grandes quantidades na altura de referência ($\psi(\mu_0) = 0$), diminuindo com sua escassez, o que indica o sentido dos fluxos hídricos nas plantas, contrário ao gradiente do potencial hídrico (sinal negativo na Equação (1)).

Os principais componentes do potencial hídrico em um sistema vegetal são: gravitacional (ψ_g); osmótico ou de soluto (ψ_s); de pressão hidrostática (ψ_p); matricial (ψ_m) e de vapor (ψ_v).

$$\psi_w = \psi_g + \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_v \quad (5)$$

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 .

$$\psi_g = \frac{Mgz}{V_M} = \mu_w gz \quad (6)$$

Nessa expressão, M é a massa molar da água, g é o campo gravitacional da Terra e μ_w é a massa específica da água.

Potencial hídrico matricial

No interior de um volume de água, as pontes de hidrogênio aparecem em todas as direções. Na interface entre água e ar, as pontes de hidrogênio localizam-se apenas sobre a superfície, o que adensa as ligações entre as moléculas de água, dificultando seu rompimento.

O coeficiente de tensão superficial (γ_s) é o trabalho máximo (até o rompimento da superfície), por unidade de área, realizado na interface líquido/ar,

o que resulta na expressão para a variação da energia livre de Gibbs (KIRKHAM, 2005): $\Delta G = \gamma_s \Delta A$. Nessa expressão, ΔA é a variação da área da superfície devida à aplicação da força contra a tensão superficial (ADAMSON, A.W. e GAST, A. P., 1997).

Nas plantas, aparece, por exemplo, em vasos capilares e paredes celulares. No solo surge devido à adesão da água ao ar contido nos poros e, em menor grau, às superfícies dos grãos constituintes (capilaridade do solo).

Potencial hídrico osmótico ou de soluto

Misturar duas substâncias miscíveis para produzir uma solução homogênea é um processo irreversível. Conclui-se, portanto, que ocorre nesse processo aumento da entropia ou, equivalentemente, abaixamento do potencial hídrico do sistema.

O termo osmótico pode ser estimado pela equação de van't Hoff

$$\psi_s = -RTc_\sigma, \quad (7)$$

na qual R é a constante dos gases, c_σ é a concentração de soluto na solução, expressa em osmolalidade (mol por litro) e T é a temperatura absoluta do sistema. Quanto maior a dissolução de solutos maior será a redução do potencial hídrico. Tal situação acontece, por exemplo, no interior dos cloroplastos com a produção da sacarose.

Pressão hidrostática

A diferença de potencial hídrico osmótico entre uma célula e seu exterior pode causar um intenso fluxo hídrico para o interior da célula de modo que esta fica túrgida. As paredes celulares resistem ao estiramento mecânico, especialmente quando há espessamento da parede secundária.

A pressão hidrostática que as paredes celulares aplicam sobre a água no interior da célula é positiva (pressão de turgescência), isto é, a pressão hidrostática no interior da célula é maior que no seu exterior.

Potencial hídrico na fase gasosa

Nos locais em que a água está em fase gasosa dissolvida no ar – por exemplo, na câmara subestomática –, o potencial hídrico depende da umidade relativa do ar (UR), isto é, da razão entre o quanto de água contém o ar e o quanto de água poderá conter o ar quando saturado, na temperatura dada.

$$\psi_v = \frac{RT}{V_M} \ln\left(\frac{UR\%}{100}\right) \quad (8)$$

Ao se aplicar a lei de Fick, o fluxo de vapor d'água pode ser estimado em função do gradiente da concentração de vapor d'água e do gradiente de potencial hídrico (NOBEL, 2009: 377-380): $f = g_v V_m \Delta c_v = k_v \Delta \psi$. As quantidades $\Delta \psi_v$ e Δc_v são as diferenças de potencial hídrico e concentração de vapor d'água no ar entre dois pontos considerados; g_v e k_v são condutividades hidráulica do ar para o vapor d'água em unidades de ($\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) e ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$) respectivamente. A relação entre as condutividades será:

$$k_v = \frac{\Delta c_v}{\Delta \psi_v} g_v V_m \quad (9)$$

Considera-se o volume molar para o vapor d'água constante, por exemplo, nas condições normais de temperatura (273,15K) e pressão (1 atm = 0,101 MPa), o volume de vapor d'água será $0,0224 \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$.

2.2. ÁGUA NO SOLO

O solo, camada mais superficial da crosta terrestre e substrato das raízes, possui composição diversificada de minerais e matéria orgânica, além de água e ar. A sua mais simples classificação considera somente o tamanho dos grãos (Tabela 1). Classificações mais complexas consideram a textura do solo, estrutura, composição química e conteúdo de matéria orgânica, além da plasticidade. A textura é a descrição da mistura dos diferentes grãos, enquanto a estrutura, determinada pela orientação dos grãos, refere-se à capacidade das pequenas partículas preencherem os poros deixados pelas partículas maiores, o que confere ao solo a capacidade de transferência de estresse mecânico e de armazenamento de água (VERRUIJT, 2010:13 e 49).

Solo	Diâmetros médios	k (s m^{-1})
Argila	0 a 2 μm	10^{-10} a 10^{-8}
Silte	2 a 63 μm	10^{-8} a 10^{-6}
Areia	63 μm a 2 mm	10^{-6} a 10^{-3}
Cascalho	2 a 63 mm	10^{-3} a 10^{-1}

Tabela 1 – Classificação dos solos segundo o diâmetro médio das partículas. A coluna k apresenta os intervalos de valores da condutividade hidráulica para os diferentes tamanhos de grãos, em segundos por metro. Observa-se o aumento da condutividade com o aumento do diâmetro da partícula.

Fonte: Verruijt, 2010, páginas 13 e 49.

A razão entre o volume de ar que o solo completamente seco pode conter nos poros entre os grãos (V_p) e o volume total de solo (V_s) é um importante parâmetro, chamado porosidade, $\eta = V_p/V_s$. A razão entre as massas de água (w_w) e de solo seco (w_s), contidas na porção de solo considerada é a umidade relativa, $w = w_w/w_s$.

A taxa de variação da quantidade de água em uma porção de solo, q , em unidades equivalentes de precipitação (milímetros por dia, por exemplo) é dada por: $q = \eta \frac{dw}{dt} Z_r$, tal que Z_r é o comprimento (na direção z) característico das raízes contidas nessa porção de solo.

Balanco hídrico (Figura 1) é a contabilidade de água no solo.

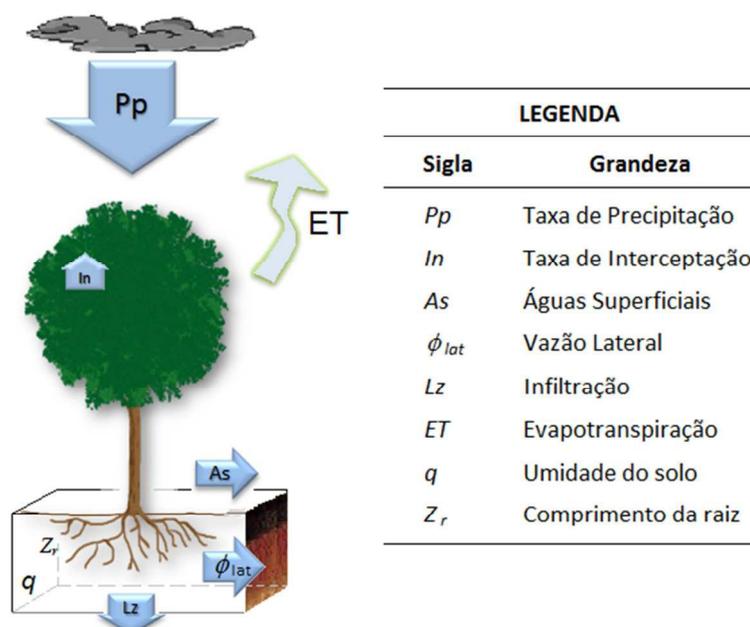


Figura 1 – Balanço Hídrico do Solo

Os fluxos, apresentados com seus respectivos sentidos, alteram umidade do solo (q). A taxa de precipitação (Pp) contribui com o aumento de q ; as taxas de interceptação das folhas (In) e águas superficiais (As) reduzem a quantidade de água que penetra na porção de solo em que se localizam as raízes com comprimento (Z_r); a infiltração para camadas de solo abaixo da região em que estão as raízes (Lz), a evapotranspiração (ET) e a vazão lateral (ϕ_{lat}) são as saídas de água da porção de solo considerada.

Fonte: Adaptada de Laio et al., 1969.

A conservação de massa (ou de volume de água) garante que q seja dada pelo somatório dos fluxos de (e para) essa parcela de solo:

$$q = Pp(t) - In(t) + \phi_{lat}(w, t) - As(w, t) - Lz(w, t) - ET(w, t) \quad (10)$$

Nessa expressão, todas as quantidades – com exceção das taxas de precipitação, $Pp(t)$, e de interceptação da copa, $In(t)$ – dependem, como denota a expressão, da umidade relativa do solo (LAIO et al., 1969). No escopo deste

trabalho, o solo é plano e horizontal de modo que as perdas devidas a águas superficiais, $As(w, t)$, serão desconsideradas. Consideraremos, por simplicidade, um solo homogêneo, com gradientes horizontais nulos do potencial hídrico, de modo que a vazão lateral nas fronteiras, $\phi_{lat}(w, t)$, será considerada nula. Os outros termos referem-se a fluxos para o exterior da parcela de solo: a infiltração no solo na direção vertical, $Lz(w, t)$; e a evapotranspiração, $ET(w, t)$, resultante da evaporação do solo, a qual, é claro, depende também da cobertura vegetal e da transpiração foliar das plantas cujas raízes estão contidas nessa porção de solo.

$$q = Pp(t) - In(t) - Lz(w, t) - ET(w, t) \quad (11)$$

Após uma rega ou precipitação intensa, em que o solo fica saturado, o fluxo hídrico atinge um regime estacionário (fluxo constante e vertical, em direção ao lençol freático, devido à gravidade). Em pouco tempo, o potencial hídrico do solo cai de zero para $-0,2$ MPa e a quantidade de água no solo preenche, entre 40 e 60% do volume dos poros entre as partículas (Tabela 2).

Situação do solo	ψ (MPa)	w
Logo após precipitação	$\psi_1 = -0,2$	35%
Longo período sem precipitação	$\psi_0 = -1,5$	12%

Tabela 2 – Umidade do solo em função do potencial hídrico
Valores da umidade do solo em função do potencial hídrico para um solo argiloso.
Fonte: Nobel, 2009

Na vizinhança das raízes esse conteúdo fica entre 8 e 30%. O restante dos poros é preenchido por ar. Há, portanto, um número considerável de interfaces ar-água (NOBEL, 2009). Quanto maior o número de pequenos poros, maior a adesão da água ao ar contido nessas câmaras. Assim, com a diminuição da quantidade de água no solo, menor é o potencial hídrico da água contida. Valores representativos para um solo argiloso estão expressos na Tabela 2.

A partir da hipótese fundamental do método de Thornthwaite e Mather (1955 apud DOURADO-NETO et all, 2010) é possível se obter a expressão para a quantidade de água acumulada no solo (Ac) como uma função do tempo.

$$Ac(t) = Az e^{-\Lambda t} \quad (12)$$

A quantidade Az é calculada sobre todo o perfil do solo até o comprimento efetivo da raiz (Z_r): $Az = \int_0^{Z_r} (w_0 - w_t) dz = Ac(0)$. Em cada ponto do perfil, w_0 e w_t são os respectivos valores da umidade do solo para os instantes de tempo $t=0$ e t : valores máximos e mínimos no período, respectivamente. Az , portanto, é a variação máxima da umidade de solo no período; Lac é a perda

acumulada potencial dada pela diferença entre a evapotranspiração e a precipitação efetiva [$Lac = ET - (Pp - In)$]. A constante Λ é a taxa média da perda de água no intervalo de tempo considerado: $\Lambda = \frac{Lac}{\Delta t}$.

2.3. TEORIA TENSÃO-COESÃO

Atribuída à Dixon e Joly (1894 apud ZWEIFEL et al., 2007), a Teoria Tensão-Coesão é o modelo mais aceito para o transporte de água através do xilema. Esse modelo atribui à forte tensão, que a água é submetida desde a copa até a raiz, o motor do movimento ascendente de água e credita às forças de coesão entre as moléculas de água (devido às pontes de hidrogênio), a continuidade do fluxo. Essa tensão tem início na transpiração foliar. Esquemáticamente, o corte transversal de uma folha (Figura 2) mostra, entre as células do mesófilo, a cavidade subestomática. Nessa câmara, a água, em contato com o ar, muda de fase de líquida para vapor saturando a atmosfera da câmara subestomática.

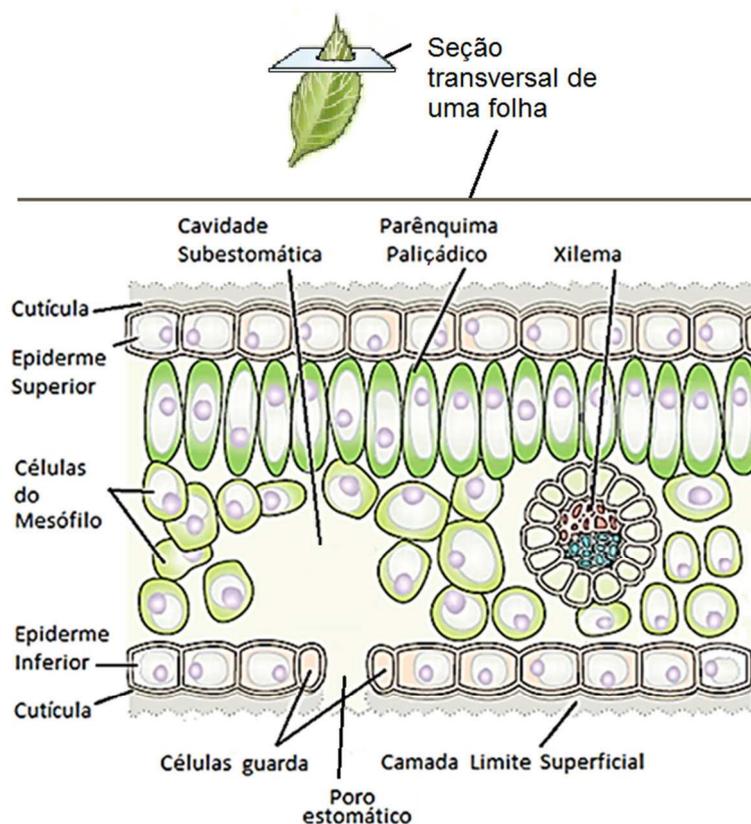


Figura 2 – Corte Transversal de uma Folha.

Apresentam-se os tecidos clorofilados do mesófilo (parênquima paliçádico e esponjoso), um corte do xilema e as epidermes inferior e superior cobertas pela cutícula; além desta está a camada limite superficial. Em destaque, aparece o estômato, esquematicamente aqui composto pelas células guarda, o poro estomático e a cavidade subestomática.

Fonte: Taiz e Zeiger (1998).

Nesse estudo, o ar atmosférico é considerado um gás ideal, no qual o vapor d'água se dissolve. Estimativas de umidade relativa exatamente sobre o estômato, dentro e fora da folha, de 60% e 50%, respectivamente, fornecem diferença de potencial hídrico de aproximadamente 25 atmosferas de pressão. Instaura-se, assim, um gradiente de tensão de vapor que aponta na direção do interior à folha. O fluxo, com sentido sempre contrário ao do gradiente, é denotado por GV na Figura 3.

A saída de vapor d'água pelo ostíolo faz com que outras moléculas de água passem ao estado de vapor de modo a se manter a tensão de vapor muito próxima a de saturação no interior da cavidade subestomática.

A água flui do xilema para a folha e cria um déficit de pressão de difusão, que faz fluir a água da raiz para o xilema. Na Figura 3, o fluxo relativo ao déficit de pressão de difusão é denotado por DPD.

Finalmente, na Figura 3, GS indica o fluxo relativo ao gradiente de sucção, que se instaura entre o solo e a raiz e faz fluir água para essa.

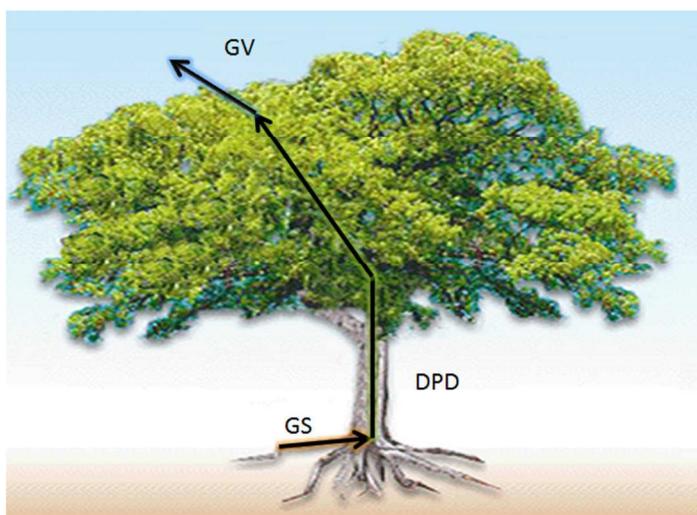


Figura 3 – Fluxo de água devido aos gradientes de pressão hídrica. As siglas referem-se aos fluxos hídricos (indicados por flechas) com respeito a cada gradiente de potencial hídrico: GV – devido ao gradiente de vapor d'água; DPD – devido ao déficit de pressão de difusão e GS – devido ao gradiente de sucção.

Da conservação de massa, os fluxos são todos iguais a quantidade de água transpirada, descontada a taxa de armazenamento em cada ponta da estrutura da planta. A evolução dotou as plantas com um mecanismo para minimizar a perda de água, quando há escassez de água no solo: fechar as saídas e conseqüentemente, reduzir o bombeamento. A epiderme, coberta pela cutícula, é muito pouco permeável à água, de modo que a transpiração reduz-se fortemente quando os estômatos estão fechados.

2.4. PRECIPITAÇÃO

A resposta da vegetação (resistência à seca, produtividade etc.) está fortemente interligada à intermitência e a imprevisibilidade da disponibilidade das chuvas (NOY-MEIR, 1973 apud LAIO et al., 2001). A ocorrência e a quantidade de água em cada um dos eventos de precipitação são variáveis estocásticas.

O modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (RODRIGUEZ-ITURBE et al., 1987, apud DAMÉ et al., 2007) apresenta eventos de precipitação modelados por um ou mais pulsos retangulares, chamados células de chuva (Figura 4). O início de cada evento de precipitação, o início de cada célula de chuva, a altura e a largura das células de chuva seguem distribuições de Poisson com médias λ_p , η_p , μ_p e $(\mu_p)^{-1}$.

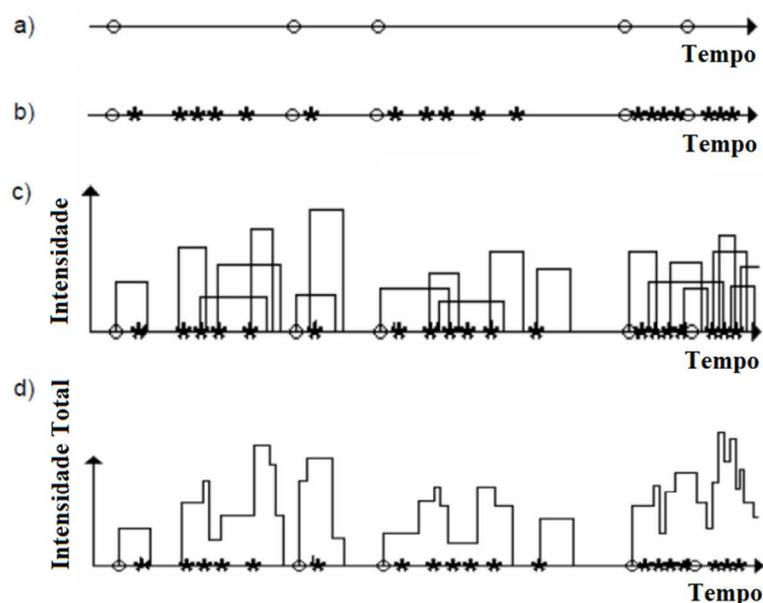


Figura 4 – Esquema do modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado. Passos da construção da distribuição das chuvas: (a) início de cada evento de precipitação; (b) início de cada célula de chuva; (c) altura e largura das células de chuva; (d) Intensidade total resulta da soma das intensidades individuais.

Fonte: DAMÉ et al., 2007

2.5. ATMOSFERA

A quantidade de água evapotranspirada por uma superfície vegetada pode ser estimada a partir do princípio de conservação de energia. O fluxo de calor latente necessário à evapotranspiração é limitado e obedece ao balanço de energia:

$$Rn = LE + H + FCS + P \quad (13)$$

O saldo de radiação, R_n , é particionado em fluxo de calor latente (LE), de calor sensível (H), de calor no solo (FCS) e fotossíntese (P). A mudança de fase da água no curso da evapotranspiração utiliza, por exemplo à temperatura de 20°C, 2452 Joules por grama de água, ocasionando o arrefecimento das folhas com a transpiração. Do fluxo de calor latente em Watt por metro quadrado resulta (ET) em gramas de água evapotranspirada por metro quadrado por segundo. Dessa forma, a quantidade de água evapotranspirada à 20°C, em gramas será:

$$ET = \frac{LE}{2452} \quad (14)$$

Para temperaturas maiores, quantidades menores de energia são necessárias para a mudança de fase da água, resultando em maiores quantidades de água evapotranspirada para o mesmo fluxo de calor latente.

Bowen foi um dos pioneiros no estudo do balanço de energia sobre uma superfície em ambientes naturais. A energia disponível ($R_n - G - P$) sobre uma superfície de água, durante o processo de evaporação, é particionada nos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) emitidos pela superfície. A razão entre os fluxos é chamada Razão de Bowen ($\beta = H/LE$). A Tabela 3 apresenta alguns valores de referência constantes na literatura. O uso da razão de Bowen permite estabelecer padrões qualitativos de análise das condições ambientais com respeito à partição da energia líquida disponível. Quando o ambiente apresenta restrições hídricas para a planta, por exemplo, a razão de Bowen é maior que um, isto é, o calor sensível é maior que o calor latente, pois o saldo de radiação está sendo utilizado para o aquecimento do ar. Valores negativos indicam fluxos de calor sensível e latente em sentidos contrários.

Razão de Bowen	Condições Ambientais	Referência
$\beta > 0$	Ambos os fluxos possuem o mesmo sentido: (i) Superfície mais quente e úmida que o ar; (ii) Superfície mais fria e seca que o ar.	Bildes (2008)
$\beta > 1$	Restrições hídricas..	Betts et al. (2007)
$0,1 < \beta < 1,5$	Condições secas em floresta de coníferas.	Padrões propostos por
$-0,7 < \beta < 0,4$	Condições úmidas em floresta de coníferas.	Jarvis et al. (1976)
	Valores médios diários em floresta boreal:	
$\beta = 0,85$	(i) Dias sem precipitação;	Betts et al. (2007)
$\beta = 0,4$	(ii) Dias em que ocorreu precipitação.	
$\beta \cong 0$	Após irrigação;	Em cultura de feijão.
$\beta = 0,45$	Aumento devido redução da umidade do solo.	Betts et al. (2007)

Tabela 3 – Valores de referência da razão de Bowen.

Os valores da razão de Bowen ($\beta = H/LE$) dependem das condições atmosféricas e de umidade no solo. Quanto maiores as restrições hídricas, mais alta será a razão de Bowen.

Fonte: Betts et al.(2007), Jarvis et al.(1976) e Bildes (2008)

Trabalho experimental importante foi realizado por Denmead e Shaw (1962) em que os autores investigaram como a taxa de transpiração real é influenciada pela combinação da umidade do solo e das condições atmosféricas. O método consistiu em manter constante a quantidade de água no solo de contêineres, onde estavam plantados pés de milho. Mediu-se a transpiração real diária. Três dias com condições ambientais diferentes estão descritos no gráfico da Figura 5, em que cada contêiner fornece um ponto para dia seco e úmido (30 de julho); um triângulo para dia úmido e parcialmente encoberto (13 de agosto) e um círculo para dia úmido e chuvoso (5 de agosto). As curvas são ajustes desses dados experimentais.

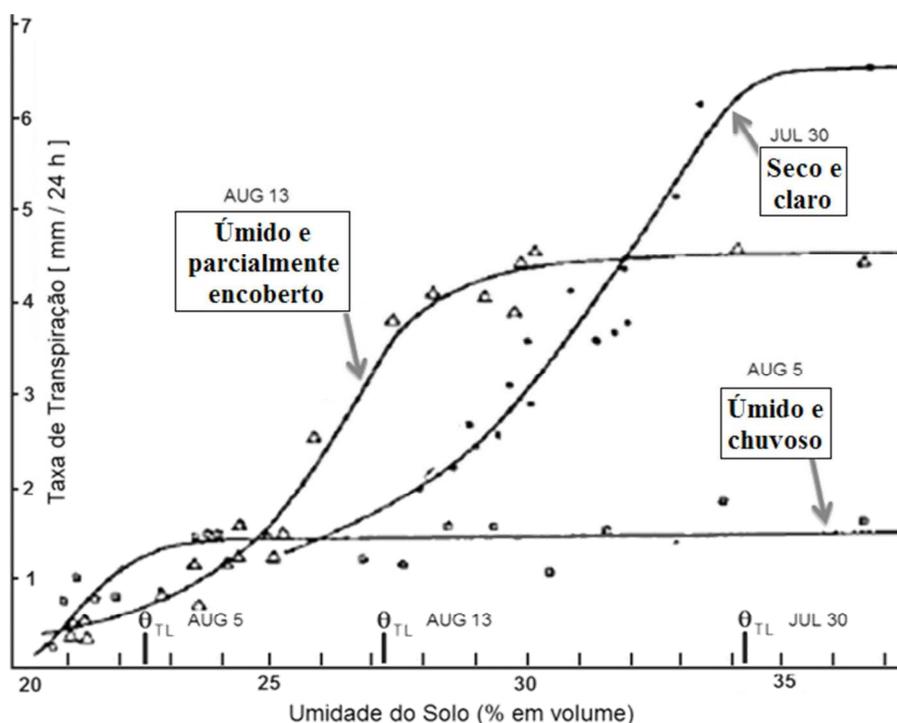


Figura 5 – Taxa de Transpiração Real Diária em Função da Umidade do Solo.

Os pontos, triângulos e círculos marcam valores experimentais de acordo com as condições ambientais: de dia seco e úmido (30 de julho); dia úmido e parcialmente encoberto (13 de agosto) e dia úmido e chuvoso (5 de agosto). As curvas são ajustes respectivos desses dados experimentais. Os respectivos pontos de perda de turgescência das células são θ_{TL}^{JUL30} , θ_{TL}^{AUG13} e θ_{TL}^{AUG5} .

Fonte: Adaptado de Denmead e Shaw (1962)

Há dois regimes possíveis: (i) inicialmente um patamar para quando há grandes quantidades de água no solo; (ii) uma queda linear da taxa de transpiração acontece com a redução da umidade do solo. A mudança de regime acontece nos pontos de perda de turgescência das células das folhas: θ_{TL}^{JUL30} ; θ_{TL}^{AUG13} e θ_{TL}^{AUG5} .

2.6. ANATOMIA VEGETAL DA ASCENSÃO DE ÁGUA

Uma planta terrestre é composta por raízes (parte subterrânea), caule e copa (parte aérea) como indica a Figura 6.

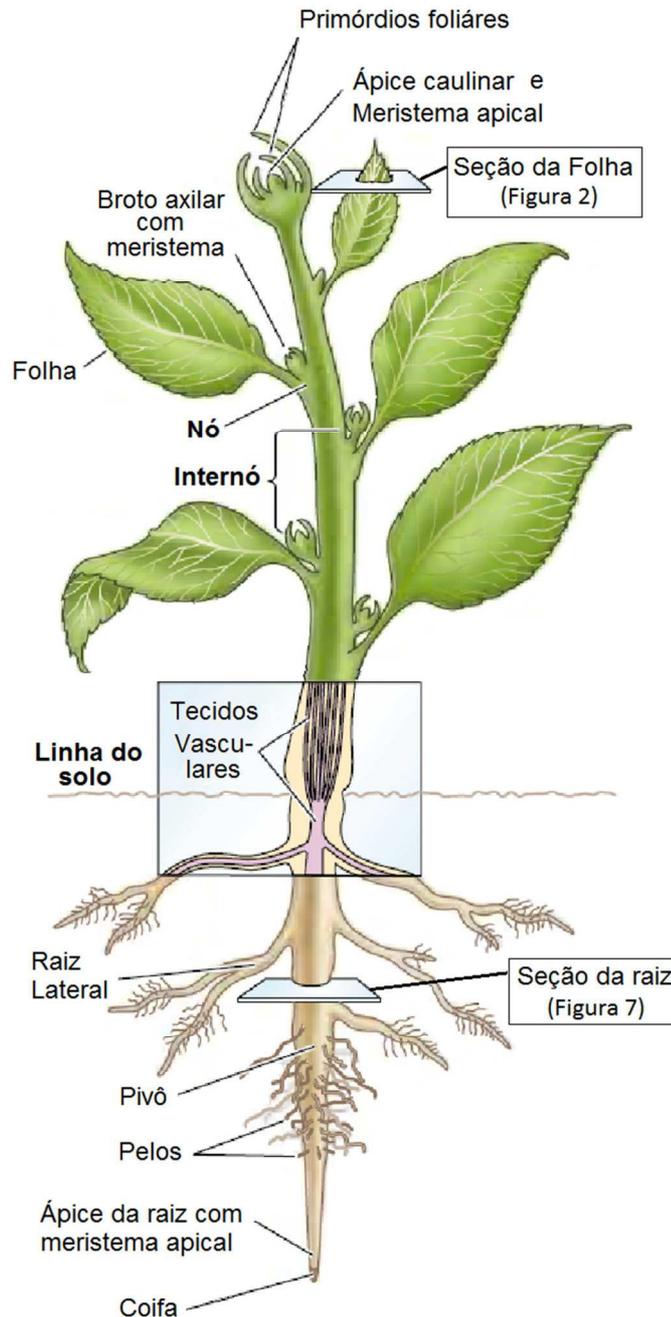


Figura 6 – Planta com estruturas de transporte de água

A linha do solo divide a planta em raiz (parte subterrânea) e caule e folhas (aérea). A raiz pivotante (principal) apresenta ramificações e pelos por onde a água entra no sistema vascular. Na raiz, o meristema apical é responsável pelo crescimento vertical e a coifa o protege. Na copa, além do meristema apical (primário), há o secundário (broto axilar) que aparece nos nós (junções entre as folhas e o caule). Os tecidos vasculares do caule aparecem em um corte longitudinal (em azul claro), enquanto dois cortes transversais estão indicados e remetem às Figuras 2 (Seção da folha) e Figura 7 (Seção da raiz).

Fonte: Taiz e Zeiger (1998)

O transporte de água inicia-se nos pelos absorventes da raiz, os quais são extensão das células da epiderme (Figuras 7 e 8). Quanto maior a área de contato com o solo, maior a capacidade de extração de água. São os pelos da raiz, os responsáveis pela grande área da superfície de contato da raiz com o solo, que pode atingir centenas de metros quadrados. Porém, estudos entre diferentes espécies de plantas demonstraram que a profundidade de extração é, na determinação do total de água extraída do solo, mais importante do que a extração que ocorre em cada profundidade (SQUIRE et al., 1987 apud CARLESSO, 1985). Assim, o sistema de raízes costuma ser bastante extenso. “As raízes de algumas plantas vão muito mais abaixo do que sua parte aérea se estende acima do solo. As raízes da macieira (*Malus domestica*) podem descer a cerca de 10m e mesmo em plantas herbáceas tais profundidades podem ser alcançadas, por exemplo, em alfafa (*Medicago sativa*)” (ÖPIK e ROLFE, 2005).

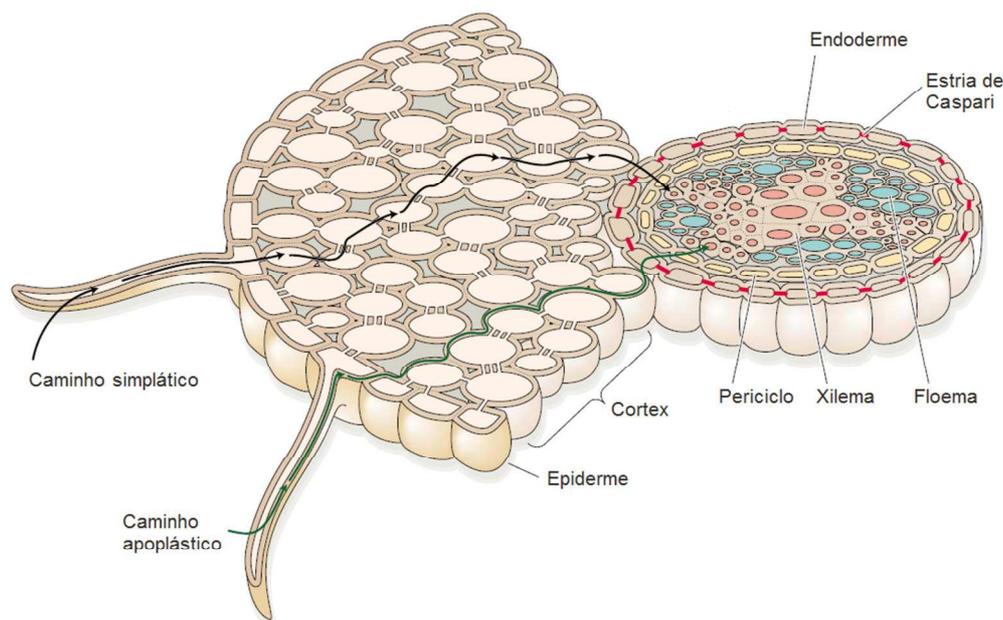


Figura 7 – Esquema das vias de transporte de água na raiz.

A água pode chegar aos vasos do xilema pela simplástica, em preto, ou apoplástica, em verde. A via apoplástica, no entanto, é interrompida na endoderme devido às Estrias de Caspary e é reestabelecida após a água atravessar a endoderme.

Fonte: Taiz e Zeiger (1998)

Os tecidos responsáveis pelo transporte de água nas traqueófitas (plantas vasculares) são o xilema – que transporta a seiva bruta, isto é, água e sais minerais absorvidos pela raiz, e hormônios, no sentido ascendente até os tecidos verdes – e o floema, que conduz a seiva elaborada, resultante da incorporação dos produtos da fotossíntese, para toda a planta, inclusive para a raiz, para consumo e armazenamento.

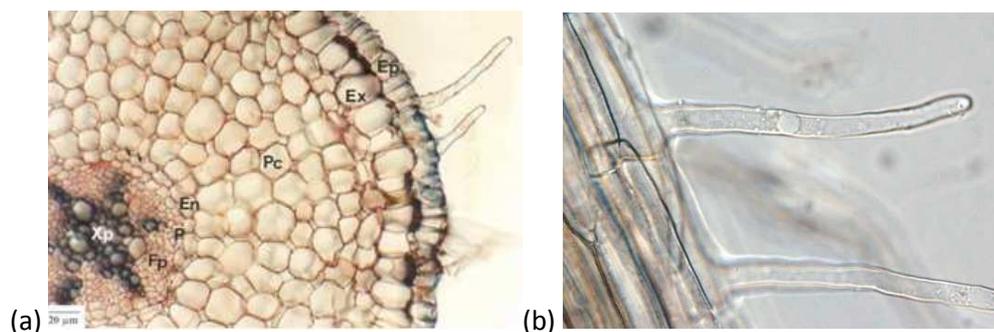


Figura 8 - Micrografias da Raiz.

(a) Corte Transversal da raiz, onde aparecem: Ep – a epiderme com os pelos radiculares; Ex – exoderme; Pc – parênquima cortical (cortex); En – endoderme; P - periciclo; Fp – Floema primário e Xp – Xilema primário; (b) Detalhe do pelo da raiz

Fonte: (a) Sobiologia (2011) e (b) B.LOG.IA (2011)

Dependente da radiação solar, da umidade relativa do ar, do conteúdo de água no solo, dentre outras variáveis microclimáticas, o transporte hídrico, resposta ao déficit de potencial hídrico, é realizado sob sofisticado controle da planta e praticamente sem custo energético. Exceção digna de nota é a pressão da raiz, resultante da diferença de potencial osmótico entre a raiz e o solo. A pressão da raiz é a causa da exsudação de água no colo da raiz quando a parte aérea da planta é cortada (fenômeno chamado de sangramento). A entrada seletiva de solutos em sentido contrário ao do potencial osmótico no citoplasma das células da epiderme ou do córtex é realizada à custa da energia obtida na respiração. Assim, a concentração de solutos no xilema pode ser maior que a do solo.

Após a entrada, uma complexa estrutura de tubos entre citoplasmas de células vizinhas, ligando as diversas células do córtex vegetal, a plasmodesmata, permite que os solutos fluam até o xilema. Os desmotubos são contínuos ao retículo endoplasmático (rede complexa de membranas que formam câmaras e tubos). Essa via é chamada de simplástica, palavra cuja origem grega significa junto ao citoplasma. A água pode ainda atravessar as membranas celulares de célula a célula. Essa via é chamada de transmembrana.

Outra via possível é a apoplástica, que quer dizer distante do citoplasma. A água e os solutos fluem pelos espaços intercelulares e no contínuo entre as membranas plasmáticas. Há, ainda, a lamela média – membrana completamente permeável – entre as paredes de células vegetais contíguas que a água atravessa facilmente.

Na endoderme, camada de células entre o córtex e o parênquima do xilema, os espaços intercelulares são lignificados, formando as estrias de Caspari, que interrompem o fluxo de água e solutos pela via apoplástica. Dessa forma, somente os solutos que atravessaram a membrana celular podem chegar ao

xilema. No xilema, a via apoplástica é reestabelecida. Segundo Fitter e Hay (2002), a continuidade do fluxo de água no xilema requer continuidade nos capilares do solo e na via apoplástica das folhas e das raízes.

O xilema é um tecido composto de fibras, células parenquimáticas e elementos traqueais. O parênquima, além da função de armazenamento e transferência em curtos trajetos de água e solutos, é o único componente vivo do xilema maduro e funcional. As fibras, células muito alongadas e com espessamento na parede secundária, tem como função principal fornecer suporte estrutural a planta. Finalmente, os elementos traqueais são células alongadas, que se interconectam formando túbulos para o transporte eficiente de grande quantidade de água, e abrangem dois tipos de células: os traqueídeos e os elementos de vaso.

Os traqueídeos são encontrados em pteridófitos e gimnospermas, enquanto que as angiospermas possuem tanto traqueídeos como elementos de vasos, estruturas traqueais mais recentes. Os traqueídeos alcançam o comprimento da ordem de 1 cm e diâmetro entre 10 a 50 μm ; os elementos de vasos são mais curtos e possuem maior diâmetro. Quando jovens essas células possuem apenas parede celular primária. Com o aumento de volume, devido à pressão interna do protoplasma, uma parede celular secundária formada principalmente por celulose, hemicelulose e lignina aparece.

Os elementos de vasos possuem placas de perfuração nas extremidades, as quais se fundem, formando traqueias. Assim, a resistência ao fluxo hídrico nas angiospermas é menor que nas gimnospermas devido a maior eficiência de transporte das traqueias com relação aos traqueídeos, por serem aquelas mais largas e longas (SALISBURY e ROSS, 1992).

No xilema, para a célula torna-se funcional deve perder o protoplasma. A lignificação da parede secundária aumenta sua impermeabilidade. O espessamento da parede secundária dos traqueídeos contribui no suporte estrutural da planta, assim como para evitar o colapso das células sob fortes pressões negativas, devido à transpiração.

As células vegetais maduras vivas caracterizam-se por, além das organelas comuns às células animais – como núcleo celular (responsável pela divisão celular); peroxissoma (ou peroxisome), relacionado ao metabolismo do peróxido de hidrogênio; mitocôndria (cuja função é a respiração celular e, portanto a produção de energia para a célula); complexo de Golgi (que

armazenam substâncias); ribossomas que podem ser encontrados soltos ou interligados formando retículos endoplasmáticos lisos ou rugosos (tem como função a produção de proteínas) e membrana celular –, ter organelas específicas para a fotossíntese (os cloroplastos); grandes vacúolos que ocupam, cheios de água, 80 a 90% do volume total da célula (Figura 9) e uma parede celular de celulose.

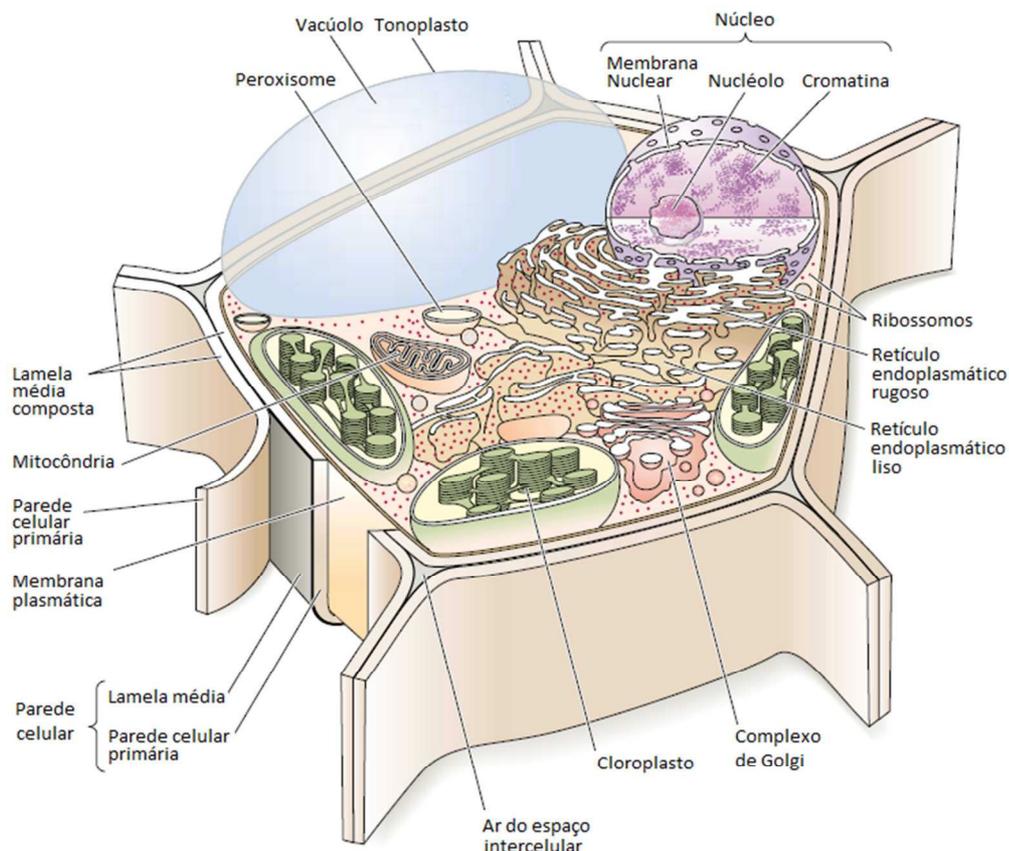


Figura 9 – Célula vegetal.

Além das organelas comuns tanto em células animais como em vegetais (mitocôndrias, complexo de Golgi, ribossomos) destacam-se em uma célula vegetal os cloroplastos, a parede celular e um grande vacúolo (em azul) que armazena água e sais necessários à sobrevivência da planta.

Fonte: Taiz e Zeiger (1998)

Todos os componentes do contínuo SPA armazenam água. No solo, por exemplo, nos espaços entre os grãos de argila; no ar, o conteúdo de água, dependendo da temperatura, pode representar 4% do valor da massa de ar seco. Na planta, a água é armazenada nas vias apoplástica e simplástica da raiz; nos vasos do xilema e do floema na raiz e no caule da planta.

A água armazenada no caule pode estar tanto na casca (nos tecidos vivos), quanto na madeira. A quantidade total de água depende muito das

condições atmosféricas e do conteúdo de água no solo, porém, na madeira verde à umidade é sempre maior que 100%. Isto é, a quantidade de água é pelo menos igual à quantidade de madeira seca.

Alterações diárias da pressão hidrostática no xilema causam variações no diâmetro do caule. Durante o dia, quando a taxa de transpiração é elevada, há redução da pressão hidrostática, que se transmite a todo caminho que a água percorre através do caule, o que provoca contração do tronco da árvore (NOBEL, 2009). A variação de volume pode representar um aumento do diâmetro do tronco, da ordem de 0,3 a 1%.

A Tabela 4 resume a estimativa realizada por Nobel (2009, p.492:495) para a capacitância (C) do caule de uma árvore de 10 m de altura (hc) e 0,1 m de raio (rc), com variação diurna de 1%; área foliar da copa de 16 m² (A) e taxa de transpiração diária de $j = 4 \text{ mm.dia}^{-1}$.

Grandeza	Expressão	Valor
Taxa de transpirada diária	$Tr = A j$	$0,064 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$
Volume do caule	$Wc = \pi (rc)^2 hc$	$0,314 \text{ m}^3$
Variação diurna de volume do caule	$\Delta W = \pi [(0,99rc)^2 - rc^2] hc$	$-0,0063 \text{ m}^3$
Diferença de potencial hídrico	$\Delta\psi = \Delta\psi_g + \Delta\psi_s$	$-0,4 \text{ MPa}$
Capacitância	$C = \Delta W / \Delta\psi$	$1,6 \times 10^{-2} \text{ m}^3.\text{MPa}^{-1}$

Tabela 4 – Avaliação da capacitância do caule de uma árvore.

A transpiração diária dos 16 m² de área foliar (Tr) é o produto da área foliar da copa (A) e a taxa diária de transpiração por m² (j). O caule é modelado como um cilindro circular reto. Assim, a variação de volume depende da variação da área da base, mantendo-se a altura constante (hc). A diferença de potencial hídrico é dada pela soma dos componentes: diferença de potencial hídrico gravitacional ($\Delta\psi_g$) e diferença de potencial hídrico osmótico ($\Delta\psi_s$). A capacitância do caule é a constante de proporcionalidade entre o potencial hídrico e a quantidade de água armazenada.

Fonte: Nobel (2009)

O autor estima a resistência do caule em $1,5 \times 10^6 \text{ MPa.s.m}^{-3}$. Analogamente aos sistemas elétricos, o produto R e C – que caracteriza a associação das propriedades resistivas e capacitivas de cada ponto do circuito – também tem unidades de tempo. Ao considerar que apenas 20% da resistência estão na região de armazenamento de água, obtém-se o tempo característico do xilema na ordem de $4,8 \times 10^6 \text{ s}$. Isto é, 80 minutos.

Na rota d'água, as folhas se configuram como o órgão vegetal de saída, no entanto, para evitar a transpiração, a epiderme foliar forma um mosaico sem brechas entre as células e, sobre essa epiderme, há uma camada de cera.

Abaixo da epiderme, há o parênquima paliçádico, células clorofiladas na forma de pilares organizadas de 1 a 3 camadas, que absorvem e canalizam a luz

para a camada seguinte, o parênquima esponjoso, um conjunto de células muito irregulares em meio a espaços de grandes dimensões preenchidos por água e ar. A extensa interface ar-água no entorno dessas células propicia um forte espalhamento da luz no interior da folha. As múltiplas reflexões aumentam o comprimento do caminho sobre o qual os fótons viajam, aumentando assim a probabilidade de absorção.

Para que haja entrada de CO₂, na epiderme foliar aparecem os estômatos: estruturas compostas por duas células, chamadas guarda, que regulam a abertura de um poro (ou ostíolo). As células guarda controlam a abertura desses poros e, diferentemente das outras células epidérmicas são clorofiladas. Células subsidiárias e células polares também podem estar presentes, compondo o complexo estomático (Figura 10).

Assim, o tamanho da superfície de água exposta ao ar depende da área foliar de toda a copa, da densidade de estômatos sobre essa área foliar, da abertura dos estômatos, a qual é controlada pela planta, e da superfície de interface ar-água no mesófilo esponjoso na cavidade subestomática. Quanto maior a área de interface ar-água, mais facilmente ocorrerá a dissolução do CO₂ e maior a transpiração da copa.

A densidade dos estômatos varia de espécie para espécie. Pode, inclusive, variar em uma mesma planta para diferentes condições ambientais. Em algumas decíduas, cem mil por centímetro quadrado é valor típico encontrado, enquanto que, para cactáceas, estão em torno de mil. O tamanho médio é também diverso: de 3 a 12 μm de largura e 7 a 40 μm de comprimento.

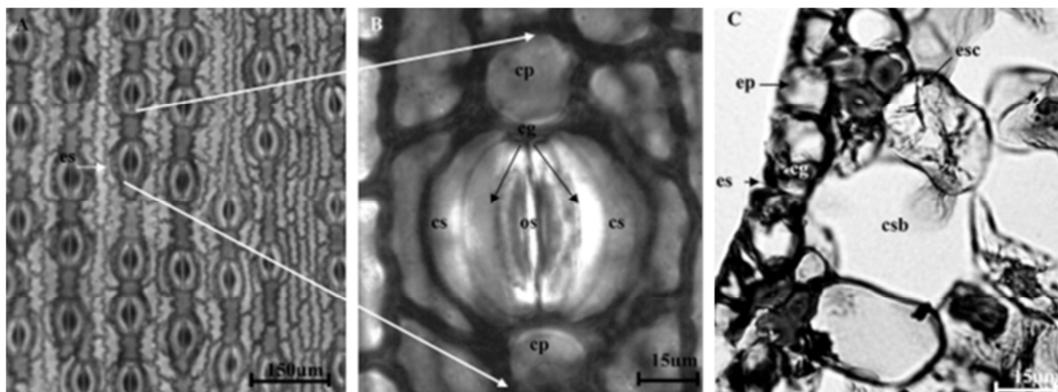


Figura 10 – Estômatos da epiderme abaxial do Buriti.

(A) Vista frontal - os estômatos apresentam-se enfileirados; (B) Complexo estomático composto de ostíolo (os); células guardas (cg); células subsidiárias (cs) e células polares (cp); (C) Corte transversal aparecendo câmara subestomática (csb) e célula esclerosada – esclerócito (esc).

Fonte: Passos e Mendonça (2006).

Em espécies de regiões mais úmidas, os estômatos estão presentes principalmente na epiderme foliar inferior (folhas hipoestomáticas). Em folhas flutuantes de espécies aquáticas os estômatos estão presentes preferencialmente na epiderme superior (folhas epiestomáticas). As folhas anfiestomáticas, que apresentam estômatos em ambas as superfícies foliares, ocorrem em espécies de regiões mais áridas.

Os estômatos podem responder diretamente à presença de luz, o próprio fluxo de fótons estimula a extrusão de íons H^+ (prótons) das células guarda. A saída dos prótons através da membrana por meio das H^+ ATPase, hiperpolariza a membrana plasmática que, dessa forma deixa entrar íons potássio, K^+ . O teor de K^+ tem um pico aproximadamente às 10 horas da manhã e declina a partir desse ponto quase linearmente até o final do ciclo de luz diária. A sacarose, produto da fotossíntese, tem seu pico de concentração aproximadamente às 17 horas (Figura 11).

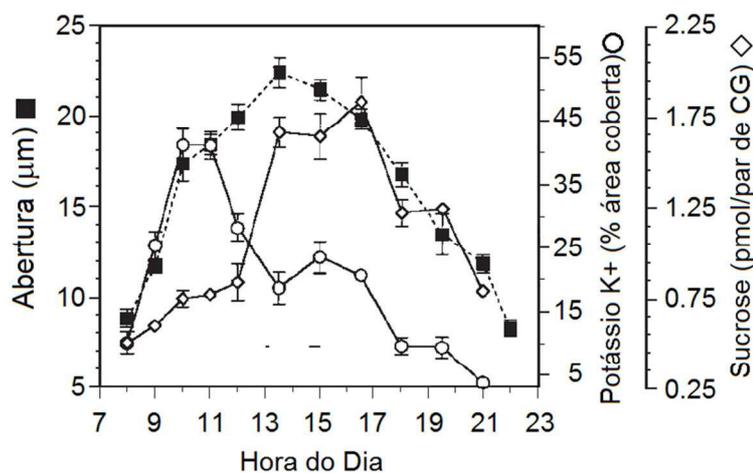


Figura 11 – Abertura estomática e teor de solutos.

Pontos experimentais e curvas de ajuste da abertura estomática (---■---), teor de K^+ , íon potássio, (---○---) e sacarose (---◇---) no citosol das células guarda de *Vicia faba* sobre um ciclo de luz diária. O teor de potássio é expresso pela porcentagem da área da célula guarda coberta por mancha da substância. O teor de sacarose é expresso em pmol por par de células guarda.

Fonte: Talboot e Zeiger, 1998.

O aumento da concentração de íons potássio e de sacarose reduz o potencial hídrico nas células estomáticas, o que faz fluir água para dentro da célula. A abertura estomática alarga-se com a turgescência das células guarda. No entanto, a abertura estomática é regulada por uma alteração dos fluxos iônicos para as células guarda controlada pelo hormônio ácido abscísico – ABA (VAHISALU et al, 2008).

De acordo com Buckley (2005), a abertura estomática depende das pressões de turgescência das células guarda (ψ_{Pg}) e das células da epiderme (ψ_{Pe}) e pode ser descrita pela expressão:

$$a_s = A_p(\psi_{Pg} - m \psi_{Pe}) \quad (15)$$

Na Figura 12, tem-se a representação da Equação (15) em três momentos: (a) para valores equivalentes de ψ_{Pg} e ψ_{Pe} ; (b) o aumento da turgescência das células guarda (ψ_{Pg}), aumenta a abertura estomática e (c) com relação às células da epiderme, no entanto, o efeito é inverso: o aumento da turgescência epidérmica (ψ_{Pe}) fecha o poro estomático. A_p é uma constante de proporcionalidade e m é a vantagem mecânica da epiderme.

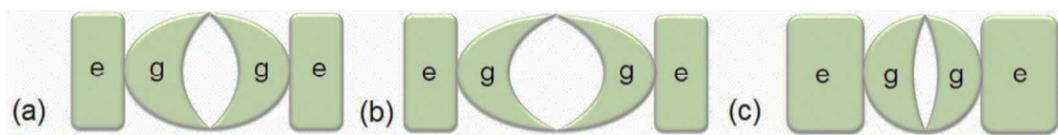


Figura 12 – Influência dos potenciais (ψ_{Pg}) e (ψ_{Pe}) sobre a abertura estomática. Representação esquemática da expressão (15). (a) a abertura estomática depende dos potenciais hidrostáticos (ψ_{Pg}) das células guardas – representadas por crescente e minguante marcados pela letra “g” – e (ψ_{Pe}) das células da epiderme – representadas por retângulos marcados pela letra “e”; (b) o aumento do potencial hidrostático das células guarda, as torna mais turgida, alargando a abertura estomática; (c) o aumento do potencial hidrostático das células da epiderme pressiona mecanicamente as células guarda reduzindo a abertura estomática.

Fonte: Adaptado de Buckley (2005)

Outros autores, Weyers e Meidner (1990) propõem a seguinte expressão para a abertura estomática:

$$a_s = A_0 + a_g \psi_{Pg} + a_e \psi_{Pe} \quad (16)$$

Os valores de a_g são positivos e os de a_e são negativos e indicam o efeito sobre a abertura estomática da variação da turgescência em ambos os tipos de células. O valor absoluto da razão $Ar = a_e/a_g$, chamada razão de antagonismo, é geralmente maior que 1. Estimativas de Ar variam muito com as espécies, sendo de 1.6 para *Tradescancia virginiana* e de 3.1 para *Commelina communis* (COSTA, 2001). Comparando as expressões, obtém-se: $A_0 = 0$; $a_g = A_p$ e $a_e = -A_p m$. Assim, as duas grandezas – razão de antagonismo e vantagem mecânica da epiderme – são simétrico: $m = -Ar$.

Nem sempre A_0 é nulo, podendo ser negativo ou positivo. O valor positivo indica que, mesmo com valores nulos dos potenciais de turgescência, o poro estomático permanece aberto, o que é um caso raro. O valor negativo indica

que há necessidade de um valor mínimo de turgescência da célula estomática para que se inicie a abertura do estômato, devido a isso, A_0 é chamada fase de tensão.

2.7. OSCILAÇÕES ESTOMÁTICAS

Pode ocorrer, sob certas condições, que o ostíolo apresente variações periódicas em sua abertura. Segundo Lang et al (1969), esse fenômeno, conhecido como oscilação estomática, tem sido observado desde a década de 1920. Os autores submeteram folhas de algodoeiro a períodos de iluminação intercalados a períodos escuridão. As oscilações induzidas por mudanças bruscas periódicas na iluminação resultam da demora na resposta estomática. Os períodos de oscilação encontrados variam de 5 a 20 minutos, com o fechamento geralmente ocorrendo mais rapidamente do que o de abertura. Medidas contínuas da transpiração foliar foram realizadas a partir da umidade do ar de entrada e de saída da câmara.

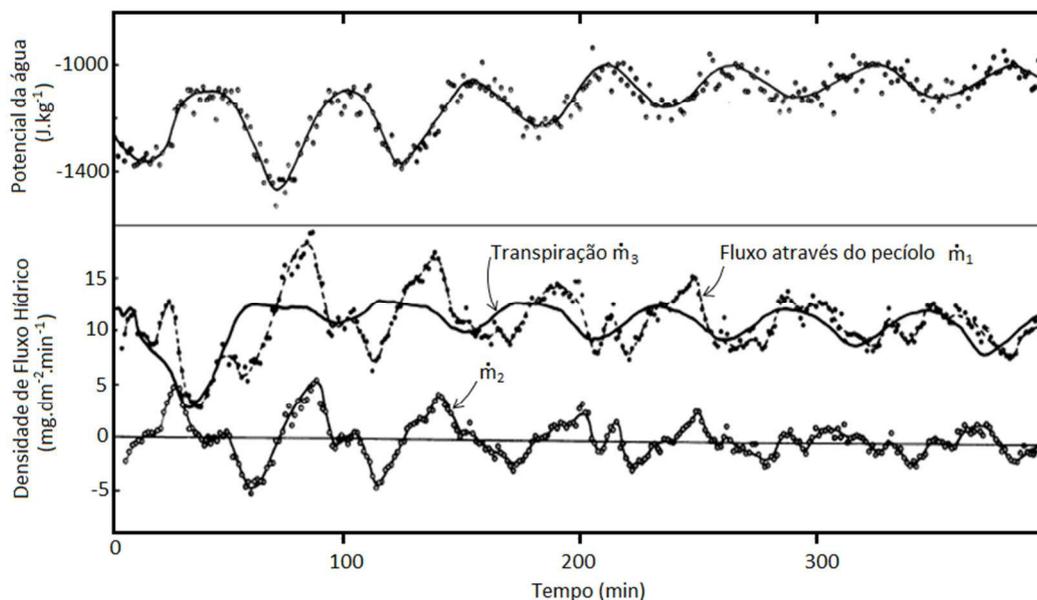


Figura 13 – Oscilações do potencial da água e dos fluxos hídricos

Em cima, gráfico do potencial da água (em Joule por quilograma) oscilando em ressonância com os períodos de iluminação e escuridão. Abaixo, os gráficos das densidades de fluxo hídrico (por unidade de área da folha em plantas de algodão): transpiração foliar (\dot{m}_3); fluxo através do pecíolo (\dot{m}_1) e variação de massa de água no interior da folha (\dot{m}_2). Observa-se diferenças de fase entre a transpiração, o fluxo através do pecíolo e o potencial de água.

Fonte: Lang et al (1969)

No Gráfico do potencial hídrico no xilema e da densidade de fluxo de água pelos estômatos (Figura 13), \dot{m}_1 é o fluxo de massa de água através do pecíolo, \dot{m}_2 é a variação da massa de água no interior da folha e \dot{m}_3 , a taxa de variação de massa devida à transpiração foliar. Da equação da continuidade:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3.$$

Os resultados indicam que (a) há diferença de fase entre a entrada e a saída de água na folha e (b) O potencial hídrico do xilema também oscila, quando os estômatos estão em fase. O mecanismo da oscilação estomática sob iluminação periódica é assim explicado: (a) no início do período iluminado, o estômato se abre; há perdas de água por transpiração em taxas que ultrapassam a captação, pois os estômatos se abrem mais que em estado estável; (b) no final do período sem iluminação, acontece o contrário: a folha está túrgida, porém o estômato ainda está fechado.

A conclusão dos autores é a possível analogia com um circuito RC conforme a Figura 14. A presença de capacitores (armazenamento de água) permite a defasagem entre a entrada e a saída de água. “Para que uma oscilação seja sustentada, uma diferença de fase de 180° deve existir entre os pontos A e B, o que necessita de, ao menos, 3 unidades de circuito RC com valores bem definidos, conseqüentemente, o circuito, tal como está não deve oscilar, apesar de uma oscilação amortecida ser possível. Assim, esse modelo simples não descreve completamente o comportamento de uma planta que oscila dinamicamente” (LANG et al., 1969).

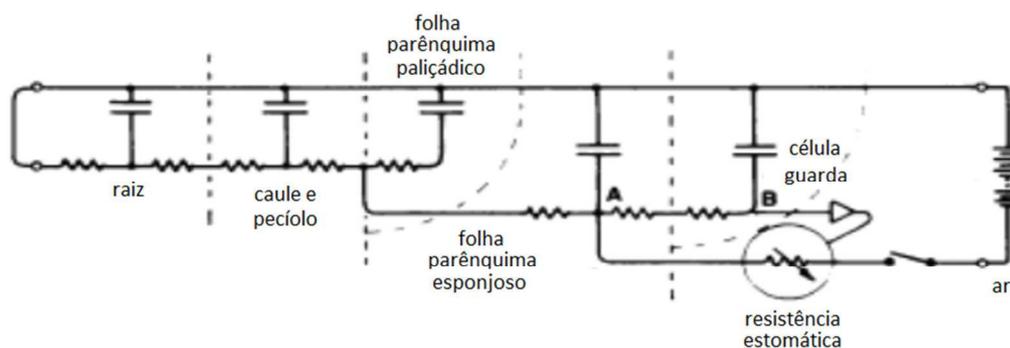


Figura 14 – Análogo elétrico de uma planta com raízes em potencial zero.

O controle do conteúdo de água na folha depende da resistência estomática, a qual é controlada pelo potencial hídrico da folha (triângulo de B sobre a resistência estomática). Para que uma oscilação seja sustentada, uma diferença de fase de 180° deve existir entre os pontos A e B.

Fonte: Lang et al. (1969)

Outros autores, como Farquhar e Cowan (1974), apresentam uma função não linear (ganho) para descrever as oscilações. Essa não linearidade é justificada pelo fato da perda de água das células da epiderme (com conseqüente ressecamento), provocar um efeito mecânico de tensão que abre o estômato, mesmo quando as células guarda estão flácidas devido ao stress hídrico (realimentação positiva). Os parâmetros “vantagem mecânica da epiderme”, descrito por Buckley (2005) e a “razão de antagonismo”, descrito por Weyers e

Meidner (1990), tornam as equações (15) e (16) não lineares e são descrições matemáticas dessa retroalimentação positiva da abertura estomática.

A função capacitiva para explicar as oscilações estomáticas, bem como a não linearidade do fluxo hídrico aparecem em Johnsson e Prytz (2002). O análogo elétrico proposto contém três ramos paralelos de circuito RC (Figura 15).

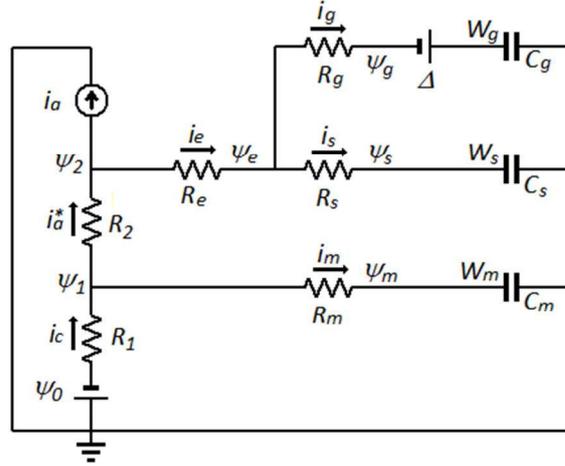


Figura 15 – Modelo para descrever e simular a regulação oscilatória da água.

O fluxo rítmico pode ser modelado em termos elétricos como proposto por Cowan (1972a, apud JOHNSSON e PRYTZ, 2002). Na analogia elétrica (ψ) representa os potenciais hídricos, R, a resistência ao fluxo de água, i, o fluxo hídrico, C, a capacitância - habilidade da célula de ‘armazenar’ água, W, a quantidade de água armazenada e (Δ) a mudança osmótica induzida pela luz nas células guarda. Os subíndices c, a, e, g, s e m denotam os componentes: caule, atmosfera, epiderme, célula guarda, célula subsidiária e mesófilo, respectivamente. O fluxo para atmosfera e componentes da epiderme é denotado por i_a^* . Os pontos com potenciais ψ_0, ψ_1, ψ_2 marcam a raiz, o pecíolo da folha e a saída para a atmosfera; R1 e R2 são as resistências ao fluxo principal da água desde a raiz até a atmosfera, enquanto que as outras resistências estão associadas ao armazenamento de água na folha.

Fonte: Johnsson e Prytz, 2002.

As seguintes equações para o fluxo em cada um dos capacitores são propostas pelos autores:

$$\begin{aligned} \frac{dW_g}{dt} &= \alpha_1 f(W_g, W_s) + \alpha_{11} W_g + \alpha_{12} W_s + \alpha_{13} W_m \\ \frac{dW_s}{dt} &= \alpha_2 f(W_g, W_s) + \alpha_{21} W_g + \alpha_{22} W_s + \alpha_{23} W_m \\ \frac{dW_m}{dt} &= \alpha_3 f(W_g, W_s) + \alpha_{31} W_g + \alpha_{32} W_s + \alpha_{33} W_m \end{aligned} \quad (17)$$

As constantes α_i são análogas às resistências, enquanto as α_{ij} tem dimensão de frequência. A função não linear f é semelhante às relações propostas por Weyers e Meidner (1990) e Buckley (2005) para a abertura estomática:

$$f = b_g \int h_g(u) W_g(u) du + b_s \int h_s(u) W_s(u) du \quad (18)$$

Os índices g , s e m dizem respeito respectivamente às células guarda, subsidiária e do mesófilo; b_g e b_s são constantes. As funções peso h denotam o acúmulo de água nos capacitores das células guarda e subsidiária em função do tempo. Os autores simulam o sistema de equações proposta e obtém periodicidade simples, duplicação, triplicação etc., sem atenuação da oscilação.

2.8. OSCILAÇÕES EM CIRCUITOS ELÉTRICOS

Em eletrônica, uma maneira de obter não linearidade, sem o uso de indutores, é introduzir o transistor. O termo é um acrônimo inglês para resistor/resistência de transferência (transfer resistor). São formados por três lâminas –coletor, base e emissor – de semicondutores dopados positivamente (P) ou negativamente (N) em arranjos PNP ou NPN, conforme a Figura 16.

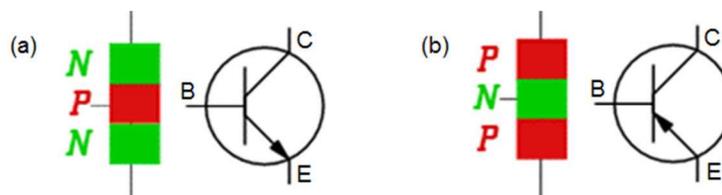


Figura 16 – Transistores NPN e PNP – diagrama de montagem e símbolo
O transistor é um dispositivo construído a partir de três camadas – coletor (C), base (B) e emissor (E) – de material semiconductor dopado positivamente (P) ou negativamente (N) com portadores de carga elétrica. Dois arranjos são possíveis: (a) NPN e (b) PNP. Ao lado do diagrama de montagem de cada um desses dois arranjos estão seus símbolos
Fonte: Lesurf,2011

A principal característica do transistor é que uma corrente expressiva aparece entre o coletor e o emissor quando as duplas camadas (base-coletor e base-emissor) estão adequadamente polarizadas.

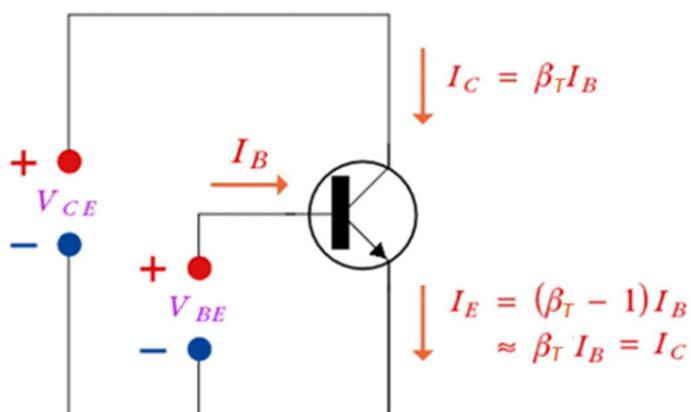


Figura 17 – Visão convencional do ganho de um transistor NPN
O transistor NPN tem a dupla camada Emissor-Base diretamente polarizada, enquanto que a dupla camada Base-Coletor é polarizada inversamente. Nessas condições a corrente que atravessa Emissor-Coletor é uma amplificação da corrente da base.
Fonte: Lesurf,2011.

Desse modo, o dispositivo permite que um pequeno sinal na base (I_B – corrente na base) possa ser amplificado na saída do emissor (I_C – corrente no emissor). A corrente do emissor é multiplicada pelo ganho do dispositivo (β_T). Assim, o transistor funciona como um resistor cuja resistência é controlada pela corrente da base.

Essa propriedade dos transistores, de multiplicar a corrente da base, permite que sejam utilizados em circuitos osciladores.

Osciladores são circuitos que geram um sinal de saída oscilante sem a necessidade de um sinal de entrada oscilante. Uma condição para a oscilação é a existência de realimentação positiva, em que o sinal de entrada é amplificado. Os osciladores que utilizam transistores são osciladores astáveis, isto é, quase estáveis. Esses transistores são controlados pelo potencial elétrico de capacitores, enquanto que a carga dos capacitores é controlada pelo ganho do transistor.

Um oscilador astável que depende do tempo de descarregamento dos capacitores é o oscilador de desvio de fase de rede progressiva de circuitos RC de três estágios (Figura 18).

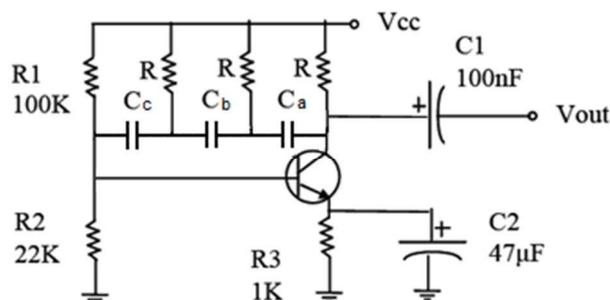


Figura 18 - Oscilador de desvio de fase de rede progressiva de três estágios.

O capacitor C_a se descarrega quando o transistor está “aberto”. Os capacitores seguintes se descarregam. O capacitor C_c descarregado manda um “sinal” para o transistor se fechar, permitindo que os capacitores se recarreguem, reiniciando o ciclo.

Fonte: Kato, 2011

O capacitor C_a (primeiro estágio) se descarrega quando o transistor está “aberto”. Os capacitores C_b (segundo estágio) e C_c (terceiro estágio) se descarregam sucessivamente. O capacitor C_c descarregado, manda um “sinal” para o transistor que se fecha, permitindo que os capacitores se recarreguem. Quando o capacitor C_c está recarregado, o sinal para o transistor é de abertura do circuito, reiniciando o ciclo. Os capacitores vão sucessivamente desviando a fase do circuito. O período de oscilação depende do tempo característico da associação RC ($C=C_c=C_b=C_a$).

3. MATERIAL E MÉTODOS

As vias de sinalização que conduzem a abertura ou fechamento dos estômatos têm sido descritas em detalhe, no entanto, segundo Buckley (2005), a modelagem integrada desse conhecimento em uma planta está longe de ser conclusiva. O autor credita à ênfase nos processos foliares a modelagem satisfatória para situações de solo úmido, porém, debita a essa ênfase, as falhas da simulação de padrões de transpiração e condutância quando o potencial hídrico do solo é muito baixo ou quando flutua sobre uma ampla faixa (DEWAR, 2002, apud BUCKLEY, 2005). Modelagens costumam integrar diversos fatores para prever a regulação estomática em plantas sob estresse, como por exemplo, o modelo desenvolvido por Tuzet et al. (2003). Porém, têm inconvenientes: as estruturas matemáticas nem sempre são fáceis de “interpretar em termos de fatores fisiológicos que contribuem para regulação estomática” (BUCKLEY et al., 2003 apud BUCKLEY, 2005), o armazenamento de água não é incluído no seu sistema hidráulico e as previsões não são testadas em relação aos dados de campo.

O modelo aqui proposto, caracterizado como teórico, busca resolver (a priori) duas dessas inquietações: (1) a estrutura matemática surge da analogia fluxo hídrico – fluxo elétrico, a partir da interpretação dos fatores fisiológicos, edáficos e microclimático e (2) foi modelado o armazenamento de água.

Se, na atual fase de desenvolvimento do modelo, não foram testadas as previsões com base em séries temporais de dados de campo, ao menos foram utilizados valores representativos encontrados na literatura ou estimados a partir de dados de campo. Variáveis estocásticas foram modeladas a partir de processos de Poisson e a periodicidade diária da radiação solar foi considerada.

3.1. LEIS DE KIRCHHOFF

O circuito hídrico através da planta vem sendo estudado de maneira análoga aos circuitos elétricos. A resistência ao fluxo hídrico, R – inverso da condutividade, k – é a constante de proporcionalidade entre o fluxo (f) e o déficit do potencial hídrico ($\Delta\psi$), conforme aparece na Equação (1):

$$f = \frac{1}{R_{eq}} \Delta\psi(T, p, N)$$

A resistência equivalente, R_{eq} , é calculada pela soma dos efeitos das resistências em série, ao longo do percurso no contínuo SPA:

$$R_{eq} = R_{sl} + R_{rz} + R_{cl} + R_{fl} + R_{cf} \quad (19)$$

Nessa expressão, R_{sl} , R_{rz} , R_{cl} , R_{fl} e R_{cf} são as resistências ao fluxo de água nos componentes solo, raiz, caule, folhas e camada limite foliar, respectivamente. A resistência do córtex da raiz, R_{cortex} , deve ser modelada por uma associação em paralelo, devido à dupla via de entrada da água (apoplástica, R_{apo} , e simplástica/transmembrana, R_{sim}): $R_{cortex} = 1/(1/R_{sim} + 1/R_{apo})$

Uma diferença importante entre os fluxos elétrico e hídrico, a se considerar, é a existência de duas espécies de carga elétrica, enquanto é possível se definir apenas uma espécie em se tratando de volume de água. A água, de maneira análoga às partículas de carga positiva, flui para regiões de menor potencial hídrico. Porquanto, consideraremos análogo ao hídrico, o fluxo convencional da corrente elétrica.

A partir das quantidades conservadas em cada análogo – energia e carga no circuito elétrico; energia e volume de água no hídrico – as seguintes correspondências foram estabelecidas:

Fluxo Elétrico			Fluxo hídrico		
Grandeza	Símbolo	Relação	Grandeza	Símbolo	Relação
Carga (Q)	coulomb (C)		Volume (W)		m^3
Potencial (V)	volt (V)	$J.C^{-1}$	Potencial (ψ)	Pascal (Pa)	$J.m^{-3}$
Corrente (i)	ampere (A)	$C.s^{-1}$	Fluxo (f)		$m^3.s^{-1}$
Resistência (R)	ohm (Ω)	$V.A^{-1}$	Resistência (R)		$Pa.s.m^{-3}$
Capacitância (C)	farad (F)	$C.V^{-1}$	Capacitância (C)		$m^3.Pa^{-1}$

Tabela 5 – Grandezas Análogas entre o fluxo elétrico e o fluxo hídrico

A partir das analogias: carga elétrica e volume de água (linha 1) e Potencial Elétrico e potencial hídrico (linha 2), as analogias com as outras grandezas se estabelecem automaticamente.

Há, estritamente falando, conservação de quantidade de matéria, pois o volume se altera com a mudança de fase. Na fase líquida, a água é praticamente incompressível. Na fase de vapor, considera-se o equivalente em milímetro de precipitação. Modelagens diversas, encontradas na literatura, resultam em equações ou sistemas de equações que, resolvidas, estimam o fluxo hídrico (o fluxo de seiva no caule, a transpiração da planta etc.). Nesta modelagem, o sistema de equações a ser resolvido surge da aplicação das leis de Kirchoff para o fluxo de água.

- (i) Lei das Malhas. O potencial hídrico, assim como o potencial eletrostático, é uma variável de estado, uma função de ponto, de modo

que vale a lei das malhas, isto é, em um circuito fechado a diferença de potencial hídrico é nula (Figura 19).

Equivalentemente, a diferença de potencial hídrico entre dois pontos quaisquer do fluxo hídrico independe do caminho seguido pela água;

- (ii) Lei dos Nós. Há conservação de volume de água (especificamente de quantidade de água correspondente, em unidades de precipitação) em qualquer ponto do circuito.

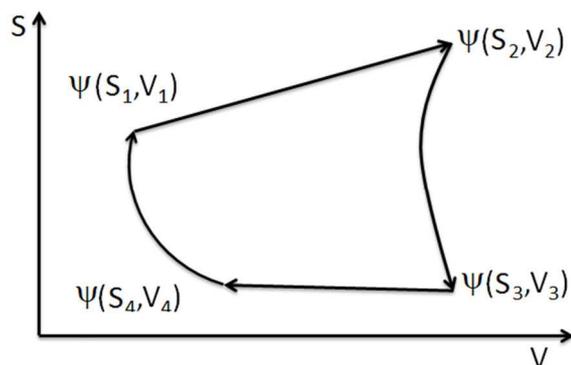


Figura 19 – O potencial hídrico em um diagrama Entropia \times Volume. Após um processo cíclico, o sistema retorna aos valores iniciais de entropia, volume e potencial hídrico, dado serem variáveis que caracterizam o estado do sistema.

A aplicação dessas duas leis, em cada malha e em cada nó do circuito, resulta em um sistema de equações diferenciais, em que o fluxo hídrico é função do déficit hídrico entre dois pontos quaisquer considerados, da resistência equivalente entre esses dois pontos (R_i), capacitâncias dos dispositivos de armazenamento de água (C_i), do volume de água armazenada (W_i) e da taxa de variação de água armazenada (dW_i/dt), que a estrutura do sistema SPA propicia:

$$f_i = f_i \left(\Delta\psi_i, R_i, C_i, W_i, \frac{dW_i}{dt} \right) \quad (20)$$

A solução do sistema de equações é possível, ao se impor condições iniciais e de contorno de acordo com valores representativos adotados na literatura (ou valores experimentais, para a calibragem do modelo).

3.2. O ANÁLOGO ELÉTRICO BÁSICO

O método consiste em separar em módulos as estruturas dos componentes: solo, planta e atmosfera, que, posteriormente acoplados, permitem descrever o fluxo contínuo. Todos os módulos são subcircuitos que surgem de modificações ou arranjos do circuito base (Figura 20).

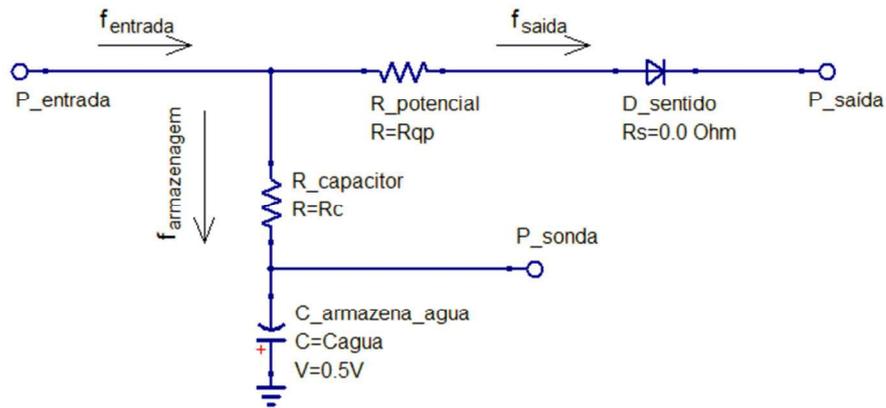


Figura 20 – Estrutura do circuito básico

O fluxo de entrada (f_{entrada}) separa-se, de acordo com a lei dos nós, nos fluxos de saída ($f_{\text{saída}}$) e armazenagem (farmazenagem), os quais dependem das resistências R_c e R_{qp} relativas aos resistores nomeados por $R_{\text{potencial}}$ e $R_{\text{capacitor}}$, respectivamente. Quando a carga do capacitor hídrico “ $C_{\text{armazena_agua}}$ ” estiver de acordo com a diferença de potencial estabelecida entre os pontos conectores P_{entrada} e $P_{\text{saída}}$ cessa o fluxo de armazenagem e o circuito estará em regime estacionário. Inicialmente, o potencial hídrico sobre a placa negativa do capacitor será $-0,5$ MPa (de acordo com a tabela de análogos). O diodo D_{sentido} de Resistência essencialmente nula é utilizado para garantir o sentido do fluxo. O conector P_{sonda} permite conhecer o potencial hídrico sobre a armadura não aterrada do capacitor (ψ_{sonda}).

O fluxo principal atravessa o resistor ($R_{\text{potencial}}$) e o diodo (D_{sentido}). A resistência equivalente entre os pontos (P_{entrada}) e ($P_{\text{saída}}$) é dada pela soma das resistências desses dois dispositivos $R_{eq} = R_{qp} + R_s$. À resistência interna do diodo é imposto o valor zero. No entanto, o diodo é um elemento não linear podendo apresentar cortes para baixas correntes, motivo pelo qual será introduzido apenas no caso da necessidade de garantir o sentido do fluxo.

Os fluxos obedecem à lei dos nós:

$$f_{\text{entrada}} + f_{\text{armazenagem}} = f_{\text{saída}} \quad (21)$$

Se uma diferença de potencial constante for aplicada entre os pontos P_{entrada} e $P_{\text{saída}}$, inicialmente o capacitor irá variar a quantidade de carga e os valores das correntes serão variáveis com o tempo. Nesse caso, diz-se que o circuito está em regime transiente (ou transitório).

O capacitor ligado em paralelo, com a armadura negativa ligada ao circuito e a armadura positiva aterrada é um capacitor hídrico, um contêiner de água. Após um intervalo de tempo relativamente longo, o capacitor estará carregado, obedecendo a seguinte relação: $W = C\psi_{\text{sonda}}$, em que o potencial hídrico na armadura negativa do capacitor hídrico é igual ao potencial hídrico do

ponto de entrada de fluxo ($\psi_{sonda} = \psi_{entrada}$), dado que o fluxo de armazenagem irá cessar.

Nessa situação, em que os fluxos não mais variam no tempo, diz-se que o circuito está em regime estacionário. O fluxo de entrada será igual ao de saída. Nesse caso, a resistência potencial obedece a Lei de Ohm:

$$\Delta\psi = \psi_{saida} - \psi_{entrada} = R_{potencial} f_{saida} \quad (22)$$

A criação de símbolos simplifica o acoplamento. A Figura 21 traz o símbolo Exemplo para o módulo da estrutura do circuito básico.

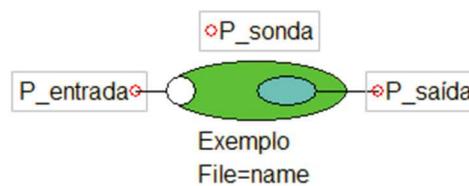


Figura 21 - Símbolo do módulo do circuito básico da Figura 20

A utilização de símbolos permite encapsular o circuito, de modo que o conjunto é utilizado, em um circuito maior, como se fosse um único dispositivo semelhante a um resistor ou um capacitor. Nesse circuito maior ou, pode-se dizer, um nível acima em grau de encapsulamento, aparece o desenho do módulo, o nome (Exemplo) e os respectivos conectores ($P_{entrada}$, $P_{saída}$, P_{sonda}).

As portas de comunicação são de dois tipos: (i) de entrada e saída do fluxo (marcadas por um traço e um círculo vermelho) e (ii) de comunicação (marcadas apenas pelo círculo vermelho), as quais permitem conhecer o potencial de algum ponto do circuito (no exemplo, do ponto marcado por P_{sonda}). Os parâmetros são definidos no relatório de propriedades do subcircuito (Figura 22).

Prefix: Exemplo			
Parameters			
mostrar	Nome	Default	Descrição
<input type="checkbox"/>	Cagua	5 mF	Capacitância
<input type="checkbox"/>	Rc	10 k Ohm	Resistencia associada capacitor
<input type="checkbox"/>	Rqp	5 E5	Resistência ao Fluxo

Figura 22 – Relatório de propriedades do subcircuito Exemplo.

O QUCS permite passar valores para os componentes do subcircuito a partir de um relatório de propriedades, o qual, além do nome da variável e do seu valor padrão (do inglês *Default*), traz uma descrição da variável.

Os módulos podem ser associados em paralelo ou em série (

Figura 23 23). O fluxo resultante da associação em paralelo será a soma algébrica dos fluxos em cada um dos módulos associados. Em regime estacionário, na associação em série, o fluxo que atravessa cada um dos módulos é

sempre o mesmo. Tanto para um caso como para outro, os fluxos serão medidos por ponteiros de corrente (medidores de fluxo hídrico).

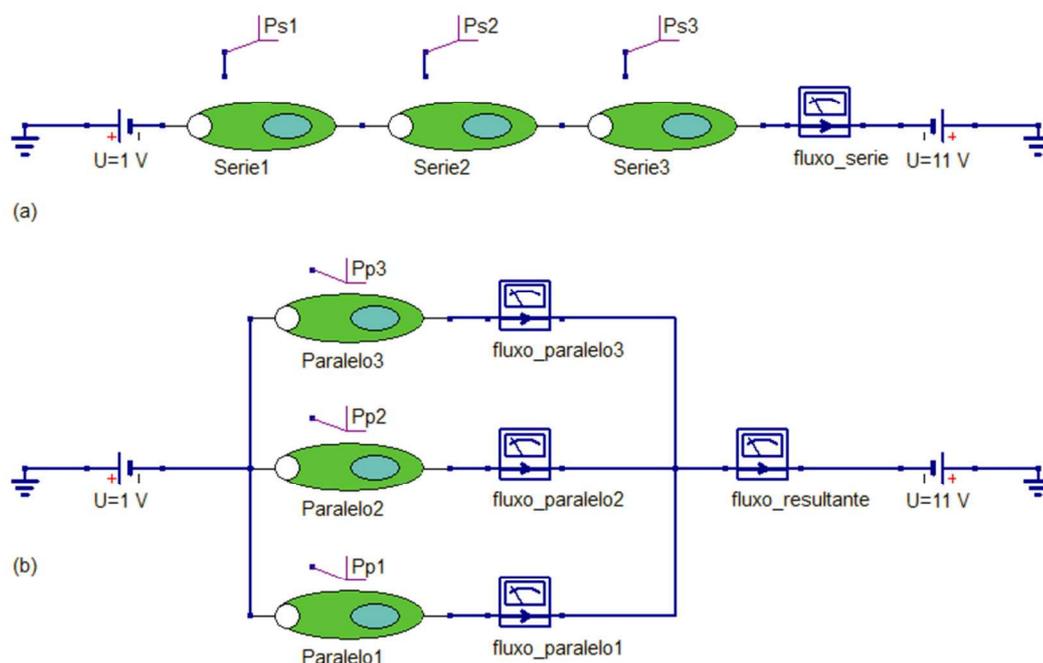


Figura 23 – Associações dos módulos em série e em paralelo

Os módulos (subcircuitos encapsulados) podem ser associados em série (a) ou em paralelo (b). Após um intervalo de tempo relativamente longo, os sistemas entram em regime estacionário, de modo que os fluxos medidos nas ponteiros serão constantes. Na associação em série, o fluxo que atravessa todos os módulos é o mesmo e será medido por uma ponteira de corrente (fluxo_serie). Para a associação em paralelo, o fluxo_resultante é a soma algébrica dos fluxos que atravessam cada ramo e são medidos pelas ponteiros fluxo_paralelo1, fluxo_paralelo2 e fluxo_paralelo3.

3.3. SIMULADORES DE CIRCUITO

Além da solução analítica, a estratégia adotada é a utilização de simuladores de circuito. Há um grande número dessas ferramentas computacionais que, por meio de uma interface gráfica, permitem montar o circuito, impor condições de contorno e iniciar para a solução numérica do sistema de equações, resultando em uma simulação do comportamento dos circuitos. Desenvolvido em 1975, na Universidade de Berkeley, o Spice (*Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis*) foi o primeiro simulador de circuitos conhecido mundialmente. A maioria das ferramentas em uso atualmente tem o SPICE em seu núcleo.

O QUCS (*Quite Universal Circuits Simulation* - Simulador de Circuitos Totalmente Universal), em desenvolvimento desde 2004 por um grupo de pesquisadores liderados por MARGRAF e JAHN (SCORDILIS, 2011), é uma

ferramenta baseada em software livre e aberto (licença GPL). À mesa de trabalho, gerada pela interface gráfica é dada o nome de esquemático. Por simplicidade de apresentação, o esquemático está organizado em quatro áreas: (a) circuitos; (b) equações e simulação; (c) gráficos e tabelas e (d) relatório de propriedades dos componentes, conforme a Figura 24.

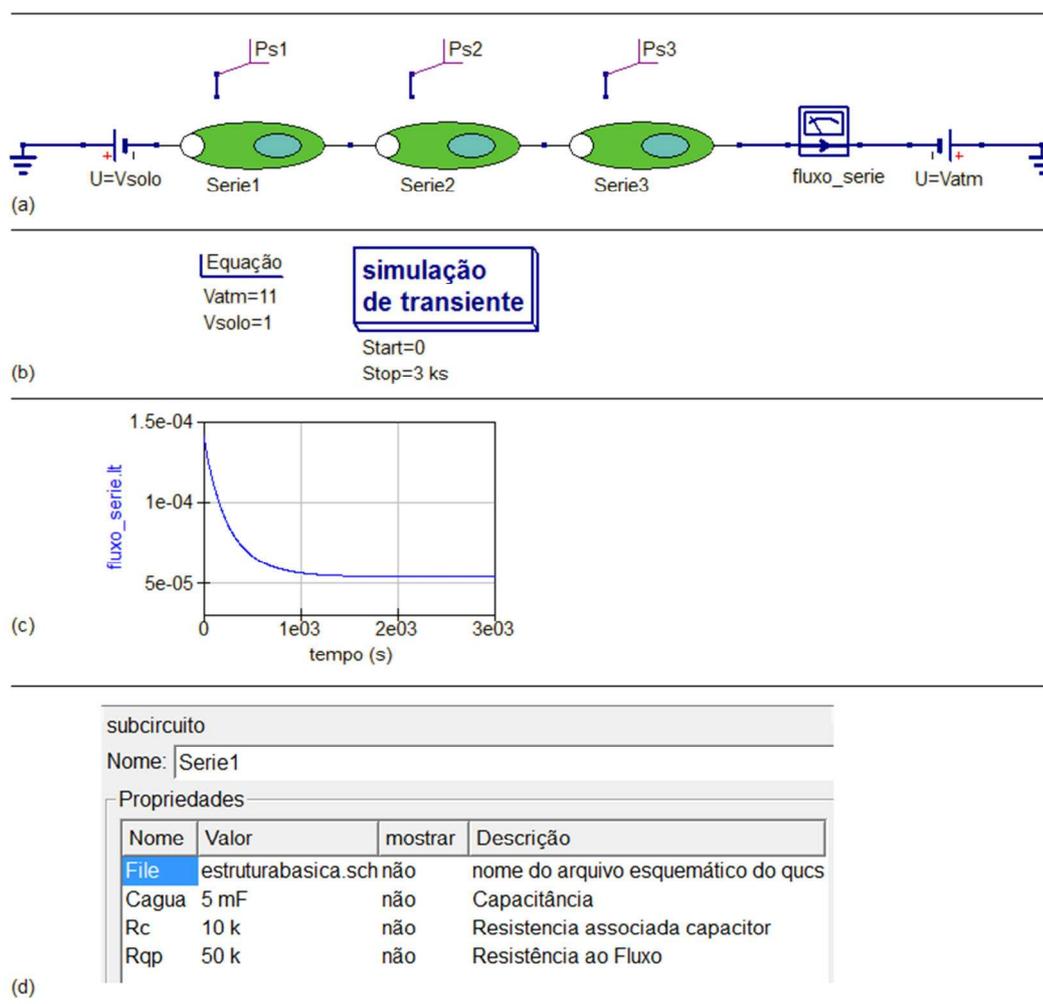


Figura 24 - Áreas de apresentação do esquemático

Os esquemáticos estão organizados em quatro áreas: (a) circuitos, (b) equações e simulação; (c) resultados da simulação (gráficos e tabelas) e (d) relatório de propriedades, especificando as propriedades dos elementos do circuito (capacitâncias e resistências). Neste circuito, em que se aplicam potenciais fixos nas extremidades da associação (a) estabelecidos pelas equações na letra (b), observa-se (na área c) que o fluxo medido na ponteira diminui com o tempo (regime transiente) até tornar-se constante (regime estacionário). Na letra d, estão os nomes, valores e descrição das propriedades dos componentes encapsulados (circuito da Figura 20).

O software utiliza por padrão o método trapezoidal para integração de funções lineares e de Newton-Rapson para não-lineares. O usuário, no entanto, pode alterar os métodos de integração, segundo suas necessidades. Possui também uma grande biblioteca nativa de elementos de circuito (capacitores, resistores, fontes, transistores etc.).

Além de fontes de potencial de corrente contínua (Figura 25), o QUICS permite inserir fontes periódicas, por exemplo, senoidal em que é possível se especificar a amplitude e a frequência de oscilação da fonte ou pulsos retangulares com controle de amplitude e largura do pulso.

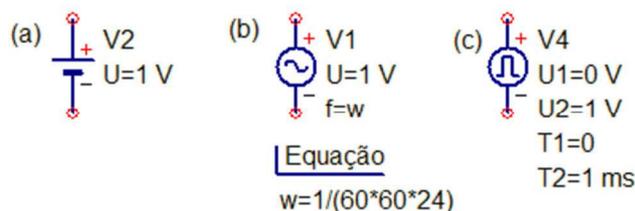


Figura 25 – Fontes de potencial

(a) Potencial constante; (b) Potencial variável senoidal com frequência igual à de rotação da Terra, determinada pela equação “w” e (c) Pulso retangular em que $\Delta U=U_2-U_1$ é a amplitude do pulso em unidades de potencial hídrico (MPA) e $\Delta t=t_2-t_1$ é a largura ou duração do pulso em segundos.

Outro modo de se inserir uma fonte de potencial hídrico é utilizar um capacitor em série. Dado que a carga total nas armaduras é nula, um capacitor em série não representa uma fonte de volume de água. A corrente nos circuito anterior e posterior a um capacitor em série é a mesma, de tal modo que não há alteração da carga total ou, analogamente, do volume hídrico. Assim, a associação (em série) de um capacitor no circuito básico (Figura 26) pode modelar o fluxo de água devido, por exemplo, à diferença de potencial osmótico.

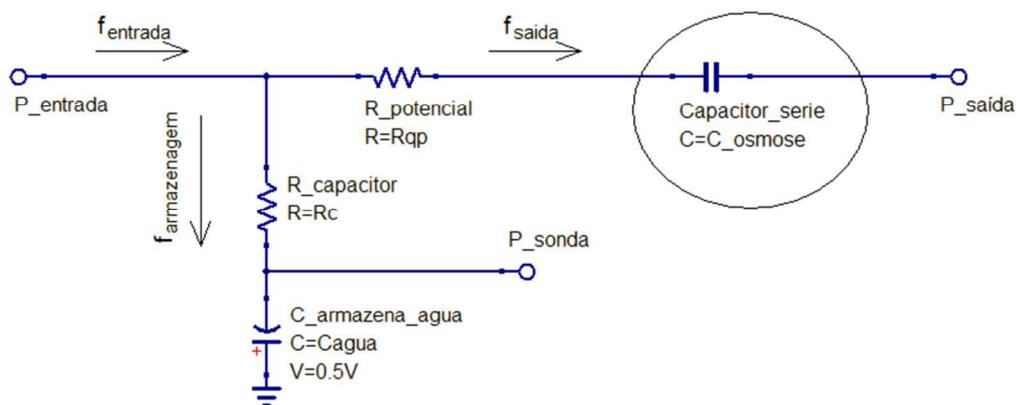


Figura 26 - Circuito básico modificado com um capacitor em série

O capacitor em série, introduzido no circuito básico e marcado por um círculo que o envolve, pode modelar uma fonte de potencial hídrico, por exemplo, devido ao potencial osmótico.

A utilização de transistores ou de dispositivos controlados por equação permite sofisticar o controle do fluxo. Os dois componentes são utilizados para controlar o fluxo através do estômato em simulações diferentes.

3.4. CIRCUITOS RC

O comportamento de circuitos Resistivo-Capacitivos em regime transiente e estacionário pode ser analisado a partir do esquemático da Figura 27. Na área (a), têm-se dois circuitos RC, em que os valores das capacitâncias, das resistências e dos potenciais estão descritos na equação “Constantes”, que está na área b da figura. Os valores de W_i e φ_i são as cargas e as diferenças de potencial sobre os capacitores 1 e 2. Os gráficos do volume de água nos capacitores hídricos foram obtidos com base na expressão $W_i = C \varphi_i$ e estão na área c, junto com os gráficos dos fluxos obtidos pelas ponteiras Fluxo1 e Fluxo2. O gráfico da razão $\frac{\Delta W}{\Delta \varphi} = \frac{W_2 - W_1}{\varphi_2 - \varphi_1}$ (CC=deltaW/deltaV no esquemático) mostra que essa tende ao valor da capacitância quando a corrente para o capacitor tende a zero.

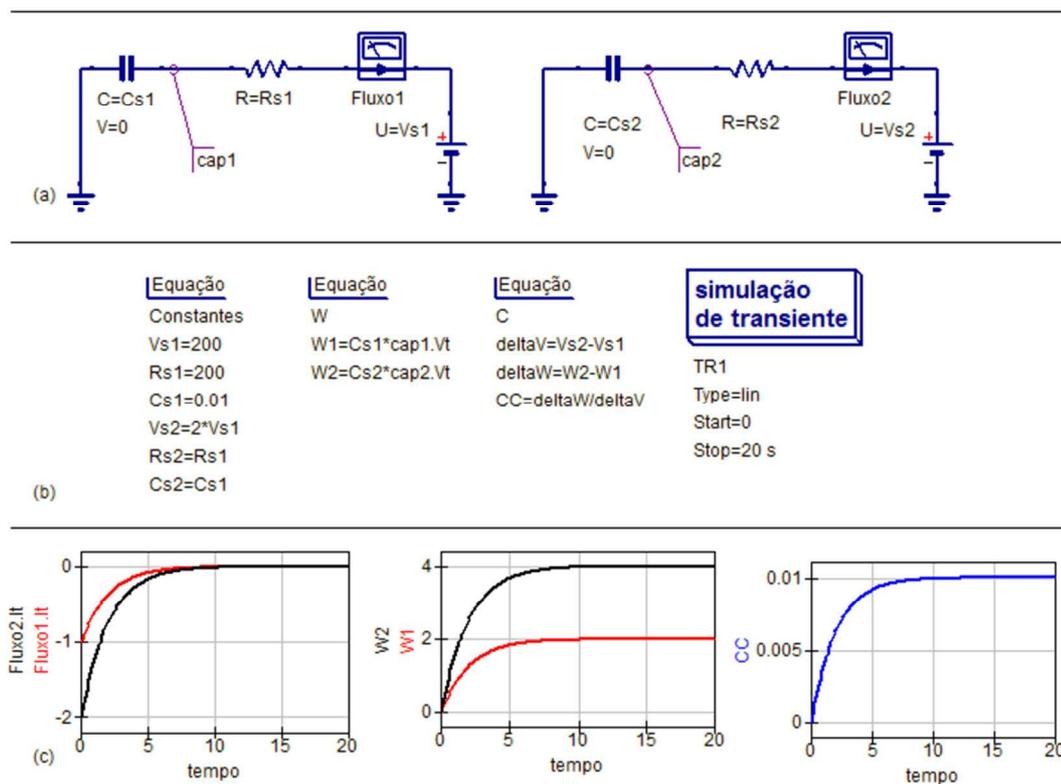


Figura 27 – Esquemático com dois circuitos RC.

Na área (a) têm-se os circuitos com valores genéricos para os componentes. As ponteiras de corrente medem os fluxos enquanto os potenciais sobre os capacitores são medidos pelos rótulos cap1 e cap2. Na área (b) as equações e o tipo de simulação. Na área (c) os resultados das medidas são apresentados em gráficos: carga sobre os capacitores, fluxos e razão entre as diferenças da carga e do potencial hídrico. Observa-se até, aproximadamente 10 s, o comportamento transitório do circuito. Após esse instante, os fluxos (primeiro gráfico à esquerda) tornam-se nulos, pois os capacitores estão completamente carregados. Os valores de carga são diferentes (gráfico central), pois estão submetidos a potenciais diferentes. O valor razão $CC=\text{delta}W/\text{delta}V$ tende para o valor da capacitância e pode ser obtido por essa relação apenas para o estado estacionário (gráfico a direita).

Assim, ressalta-se que estimativas para situações transientes necessitam de, a priori, se associar a resistência no cálculo da capacitância. Em um modelo simplificado, a capacitância C , das estruturas de armazenamento de água no sistema, relaciona-se à quantidade de água extraível no solo e nos vacúolos celulares; a bateria fornece a diferença de potencial hídrico, $\Delta\psi$, sobre o sistema e a resistência do resistor equivalente, R , é calculada a partir da soma de todas as resistências em série e em paralelo que o sistema apresenta.

Aplicando a lei das malhas a qualquer um dos circuitos da Figura 27, obtêm-se a seguinte equação diferencial, para a descarga de capacitor:

$$\Delta\psi + \frac{W}{C} - R \frac{dW}{dt} = 0 \quad (23)$$

As quantidades de água armazenada, em qualquer instante de tempo t e no instante inicial, são denotadas por W e W_0 . A (23) fornece a seguinte equação integral:

$$\int_{W_0}^W \frac{dW}{C\Delta\psi + W} = \int_0^t \frac{dt}{RC} \quad (24)$$

cujas soluções, para a quantidade de água no solo, é o módulo da expressão:

$$W = (C\Delta\psi + W_0) \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) - C\Delta\psi \quad (25)$$

e para o fluxo de água:

$$f = -\frac{(C\Delta\psi + W_0)}{RC} \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \quad (26)$$

O sinal negativo em (26) deve-se ao sentido do fluxo ser sempre contrário ao do gradiente do potencial hídrico. A descarga exponencial do capacitor possui um tempo característico $\tau = RC$, que equivale aproximadamente 63 % da quantidade máxima de água armazenada.

Combinando as duas equações, retorna-se à equação (23), em que se observa a dependência linear do fluxo com a quantidade de água armazenada e com a diferença do potencial hídrico:

$$f = -\frac{\Delta\psi}{R} - \frac{W}{\tau} \quad (27)$$

A justeza dessa equação está no ajuste da medida do fluxo (na ponteira) e do fluxo calculado, no gráfico à esquerda da Figura 28.

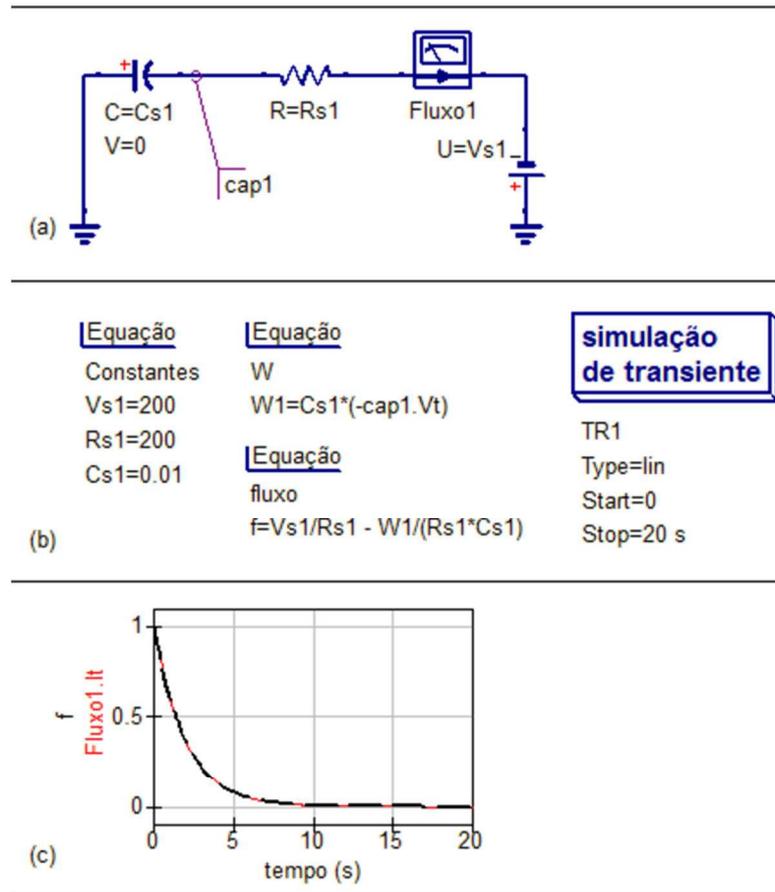


Figura 28 – Fluxo medido e calculado no circuito RC
 (a) Circuito RC com capacitor polarizado; (b) Equações; (c) Gráfico do fluxo medido na ponteira (Fluxo1.It) e calculado pela equação (26).

Para o circuito básico da Figura 20, a aplicação da equação (27) dá o seguinte fluxo de armazenagem no regime transiente:

$$f_{armazenagem} = - \left(\frac{\psi_{sonda} - \psi_{entrada}}{R_{capacitor}} \right) - \left(\frac{W}{\tau} \right) \quad (28)$$

3.5. VALORES REPRESENTATIVOS

A distribuição localizada de elementos de circuito não implica na discretização de fluxos e potenciais hídricos, ao mesmo tempo em que permite estabelecer, sobre esses elementos, valores iniciais.

As funções fisiológicas vegetais são fortemente dependentes da temperatura, enquanto que dados disponíveis são mais facilmente encontrados para temperaturas próximas de 25°C. Assim, por consistência, os valores

utilizados neste trabalho são referentes, sempre que possível, aos obtidos ou estimados a essa temperatura.

A Tabela 6, elaborada a partir de valores extraídos de Nobel (2009), apresenta o perfil do potencial hídrico a 25°C no SPA. A coluna F marca a fase da água podendo ser gás/vapor d'água (g), líquido (l) ou equilíbrio de fases (g/l). UR é a umidade relativa do ar. Dias mais secos apresentam umidade relativa menor e potencial hídrico mais negativo. A coluna z marca a altura a partir do colo da raiz. Valores abaixo do nível do solo não influenciam significativamente: seriam necessárias profundidades da raiz de 10m para alterar em 0,1 MPa no potencial gravitacional. Os potenciais hídricos somados, matricial (ψ_m), de soluto (ψ_s), gravitacional (ψ_g) e de vapor (ψ_v), resultam no potencial hídrico da água (ψ_w), todos em MPa.

	LOCALIZAÇÃO	F	z	ψ_m	ψ_s	ψ_g	UR	ψ_v	ψ_w
Atmosfera	Logo após a camada limite	g	10m			0.1	50%	-95.2	-95.1
	Próximo ao estômato (externo)	g	10m			0.1	60%	-70.1	-70.0
Planta	Próximo ao estômato (interno)	g	10m			0.1	95%	-7.0	-6.9
	Poros da parede celular	g/l	10m			0.1		-0.9	-0.8
	Parede celular (mesófilo)	l	10m	-0.4	-0.5	0.1			-0.8
	Vacúolo da célula do mesófilo	l	10m	0.2	-1.1	0.1			-0.8
	Xilema da folha	l	10m	-0.8	-0.1	0.1			-0.8
	Xilema da raiz	l	0m	-0.5	-0.1	0.0			-0.6
Solo	Próximo da raiz	l	0m	-0.4	-0.1	0.0			-0.5
	1,0 cm da raiz	l	0m	-0.2	-0.1	0.0			-0.3

Tabela 6 – Perfil do Potencial hídrico no SPA a 25°C.

A água nos diversos pontos do contínuo solo-planta-atmosfera pode se apresentar em (g) fase gasosa (vapor d'água) ou (l) fase líquida. Nos poros da parede celular a água está em equilíbrio de fases g/l. A altura z é medida a partir no nível do solo. Os valores ψ_m , ψ_s , ψ_g , ψ_v , ψ_w são respectivamente os potenciais hídricos matricial, osmótico, gravitacional, de vapor e total. Todos os valores estão em MPa. UR é a umidade relativa do ar no ponto considerado.

Fonte: Nobel (2009).

4. RESULTADOS

4.1. MÓDULOS

O contínuo Solo-Planta-Atmosfera pode ser estudado a partir de um arranjo de dispositivos hídricos que armazenam e controlam o fluxo. Propomos a criação de sete módulos diferentes referentes aos componentes: solo, raiz, caule, folha, estômato, atmosfera e precipitação. Os símbolos desses módulos estão na Figura 29.

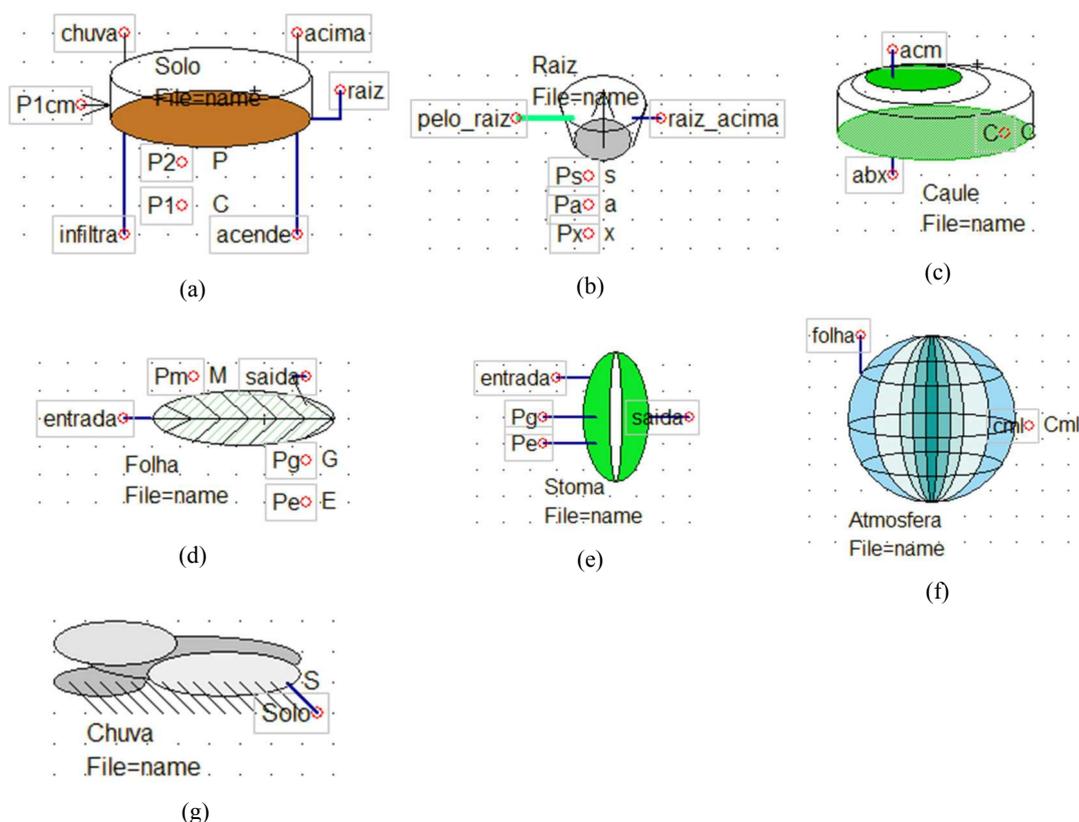


Figura 29 – Símbolos dos módulos.

O contínuo solo-planta-atmosfera do fluxo hídrico foi elaborado a partir de sete módulos independentes: (a) solo; (b); raiz; (c) caule; (d) folha; (e) estômato; (f) atmosfera e (g) chuva, que se ligam a partir das portas identificadas por um segmento de reta azul, ligado a um pequeno círculo vermelho. As portas marcadas por círculo vermelho são sondas que permitem conhecer a quantidade de água em cada capacitor.

Todos os componentes serão constituídos de três módulos conforme a Figura 30. O solo, por exemplo, será constituído de três módulos em paralelo. Cada módulo solo liga-se a um módulo raiz. Apenas os módulos do caule ligam-se em série entre si e com as junções dos módulos da raiz, de um lado, e das folhas, do outro. Folha e estômatos estão em paralelo. Finalmente um único módulo para a atmosfera foi modelado.

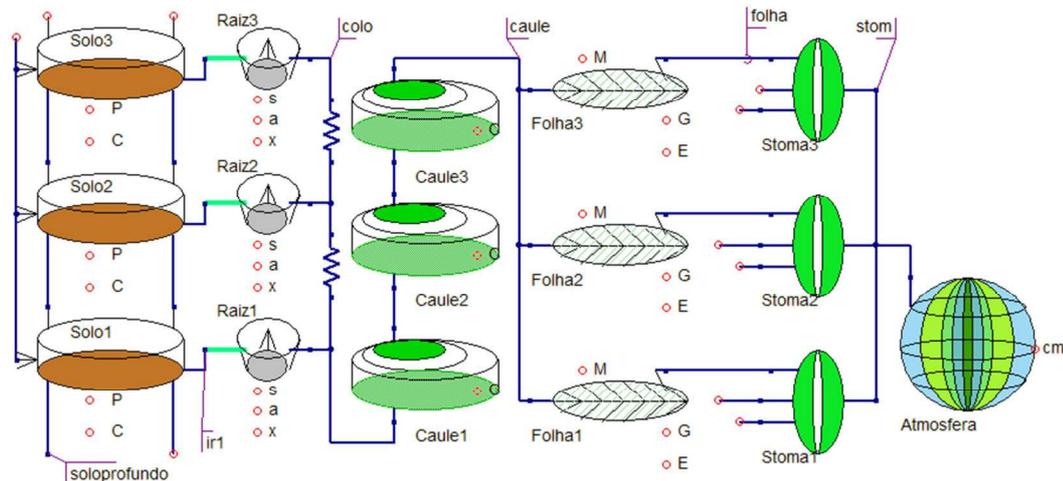


Figura 30 – Circuito Solo-Planta-Atmosfera

O solo e os componentes da planta foram subdivididos em três módulos. Os módulos encapsulados podem se conectar em paralelo (*solo-raiz* e *folha-estômato*) ou em série (*raiz-caule-folha* e *estômato-atmosfera*). Nessa montagem, apenas um módulo é utilizado para a atmosfera.

A primeira linha da Tabela 7 apresenta a diferença de potencial hídrico aplicada a cada componente de acordo com o perfil adotado na Tabela 6. A diferença de potencial hídrico em cada módulo (segunda linha da Tabela 7) é igual à diferença de potencial hídrico sob cada componente, com exceção do caule, que por estar ligado em série, cada módulo está sob uma diferença de potencial igual a um terço da diferença de potencial aplicada ao componente.

	Solo	Raiz	Caule	Folha	Estômato	Atmosfera
$\Delta\psi_c$ (MPa)	0,200	0,100	0,200	6,100	63,100	25,100
$\Delta\psi_m$ (MPa)	0,200	0,100	0,067	6,100	63,100	25,100
R_c (10^5 MPa.m ³ .s)	2,99	1,50	2,99	91,3	945	376
f_m (10^{-7} m ³ .s ⁻¹)	2,23	2,23	6,68	2,23	2,23	6,68
R_m (10^5 MPa.m ³ .s)	8,98	4,49	0,998	274	$2,83 \times 10^3$	376

Tabela 7 – Cálculo das resistências do circuito principal por módulo.

O subíndice “c” remete ao valor da grandeza relativa ao componente, isto é, solo, raiz, caule, folha, estômato e atmosfera, enquanto que o subíndice “m”, ao valor da grandeza em cada um dos módulos do componente. A diferença de potencial hídrico no componente ($\Delta\psi_c$ – primeira linha da tabela) é obtida dos valores representativos descritos na Tabela 6. Para o caule, a diferença de potencial hídrico em cada módulo ($\Delta\psi_m$) é um terço de ($\Delta\psi_c$), dado que a associação é em série. Para todos os outros componentes, em que a associação é em paralelo, $\Delta\psi_c = \Delta\psi_m$. Dado que o fluxo em todos os componentes é $6,68 \times 10^{-7}$ m³.s⁻¹, calculam-se os fluxos em cada módulo (f_m) e a resistência ao fluxo hídrico em cada módulo (R_m), adequadamente, considerando-se o caso de ser a associação dos módulos em paralelo (caule) ou em série (solo e todos os outros componentes da árvore).

A aplicação da lei dos nós impõe que, para circuitos em paralelo, o fluxo de saída total é a soma dos fluxos de saída individuais e, para circuitos em série, os fluxos de entrada e saída devem ser iguais. Com base na Tabela 4, o fluxo hídrico médio para o regime estacionário é estimado em:

$$f = 6,68 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (29)$$

O cálculo é feito subtraindo-se o fluxo relativo à redução de volume do caule ($0,0063 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$) do total transpirado ($0,064 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$) e divide-se pelos 86400 segundos do dia.

A terceira linha da Tabela 7 é obtida com a aplicação da Lei de Ohm sobre cada componente: $R_c = f / \Delta\psi$.

O fluxo em cada módulo, quando os módulos estiverem associados em série é o mesmo ($f = 6,68 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Isso acontece nos módulos do caule. Se a associação é em paralelo, porém, o fluxo de cada módulo é um terço do fluxo total no componente (solo, raiz, folha e estômato).

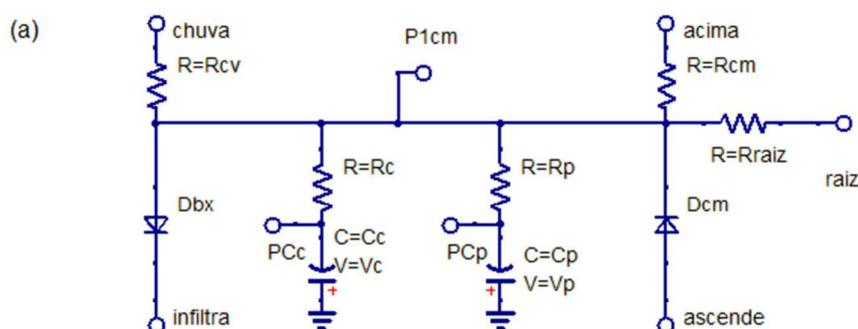
A última linha da Tabela 7, resistência ao fluxo em cada módulo, é obtida dividindo-se a resistência do componente por três, no caso de associação em série (caule) e multiplicando-se por três no caso de associação em paralelo.

Nas subseções seguintes, para a construção do circuito de cada módulo, essas informações contidas na Tabela 7 foram utilizadas. As razões para as partições de resistências e capacitâncias são apresentadas. Pretendem-se valores, nas ordens de grandeza possíveis das variáveis envolvidas, de modo a se estudar o comportamento dinâmico de uma planta genérica.

A partir da aplicação de diferenças de potencial hídrico sobre os terminais de cada módulo (linha 2 da Tabela 7), realizou-se uma simulação em regime transiente. Após uma dezena de tempos característicos, pode-se dizer que o sistema está em estado estacionário; cessam os fluxos de armazenagem e a resistência do sistema será apenas a resistência potencial. Assim, os resultados serão consistentes, quando em regime estacionário, o fluxo medido para cada módulo for igual ao calculado, constante na linha 5 da Tabela 7.

4.1.1. SOLO

Cada camada de solo contém oito portas de comunicação (conforme Figura 31), das quais duas são de entrada: chuva, que, como o nome sugere, liga-se ao circuito de precipitação (ou à camada superior) e ascende, por onde deve ascender o fluxo da camada de baixo; as portas, infiltra e acima, permitem o fluxo saindo deste módulo solo para módulos que representam camadas abaixo e acima, respectivamente, se existirem; a porta raiz liga-se ao pelo da raiz; porta P1cm permite fixar o valor do potencial a um cm do pelo da raiz. Há, finalmente, duas portas de sondagem para a quantidade de água nos capacitores (PCc e PCp).



(b) Prefix: Solo

Parameters

mostrar	Nome	Default	Descrição
não	Rc	0.898 M Ohm	Resistência Associada ao Capacitor Capital (maior)
não	Rp	8.98 M Ohm	Resistência Associada ao Capacitor Secundário (pequeno)
não	Rcv	270 M Ohm	Resistência de Entrada (Precipitação)
não	Rcm	270 M Ohm	Resistência para camada superior
não	Rraiz	0.898 M Ohm	Resistência solo-raiz
não	Cc	70 mF	Capacitor capital (maior)
não	Cp	14 mF	Capacitor pequeno (secundário)
não	Vc	0.3 V	Potencial Hídrico capital
não	Vp	0.3 V	Potencial Hídrico pequeno

Figura 31 – Circuito do solo.

(a) Esquema do circuito. O módulo solo possui cinco portas de fluxo: chuva – que se liga ao módulo “precipitação”; infiltra – ligada a algum módulo solo abaixo, permitindo o fluxo de água para camadas mais profundas do solo; ascende – que permite a entrada de água de camadas mais profundas por percolação no perfil do solo; acima – por onde a água sai em direção a camadas superiores e a porta raiz ligada ao módulo “raiz”. Há duas portas de sondagem para a quantidade de água nos capacitores (PCc e PCp) e uma porta utilizada para fixação do potencial hídrico a um cm da raiz (P1cm). Há dois circuitos Resistivo-Capacitivos ligados em paralelo (capital: Rc e Cc e pequeno: Rp e Cp).

(b) Relatório de Parâmetros com nomes, descrições e valores para as variáveis associadas a cada dispositivo do circuito.

A resistência por módulo (entre os pontos P1cm e raiz), de acordo com a Tabela 7, é $8,89 \times 10^5 \text{ MPa.m}^{-3}.\text{s}$. Essa resistência fornece uma condutividade hidráulica da ordem de $10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$, de acordo com o exposto no Apêndice A, valor que concorda com o expresso na Tabela 1.

Para se calcular a resistência entre camadas, considera-se que a água deve percorrer para atravessar as camadas é 3,30 m, isto é, distância 330 vezes maior que a solo-raiz (entre as portas P1cm e raiz).

Uma simulação transiente (Figura 32) evidencia o comportamento da associação em paralelo dos arranjos capacitivo-resistivos: (R_c e C_c) e (R_p e C_p).

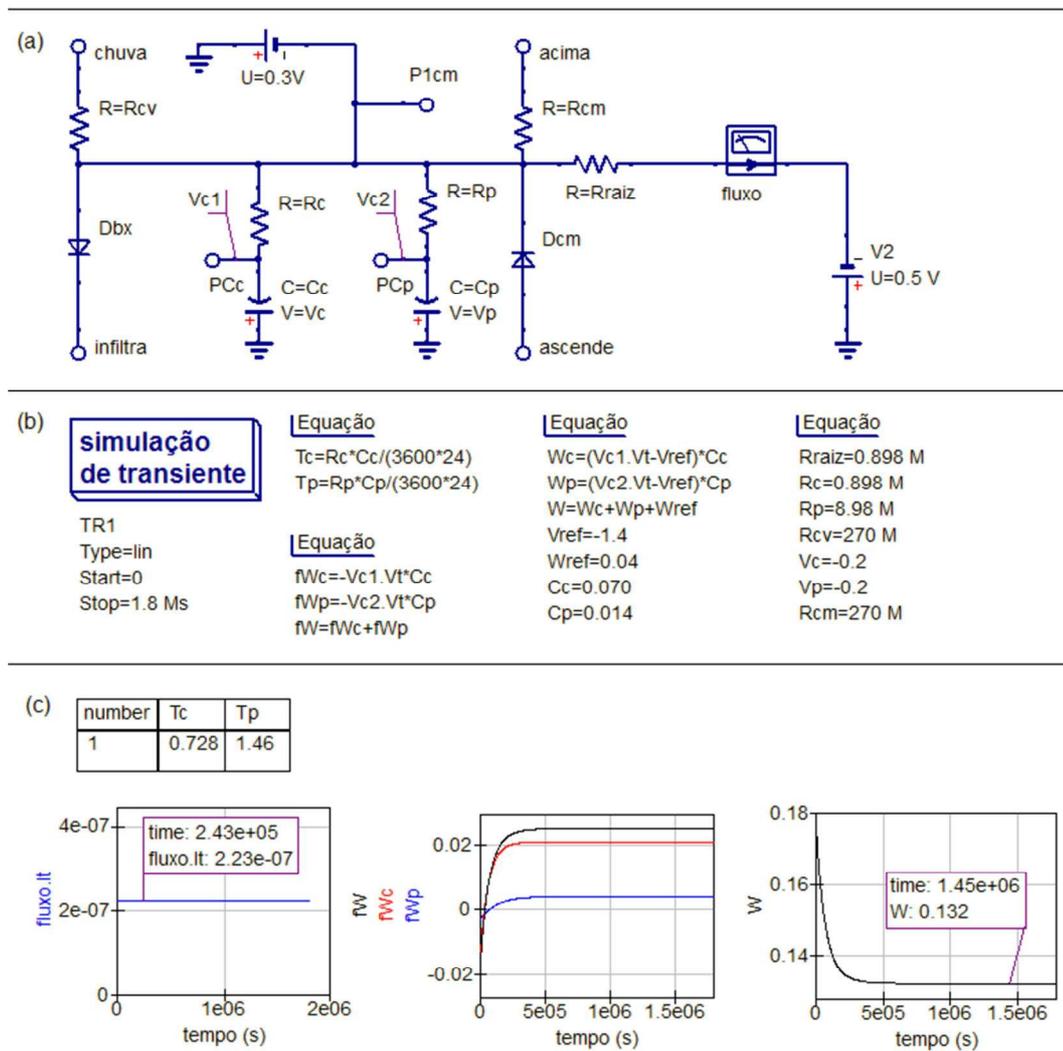


Figura 32 – Circuito do solo para uma simulação transiente.

(a) Esquema de montagem para uma simulação transiente. Mantém-se uma diferença de potencial hídrico constante de 0.2 MPa entre os terminais P1cm e raiz. (b) As equações determinam as propriedades de cada componente (resistência, capacitância etc.). A partir das equações também são calculados o valor da carga e do fluxo de carga em cada instante em direção ao capacitor. (c) Após um intervalo de tempo da ordem de 4×10^5 s, o circuito entra em regime estacionário, o fluxo principal mantém-se em $2,23 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e os fluxos acumulados nos capacitores não mais se alteram. Na tabela (à esquerda), observa-se que o tempo característico do capacitor C_p é o dobro de C_c , de modo que se pode observar no gráfico do fluxo hídrico acumulado para esses capacitores (ao centro), que fW_c (menor tempo característico) domina em um primeiro momento, enquanto fW_p (maior tempo característico) domina para tempos maiores. À direita, observa-se o gráfico da quantidade de água no solo. Em regime estacionário, alcança $0,132 \text{ m}^3$ por camada, o que equivale a aproximadamente $0,40 \text{ m}^3$ para as três camadas, em acordo com os valores da Tabela 2.

Conectar as portas a fonte de potencial hídrico de corrente contínua significa estabelecer uma condição de contorno equivalente a manter o solo sempre com a mesma quantidade de água.

Para estimar as capacitâncias de um solo em que as raízes estão contidas em uma parcela de 10 m^3 de volume ($Z_r=10\text{m}$ e $A=1\text{m}^2$), utilizou-se os valores da Tabela 2, ao se aplicar a expressão $W = C\psi$ (análoga a $Q=CV$) para cada estado estacionário:

$$W_c = C_c \psi_0 + C_p \psi_0 \text{ e } W_p = C_s \psi_1 + C_p \psi_1 \quad (30)$$

Considerando-se a capacitância C_p , um quinto de C_s , obtém-se para as 3 camadas de solo $C_c = 21 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ ou $70 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$ por camada.

Os tempos característicos são dados pela relação $\tau = CR$, de modo que $\tau_p = 10\tau_c$ e, em consequência, o ramo com tempo característico menor ($\tau_c = 0,728$ dia) domina inicialmente o comportamento da carga do conjunto (Gráfico dos fluxos). Desse modo, a capacitância equivalente é uma combinação linear das capacitâncias individuais e pode descrever a maior dificuldade experimentada pela planta para retirar água do solo com o baixo conteúdo de água, devido ao longo tempo de descarga da água contida no capacitor C_p .

4.1.2. RAIZ

As vias de entrada do fluxo no pelo da raiz – apoplástica e simplástica/transmembrana – são modeladas, a partir do circuito RC básico (Figura 20), pelo acoplamento em paralelo das resistências de entrada. Um terceiro circuito RC básico modela o xilema da raiz (Figura 33).

Três sondas (P_s – simplástica, P_a – apoplástica e P_x – xilema) permitem conhecer, a cada instante, o potencial hídrico em cada capacitor (ψ_{rs} , ψ_{ra} e ψ_{rx}). A quantidade de água que fluiu é calculada pela expressão:

$$W_{raiz} = C_s \psi_{rs} + C_a \psi_{ra} + C_x \psi_{rx} \quad (31)$$

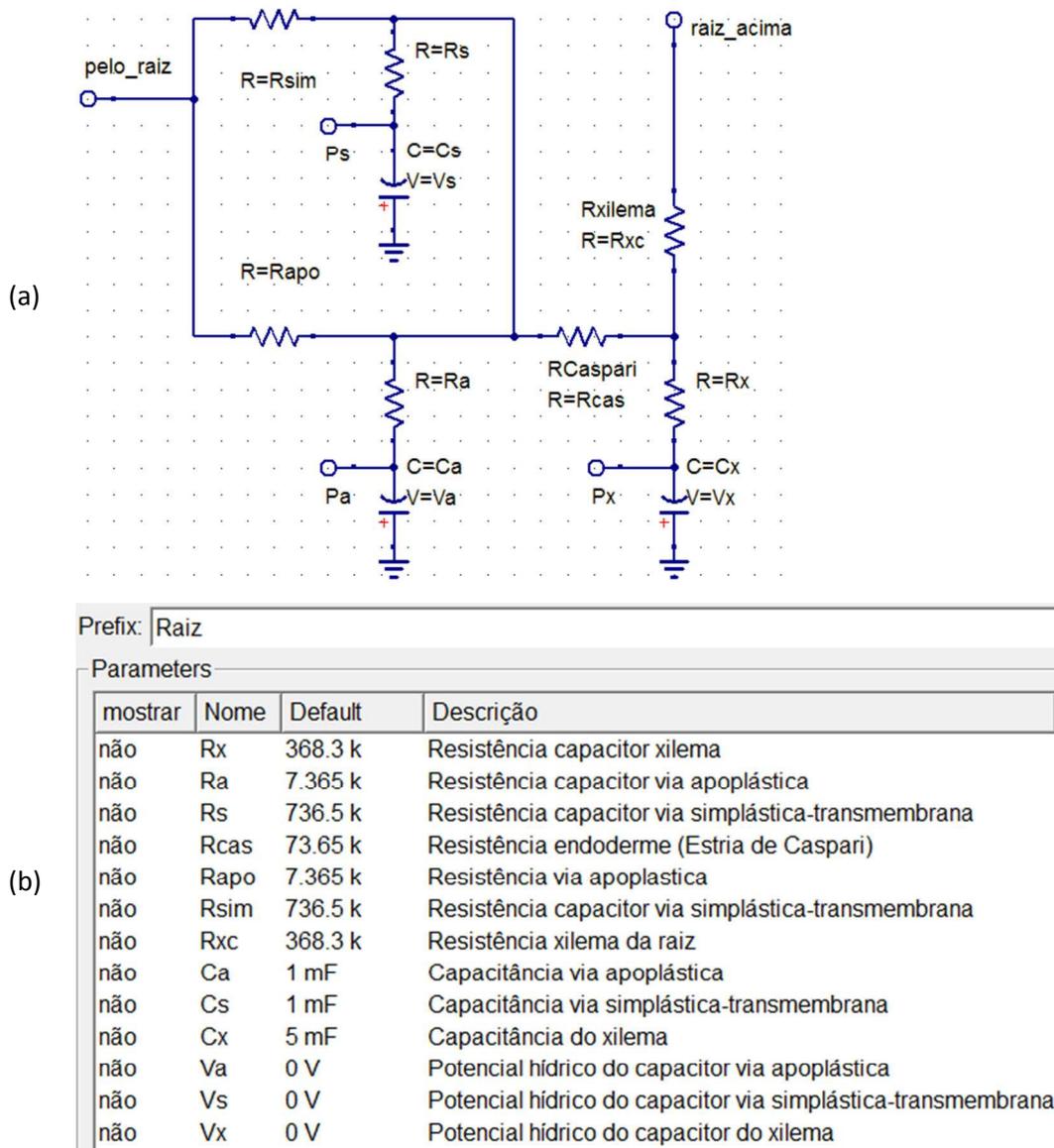


Figura 33 – Circuito da raiz

(a) Esquema do circuito da raiz. Tem-se uma porta de entrada (pelo_raiz), a qual se liga ao solo e uma de saída (raiz_acima), que se liga à camada superior da raiz ou se liga ao primeiro módulo do caule (no colo da raiz). Este circuito é a combinação de três esquemas básicos (conforme descrito na Figura 20 na seção 3.2): as duas vias de entrada com seus armazenamentos de água (apoplástica e simplástica/transmembrana) e a via do xilema, após a unificação das vias de entrada na endoderme devido às estrias de Caspari (Rcaspari); (b) Relatório de Parâmetros com nomes, descrições e valores para as variáveis associadas a cada dispositivo do circuito.

Os valores das resistências do circuito da Figura 33, expressos no relatório de parâmetros, atendem às seguintes considerações:

- A resistência equivalente do circuito principal por módulo será a soma das resistências do córtex (R_{cortex}), da endoderme (R_{cas}) e do xilema (R_{xc}):

$$R = R_{cortex} + R_{cas} + R_{xc} \quad (32)$$

- b. A resistência das camadas de células do córtex (duas a três dezenas) será modelada na forma;

$$1/R_{cortex} = 1/R_{apo} + 1/R_{sim} \quad (33)$$

- c. A resistência na via transmembrana, para cada camada de célula (considerou-se 25 camadas), não deve diferir muito da resistência da endoderme em que o fluxo deve atravessar a membrana plasmática. Para a via simplástica, a resistência é bem menor devido aos desmotubos. Um valor intermediário está uma ordem de grandeza acima da resistência da endoderme:

$$R_{sim} = 10 R_{cas} \quad (34)$$

- d. A resistência na via apoplástica é muito baixa, pois a água não precisa atravessar qualquer membrana. Estima-se umas duas ordens de grandeza da resistência na via simplástica.

$$R_{apo} = 10^{-2} R_{sim} \quad (35)$$

- e. Após atravessar a endoderme, a água flui via simplástica/transmembrana por poucas camadas de células (por hipótese metade da camada do córtex):

$$R_{xc} = R_{sim}/2 \quad (36)$$

Combinando as relações (32) e (33), com as estimativas (34) a (36), obtêm-se $R_{cas} = 7,36 \text{ E4 MPa. s. m}^{-2}$. Esse valor pode ser obtido ao se considerar a resistência na endoderme, devido às estrias de Caspari, razão da resistividade transmembrana – que é da ordem de $2,5 \times 10^6 \text{ MPa. s. m}^{-1}$. (TAIZ e ZEIGER, 1998) – pela área da superfície de membrana celular da endoderme por onde a água deverá fluir. Se essa área for da ordem de 34 m^2 , a endoderme contribui com 16% da resistência total da raiz. Forte é a resistência que surge na restrição do fluxo da via apoplástica.

A respeito da quantidade de água armazenada nas raízes, essa é bem menor que a armazenada no solo – uma a duas ordens de grandeza a menos, pois o volume de raízes é menor que o volume de solo.

As resistências associadas aos capacitores devem ser baixas, comparáveis as resistências ao fluxo principal (considerando que para esvaziar os contêineres devem atravessar as mesmas membranas). A realização de uma simulação transiente (Figura 34) mostra a evolução do fluxo hídrico e da carga que flui dos capacitores até o estado estacionário. Os baixos valores para os tempos característicos (em comparação com o solo) indicam a fragilidade da raiz ao ressecamento do solo.

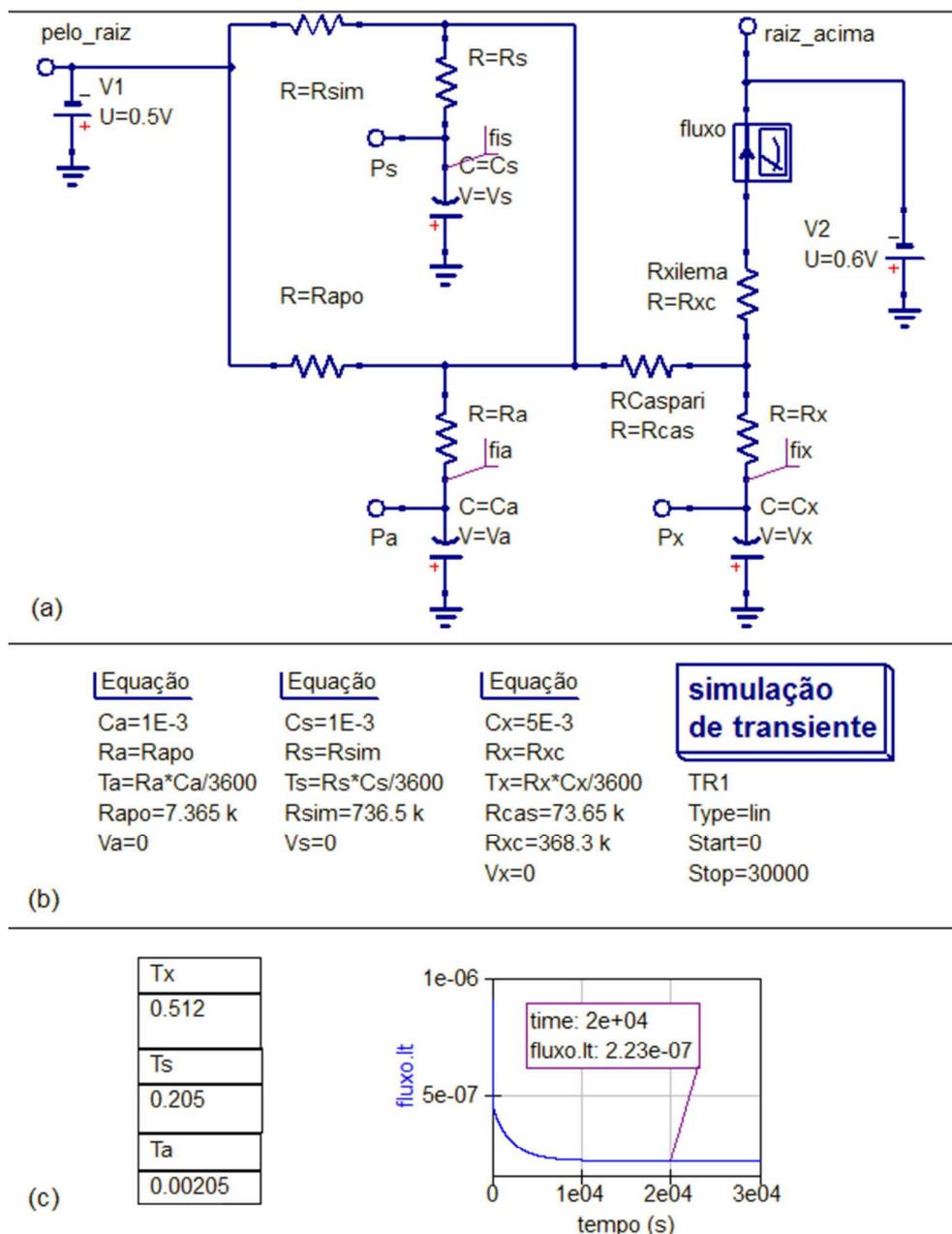


Figura 34 – Circuito da raiz para uma simulação transiente

(a) Circuito raiz submetido a uma diferença de potencial hídrico constante de 0.1 MPa; (b) As equações determinam as propriedades de cada componente (resistência, capacitância....) e calculam o tempo característico de cada circuito RC (c) Quadro com tempos característicos calculados em dias. Considera-se a via apoplástica a mais fácil de entrada de água. O gráfico do fluxo contra o tempo mostra que após algum tempo o sistema entra em regime estacionário com o fluxo medido na ponteira igual a $2,23 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, conforme reza a Tabela 7.

ANÁLISE DO ACOPLAMENTO DAS CAMADAS DE SOLO E RAIZ

Para uma análise se os módulos respondem adequadamente ao prescrito até o momento, fez-se um acoplamento dos módulos do solo e da raiz (Figura 35).

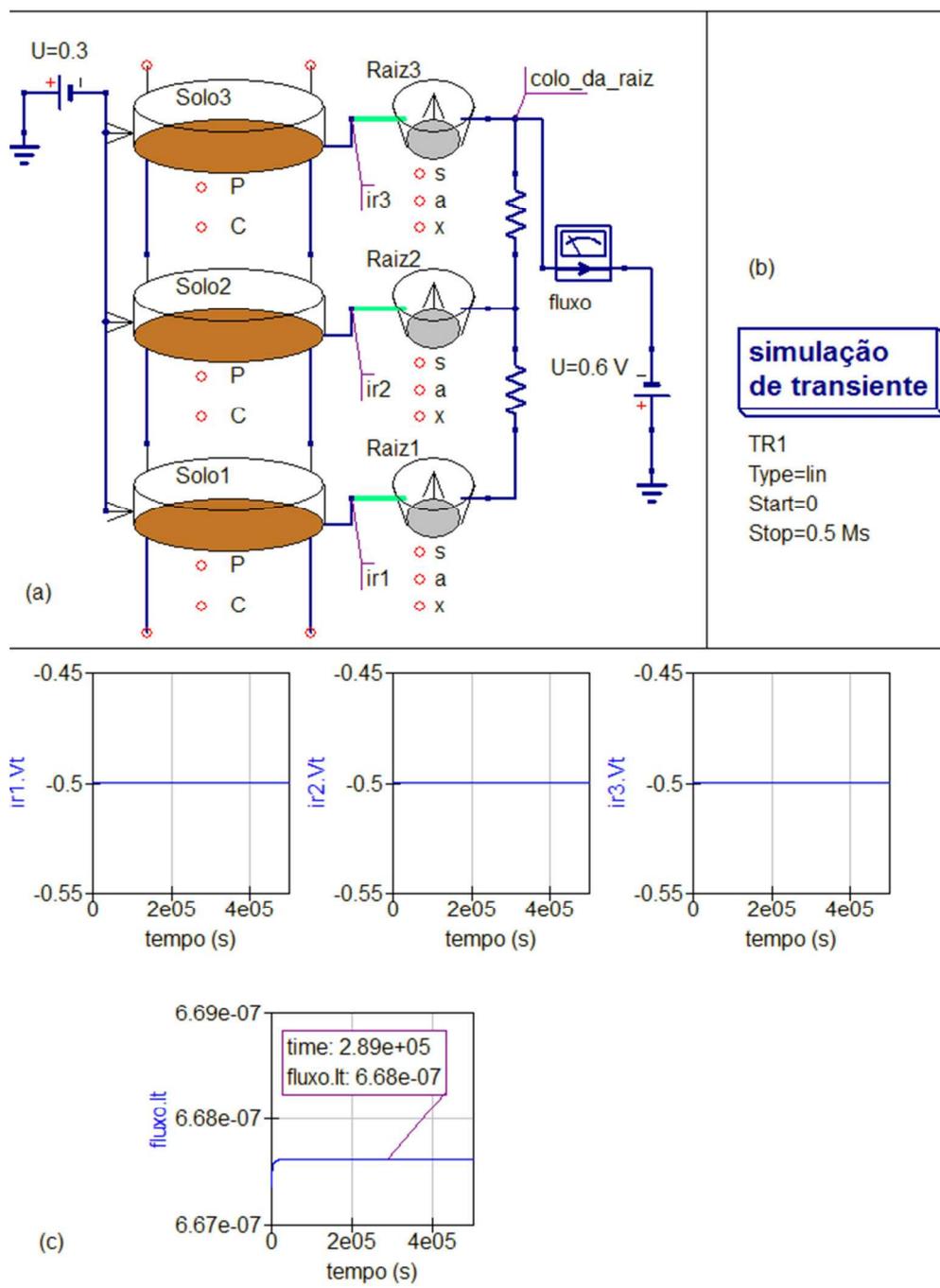


Figura 35 – Acoplamento solo e parte subterrânea da planta até o colo da raiz

(a) As três camadas de solo estão acopladas em paralelo entre si e em série com as camadas da raiz. As portas “P,” “C” dos módulos de solo e portas “s,” “a” e “x” das camadas de raiz estão disponíveis para a conexão de sensores de potencial quando necessário. (b) Uma simulação transiente é aplicada (c) Os sensores de potencial (ir1, ir2 e ir3) no pelo da raiz apresentam potencial igual a $-0,5$ MPa (os três primeiros gráficos), de acordo com o esperado, assim como o obtido para o fluxo hídrico (quarto gráfico).

A Figura 35 apresenta a associação em paralelo de três camadas de solo estão acopladas em paralelo entre si e em série com as camadas da raiz. As portas que permitem conhecer o potencial sobre as placas dos capacitores e, por conseguinte, as quantidades de água nos reservatórios estão disponíveis para a conexão de sensores: portas “P,” “C” dos módulos de solo e portas “s,” “a” e “x”

das camadas de raiz. Após a aplicação de uma simulação transiente por longo tempo, até que se alcance o regime estacionário obtêm-se os valores do potencial sobre os pelos da raiz (ir_1 , ir_2 e ir_3) e o valor do fluxo é medido em uma ponteira no colo da raiz. Observa-se que os valores estão adequados aos esperados, de acordo com a Tabela 6 e a relação (29).

4.1.3. CAULE

A Figura 36 apresenta o circuito para o caule. A soma das resistências R_{ac} e R_{ab} é a resistência total ao fluxo para a camada, a qual se liga à camada abaixo pela porta abx e à camada acima por meio da porta acm . A porta C é a sonda para determinação do conteúdo de água do capacitor.

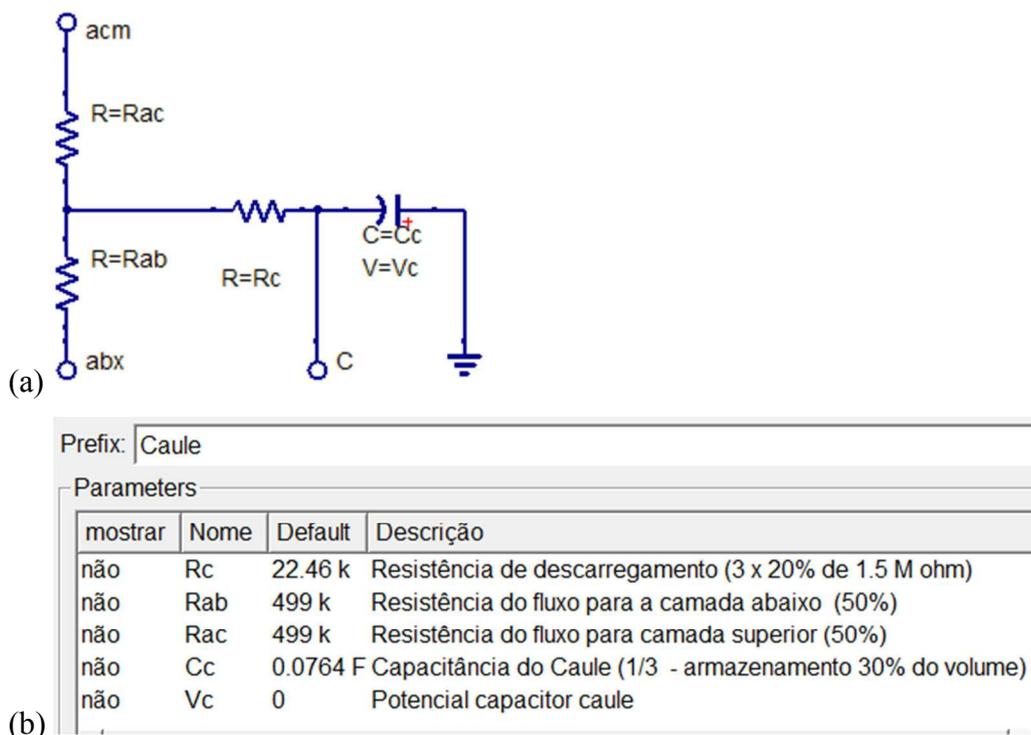


Figura 36 – Circuito do caule.

(a) Esquemático com duas portas: abx – de onde chega o fluxo das camadas abaixo (da raiz se for ligado ao último módulo da raiz ou de um módulo de caule abaixo) – e acm – por onde sai o fluxo para as camadas superiores (outro módulo de caule ou para um módulo de folha); (b) Relatório de Parâmetros das resistências, da capacitância e do potencial hídrico inicial sobre o capacitor do caule.

O procedimento para a modelagem do circuito para o caule é semelhante à adotada para os circuitos anteriores, isto é, calculam-se as resistências e as capacitâncias em função dos valores representativos dos

potenciais hídricos (Tabela 6), do fluxo no componente para o estado estacionário (relação (30) e da quantidade de água no componente).

Nesse caso, porém, parte-se de valores anteriormente estimados por Nobel (2009), constantes na Tabela 4, com exceção do valor da capacitância. O valor da resistência, neste trabalho, difere do valor apresentado pelo autor. A razão é a consistência exigida da aplicação da lei de Ohm. Vamos considerar a relação, proposta por Nobel (2009), de 20% e 80% para as resistências associada à capacitância e a resistência ao fluxo contínuo do componente ($R_{\text{potencial}} = 2,995 \times 10^5 \text{ MPa.m}^3.\text{s}$). Por estarem os três módulos ligados em paralelo, as resistências associadas aos capacitores devem ser multiplicadas por três.

Para se estimar a capacitância do caule, considera-se que a variação da quantidade de água no capacitor hídrico é igual ao fluxo de água durante o período diurno $f = \frac{\Delta W}{\Delta t}$, isto é, $0,0063 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1} = 7,29 \text{ E-7 m}^3.\text{s}^{-1}$. O restante dos $0,064 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de água transpirada são originários de outros reservatórios.

A quantidade de água no caule varia, dependendo da espécie e da época do ano, entre 20 e 50% do volume do caule. Considerando um valor intermediário (30%), encontra-se para a quantidade de água armazenada, W , o valor de $0,0942 \text{ m}^3$, isto é, $W = 0,3 \times 0,314 \text{ m}^3$.

Resolvendo-se (23) para a capacitância, obtém-se:

$$C = W / (fR - \Delta\psi) \quad (37)$$

Aplicando uma diferença de potencial hídrico de $-0,4 \text{ MPa}$ encontra-se $0,2292 \text{ m}^3.\text{MPa}^{-1}$ para a capacitância, o que resulta em um tempo característico de aproximadamente 4,77 horas.

4.1.4. FOLHA

Para a modelagem da copa, cada modulo acoplado pode representar uma camada de folhas, de modo que, ao número de camadas possa corresponder o índice de área foliar; pode-se também optar por modelar às diferenças entre folhas na superfície da copa ou interiores, novas ou em processo de senescência etc.

De acordo com a Tabela 6, a diferença de potencial hídrico entre o xilema da folha e o mesófilo é essencialmente nula. A diferença de potencial hídrico de -0.8 a -6.9 MPa está marcada na proximidade do poro estomático, na câmara subestomática. O consumo de energia na mudança de fase de líquido para

vapor está modelado pela queda de potencial sobre o resistor (R_{vapor}) na câmara subestomática.

As folhas possuem um teor de água na ordem de 60% a 80%, com relação à massa total. Esse percentual depende da taxa de transpiração e, portanto, do horário do dia em que for medido. A relação das massas secas, folhas, tronco, casca, galhos e outros componentes, depende fortemente da espécie, da idade da planta, dentre outras variáveis. Lelles et al. (2001) observaram que para o *Eucalyptus camaldulensis*, na redução de espaçamento de 9x9 para 3x1 m², a relação da massa seca das folhas com relação à da planta também se reduziu de 11% para 4,8%, enquanto o percentual relativo à casca cresceu de 3,7% para 6,3%. Os autores observaram relação semelhante para o *Eucalyptus pellita*.

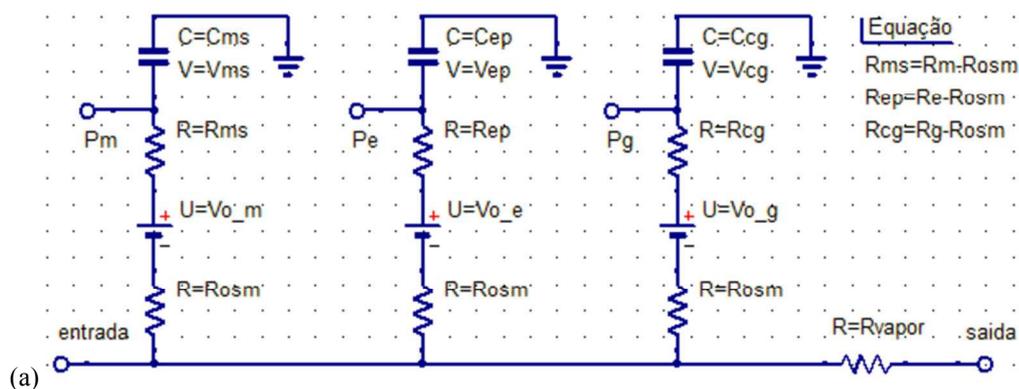
Os potenciais de turgescência, funções das quantidades de água armazenadas nas células do mesófilo, da epiderme e da célula guarda, são dados pelas sondas sobre os capacitores que se ligam em paralelo ao circuito hídrico principal. As fontes de potencial V_{o_m} , V_{o_e} e V_{o_g} representam a contribuição dos potenciais osmóticos para o potencial hídrico. Para esse estudo consideraremos o potencial osmótico constante, porém, na planta, pode ser alterado por meio do transporte ativo de metabólitos, ou no processo fotossintético que aumenta a concentração de metabólitos no citoplasma, para citar alguns aportes disponíveis à planta. O potencial osmótico mais negativo que o potencial hídrico além da parede celular, faz com que o potencial de turgescência seja positivo, isto é, a célula fica turgida, de modo que a parede celular pressiona a água a sair da célula. A perda da turgescência é marcada pelo valor nulo desse potencial.

Desse modo, considerando-se a diversidade, a armazenagem nas folhas será semelhante à do xilema do caule, com prevalência do mesófilo (70%), seguido da epiderme (20%) e das células guarda (10%). Serão adotadas as relações por camada, para o estado estacionário:

$$\begin{aligned} \text{Folha Túrgida} & \dots\dots\dots W(\psi = 0,2 \text{ MPa}) = 0,05 \text{ m}^3 \\ \text{Perda da Turgescência} & \dots\dots W(\psi = 0,0 \text{ MPa}) = 0,04 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (38)$$

Também para o estado estacionário, é válida a relação $\Delta W = C\Delta\psi$, resultando para a capacitância do módulo: $C = 0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{MPa}^{-1}$.

A Figura 37 apresenta o módulo como aplicado ao circuito.



(a)

Prefix: Folha

Parameters

mostrar	Nome	Default	Descrição
não	Cms	0.035	Capacitor Mesofilo
não	Rm	1 M	Resistência Associada Capacitor Mesofilo
não	Vms	0.2	Potencial Hídrico Capacitor Mesofilo
não	Cep	0.01	Capacitor epiderme
não	Re	5 M	Resistência Associada Capacitor epiderme
não	Vep	0.2	Potencial Hídrico Capacitor epiderme
não	Ccg	0.005	Capacitor célula guarda
não	Rg	10 M	Resistência Associada Capacitor célula guarda
não	Vcg	0.2	Potencial Hídrico Capacitor célula guarda
não	Rosm	0.1 M	Resistência Associada variação capacitor osmótico
não	Vo_m	1.1	Potencial Hídrico Capacitor mesofilo
não	Vo_e	0.8	Potencial Hídrico Capacitor epiderme
não	Vo_g	1	Potencial Hídrico Capacitor célula guarda
não	Rvapor	27.4 M	Resistência camara subestomática

(b)

Figura 37 – Circuito da folha.

(a) Esquemático com três associações RC, modelando os armazenamentos de água no mesófilo, na epiderme e nas células guarda. As fontes V_{o_m} , V_{o_e} e V_{o_g} representam uma “injeção” de energia no capacitor devido aos potenciais osmóticos. (b) Relatório de Parâmetros com os respectivos valores das propriedades dos componentes.

As três associações Resistor-Capacitor modelam os armazenamentos de água no mesófilo, na epiderme e nas células guarda, respectivamente. As fontes V_{o_m} , V_{o_e} e V_{o_g} representam uma “injeção” de energia no capacitor e, desse modo, modelam a manutenção dos potenciais osmóticos pelas células por meio da síntese de carboidratos ou da ação da bomba de potássio. As portas P_m , P_e e P_g permitem conhecer as pressões hidrostáticas e, portanto, as quantidades de água, acima da plasmólise, nos mesófilos, nas células da epiderme e nas células guarda, respectivamente. P_g é também sinal da célula guarda para o estômato e P_e é o sinal de realimentação negativa para o estômato.

Na Figura 38, uma simulação transiente isolada é realizada para o circuito da folha. Nessa simulação, o valor do fluxo medido na ponteira é o pretendido. Os tempos característicos revelam a vulnerabilidade de cada estrutura ao estresse hídrico. Assim, observa-se perda de turgescência das células da

epiderme mais facilmente que das células guarda, de modo que o tempo característico dessa é maior que o daquela.

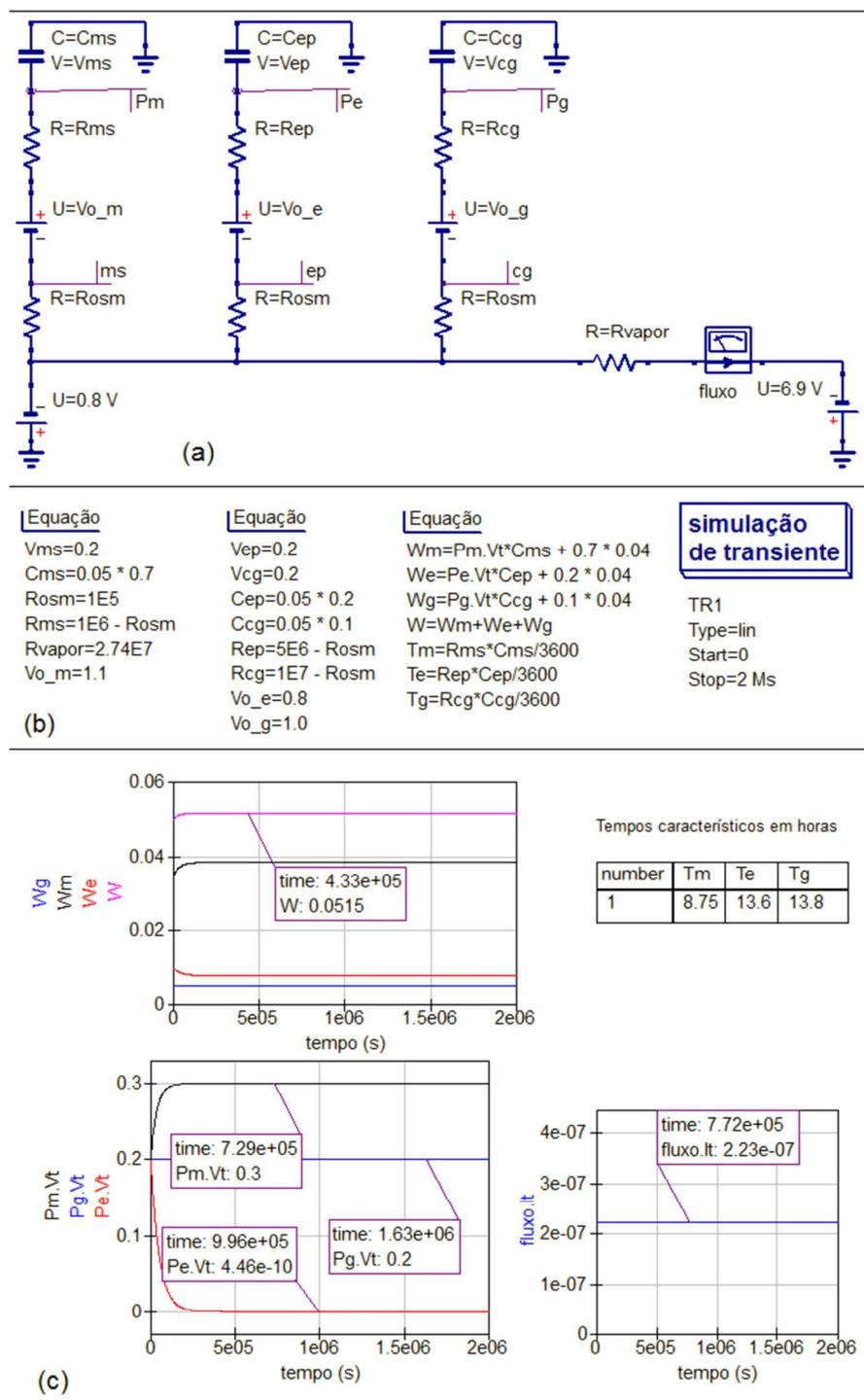


Figura 38 – Simulação de regime transiente para a folha.

(a) Esquemático em que o circuito está submetido a uma diferença de potencial hídrico de 6,1 MPa; (b) Equações para definição dos parâmetros e cálculo dos tempos característicos e volume de água em cada capacitor e (c) O gráfico da quantidade de água na folha resulta, após a entrada em regime estacionário no valor de $W=0,0515 \text{ m}^3$ para uma diferença de potencial hídrico média de 0,2 MPa (de acordo com o gráfico de P_m , P_g e P_e , abaixo a esquerda na área c). Observa-se que o fluxo constante de $2,23 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ é rapidamente alcançado. Os tempos característicos baixos revelam a vulnerabilidade das folhas ao estresse hídrico.

A quantidade de água na folha resulta, após a entrada em regime estacionário, no valor de $W=0,0515 \text{ m}^3$, próximo ao que prevê a equação (38) para uma diferença de potencial hídrico de 0,2 MPa (turgescência) sobre os capacitores (valor médio para os potenciais: P_m , P_g e P_e , mesófilo, células guarda e células da epiderme, respectivamente).

4.1.5. ESTÔMATO

A continuidade do fluxo que sai do circuito folha ($2,23E-7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e entra no circuito estômato, no estado estacionário, sob uma diferença de potencial hídrico de 63,1 MPa, fornece a resistência estomática $R = 2,83E8 \text{ MPa s.m}^{-3}$. O alto valor para a resistência estomática permite à planta fazer frente à forte diferença de pressão de vapor dentro e fora da câmara subestomática.

A resistência estomática, no entanto, é função da abertura estomática, a qual é controlada pelos potenciais de turgescência das células guarda e epidérmicas (ψ_{Pg} e ψ_{Pe} , que são as saídas P_g e P_e , respectivamente, do circuito folha), pela relação:

$$a_s = b_g(\psi_{Pg} + m \psi_{Pe}) \quad (39)$$

Essa relação é uma adequação das formuladas por Buckley (2005) – equação (15) – e Weyers e Meidner (1990) – equação (16). Quer-se fazer, da variável a_s , um índice para a abertura estomática, que varie de 0 a 1, quando R varie de R_0 a $R_{m\acute{a}x}$. O poro estomático estará completamente fechado quando os potenciais hidrostáticos forem nulos.

$$R = R_0 + (1 - a_s)(R_{m\acute{a}x} - R_0) \quad (40)$$

Por simplicidade, quando $\psi_{Pe} = 0$, o poro estomático estará completamente aberto com $\psi_{Pg} \geq 0,15 \text{ MPa}$. Dentro da ordem de grandeza dos exemplos citados por Costa (2001), podemos estipular a vantagem mecânica da epiderme em $-1,5$. Considerou-se nula a fase de tensão. Assim, a expressão para resistência ficará:

$$R = R_0 + [1 - 10(\psi_{Pg} - 1,5 \psi_{Pe})](R_{m\acute{a}x} - R_0) \quad (41)$$

A resistividade estomática, segundo Fitter e Ray (2002), pode variar até duas ordens de grandeza; para 25°C varia de $0,8 \text{ s cm}^{-1}$ (para o estômato totalmente aberto) a 80 s cm^{-1} (com o estômato totalmente fechado – quando a resistividade estomática se iguala à cuticular). Nobel (2009), por sua vez, calcula

o valor mínimo em 20 s cm^{-1} e considera infinita a resistividade estomática quando estômatos estão completamente fechados.

A aplicação da equação (14) fornece os valores de resistividade estomática máxima e mínima para 25°C . Primeiro, faz-se necessário se calcular a relação entre as variações de concentração de água e potencial hídrico para as posições interna e externa ao estômato.

Posição no estômato	Umidade Relativa	ψ (MPa)	c_{wv} (mol m^{-3})	$\Delta c/\Delta\psi$ ($\text{mol m}^{-3}\text{MPa}^{-1}$)
---	100%	---	1,28	
Interno	95%	-7,000	1,216	
Externo	60%	-70,100	0,768	
Δ (diferença)	---	63,100	0,448	0,00710

Tabela 8 – Potencial hídrico e concentração de vapor d'água, para o estômato.
Fonte: Nobel (2009)

O volume molar do vapor d'água para $298,15 \text{ K}$ (25°C) é, aproximadamente, $0,0245 \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$. A área estomática efetiva, A_e , resulta do produto da área dos poros estomáticos, por metro quadrado, multiplicada pela área foliar por camada. Para o cenário proposto, que inclui uma densidade estomática de 150 estômatos por mm^2 , os quais possuem dimensões de $5 \mu\text{m}$ por $10 \mu\text{m}$, a área efetiva será $A_e = 0,04 \text{ m}^2$. A resistência estomática da camada resulta do produto da resistividade pela área estomática efetiva. Considerou-se finalmente uma ordem de grandeza entre o estômato aberto e fechado para a condutividade estomática.

Estômato	g (m.s^{-1})	k ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$)	ρ (MPa.s.m^{-1})	R (MPa.s.m^{-3})
Aberto	-	-	-	2,830E+08
Fechado	0,0001	1,736E-08	5,761E+07	1,440E+09

Tabela 9 – Estimativa da Resistência Estomática

Para o estômato aberto é o valor obtido para o fluxo contínuo dos módulos anteriores. Com o estômato completamente fechado, considera-se uma condutividade $g=10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. A resistividade (ρ), calculada a partir da equação (9), é o inverso da condutividade (k). A resistência estomática é o produto da resistividade pela área estomática efetiva (A_e), a qual vale $0,04 \text{ m}^2$.

As Tabelas 8 e 9 resumem os cálculos da estimativa da resistência estomática máxima ($R_{\text{máx}}=1,44\text{E}9 \text{ MPa.s.m}^{-3}$). A resistência estomática mínima será considerada $R = 2,83\text{E}8 \text{ MPa s.m}^{-3}$, que, para pressão hidrostática nula na célula epidérmica, vale para as pressões hidrostática na célula guarda acima de um determinado valor para P_g . Nesse caso, estipulamos: $P_g = 0,1$.

Assim, o módulo estomato é constituído por um resistor, cuja resistência varia com a abertura estomática, de acordo com a expressão:

$$\begin{cases} R = R_{m\acute{a}x} = 1,44E9 & \text{para } \psi_{Pg} < 1,5 \psi_{Pe} \\ R = R_0 - 10 (\psi_{Pg} - 1,5 \psi_{Pe})(R_{m\acute{a}x} - R_0) & \text{para } 1,5 \psi_{Pe} \leq \psi_{Pg} \leq 1,5 \psi_{Pe} + 0,10 \\ R = R_0 = 2,83E8 & \text{para } \psi_{Pg} > 1,5 \psi_{Pe} + 0,10 \end{cases} \quad (42)$$

A equação (42) é a própria equação (41), com limites superior e inferior. Esse resistor é construído por um EDD (sigla em inglês para Dispositivo Definido por Equação – *Equation Defined Device*), composto por três ramos: “entrada”, “Pg” e “Pe”. Somente o ramo que possui saída definida por equação poderá ser alterado com o decorrer do tempo: no caso, somente o ramo 1. Assim, Pg e Pe se mantêm constantes. A corrente de saída é definida pela equação (42), que na linguagem QUCS, ficará:

$$\begin{aligned} I1 = V1 / ((V2 < m * V3) ? Rm : \\ (V2 > (1/bg) + m * V3) ? R0 : \\ R0 + (1 - bg * (V2 - m * V3)) * (Rm - R0)) \end{aligned} \quad (43)$$

O ponto de interrogação e os dois pontos podem ser traduzidos, pelo “se” condicional, seguido de “então faça”, na seguinte sequência lógica:

$$\begin{aligned} I1 = V1 / R \\ \text{Se } (V2 < m * V3) \text{ então faça} \\ \quad R = Rm \\ \text{Ou Se } (V2 > (1/bg) + m * V3) \text{ então faça} \\ \quad R = R0 \\ \text{Se nenhuma anterior for satisfeita, faça} \\ \quad R = R0 + (1 - bg * (V2 - m * V3)) * (Rm - R0) \\ \text{Fim} \end{aligned} \quad (44)$$

Os valores V2 e V3 (potenciais dos ramos 2 e 3), correspondem às entradas Pg e Pe – potenciais hídricos dos capacitores das células guarda e da célula epidérmica da folha, respectivamente, conforme especifica a Figura 39.

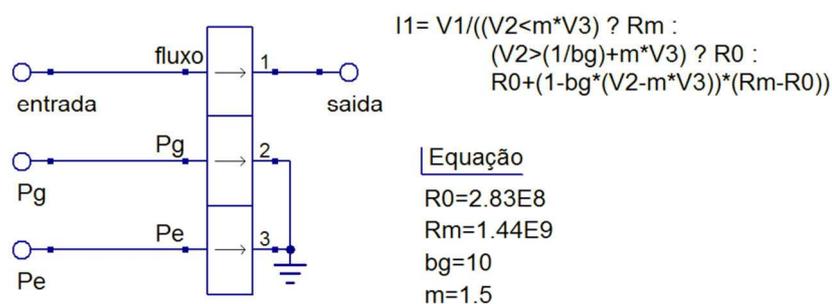


Figura 39 – Circuito do estômato

O circuito é composto por um único dispositivo EDD (sigla em inglês para Dispositivo Definido por Equação) com três ramos de potencial hídrico: entrada, Pg e Pe. O dispositivo possui uma única saída, cuja corrente de saída obedece à equação I1. Assim, apenas o potencial entrada pode sofrer variação no tempo.

Uma simulação (Figura 40) permite observar que, como apenas o fluxo do primeiro ramo (I1) é definido, os potenciais V2 e V3 não são alterados; são apenas sinais que controlam I1, como mostram os gráficos de Vc2 e Vc3.

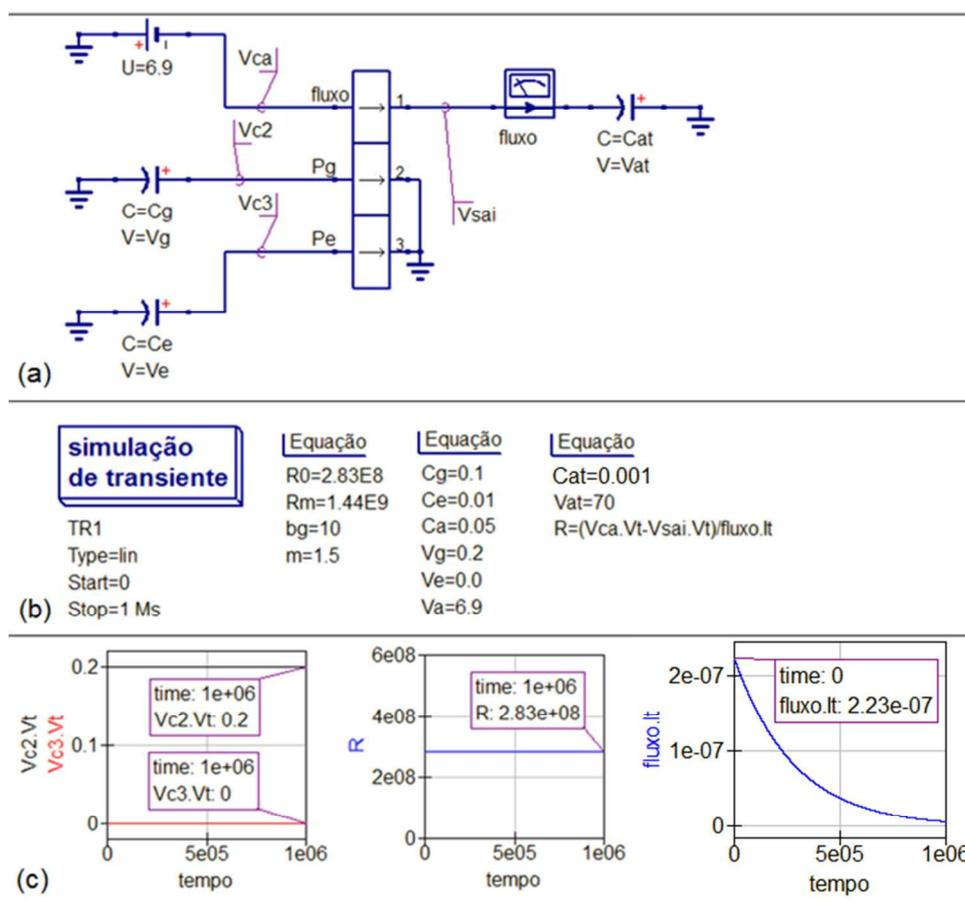


Figura 40 – Simulação transiente do circuito do estômato com Vg e Ve constantes.

(a) Circuito estômato ligado aos potenciais das células epidérmicas (Ve) e células estomáticas (Vg) constantes. Os subíndices a, e, g e at referem-se respectivamente ao fluxo principal, à célula epidérmica, às células guarda e à atmosfera; (b) Equações definindo valores dos potenciais, resistências, capacitâncias e calculando o valor da resistência em função do tempo do circuito; (c) No gráfico à esquerda, Vc2 e Vc3 relacionam-se a Vg e Ve, os quais se mantêm constantes. A resistência (gráfico ao centro) também se mantém constante, pois é função de Vg e Ve. O fluxo, no entanto (gráfico à direita) decai exponencialmente, devido à carga de Cat.

O capacitor Cat, que representa o poder evaporativo da atmosfera, está em carga de modo que o fluxo cai exponencialmente, apesar da resistência do primeiro ramo da EDD manter-se constante (Gráfico de R na área c da Figura 40).

Na Figura 41, o capacitor Cg (células guarda) está em descarga, de modo que Pg decai exponencialmente. Observa-se, com a redução de Pg, que a resistência estomática permanece constante para $Pg \geq 0,1$. Abaixo desse valor, a resistência aumenta até alcançar o valor máximo, equivalente à resistência da epiderme de $1,44 E+9 \text{ MPa.m}^{-3} \cdot \text{s}$.

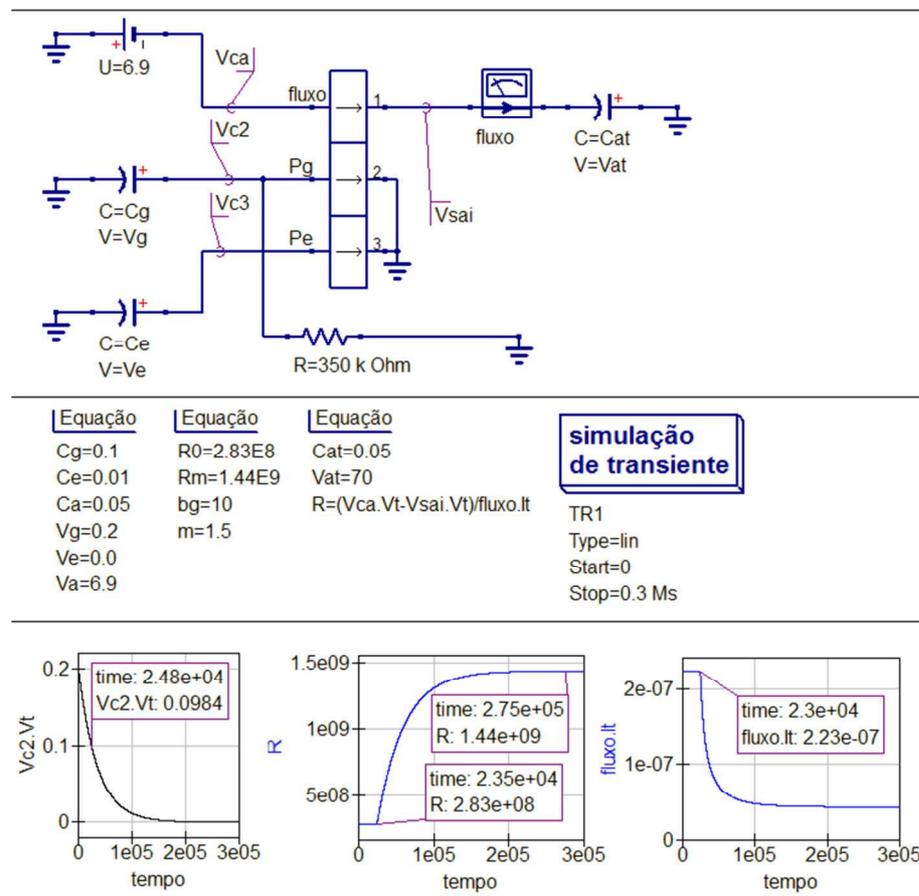


Figura 41 – Simulação transiente do circuito do estômato com descarga de Pg.

(a) Circuito estômato ligado aos potenciais das células epidérmicas (V_e) e células estomáticas (V_g) constantes. Os subíndices a, e, g e at referem-se respectivamente ao fluxo principal, à célula epidérmica, às células guarda e à atmosfera. O capacitor que representa o armazenamento de água na célula estomática está em descarga – Pg está ligado à terra por uma resistência. (b) Equações definindo valores dos potenciais, resistências, capacitâncias e calculando o valor da resistência em função do tempo do circuito; (c) No gráfico à esquerda, V_{c2} e V_{c3} relacionam-se a V_g e V_e , os quais se mantêm constantes. A resistência (gráfico ao centro) também se mantém constante, pois é função de V_e e V_g . O fluxo, no entanto (gráfico à direita) decai exponencialmente, devido à carga de Cat (capacitor que representa o poder evaporativo da atmosfera).

4.1.6. ATMOSFERA

A Figura 42 apresenta o esquemático da atmosfera. Pode-se observar que esse módulo possui uma única porta de entrada (chamada folha), a qual conecta o módulo atmosfera aos três módulos estômato. Possui também uma porta de sondagem que avalia o conteúdo do capacitor hídrico da camada limite (cml). As diversas contribuições são modeladas por diferentes dispositivos: (i) uma fonte de potencial constante (V_{atm}) representa o potencial hídrico devido à pressão de vapor do ar atmosférico. Somente entre a camada limite e a atmosfera, o potencial hídrico cai 25,1 MPA (conforme valores representativos expressos na Tabela 6). Da continuidade do fluxo, impõem-se uma transpiração foliar de $6,68E-7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, resultando em uma resistência atmosférica de $3,76E7 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ (ii) uma fonte de

potencial variável com período igual a 24 horas pode representar a contribuição da radiação solar (V_{rsol}); (iii) Um capacitor hídrico pode representar o armazenamento de vapor d'água na camada limite (cml).

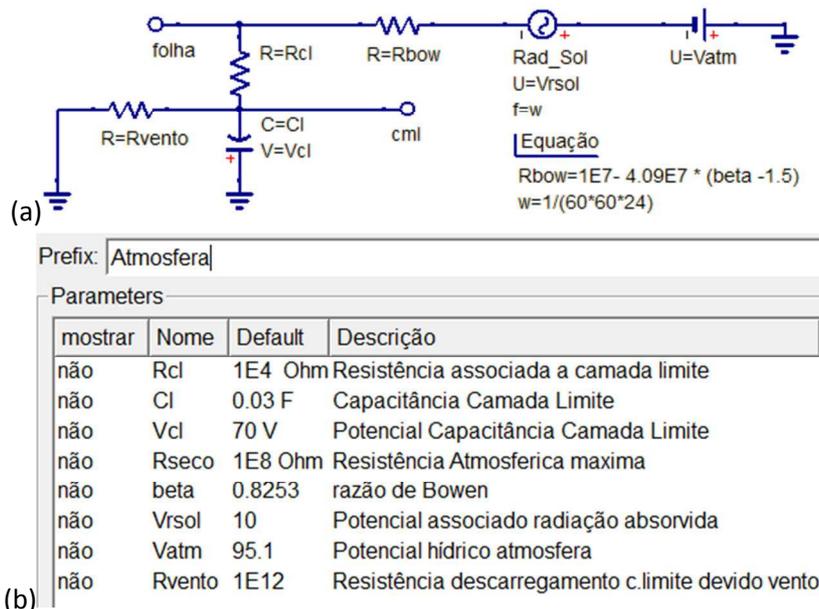


Figura 42 – Módulo atmosfera.

(a) Esquemático do circuito com as diversas contribuições ao potencial hídrico: V_{rsol} (radiação solar com variação senoidal com período de 24 horas); V_{atm} (potencial hídrico do ar atmosférico); R_{vento} (dissipação do vapor d'água devido a presença de ventos) e armazenamento de água na camada limite (Cl); (b) Relatório de Parâmetros dos valores adotados como padrão.

A resistência atmosférica pode ser escrita em função da razão de Bowen, pois depende fundamentalmente da umidade relativa do ar e da temperatura. Quanto maior a parcela do saldo da radiação solar no processo de aquecimento do ar (H), menor será a transpiração foliar (LE) e, portanto, maior a resistência hídrica atmosférica.

Dos valores da razão de Bowen, constantes na Tabela 3, é possível se estabelecer uma relação (por simplicidade, linear) entre a resistência ao fluxo e a razão de Bowen:

$$R_{atm} = R_0 + (R_{m\acute{a}x} - R_0) \left(\frac{\beta - \beta_{seco}}{\beta_{\acute{u}mido} - \beta_{seco}} \right) \quad (45)$$

Atmosfera úmida, carregada de vapor d'água, impõe dificuldade para manter a evaporação e é modelada por uma resistência alta. Assim, para certos limites (Tabela 10).

Condição Atmosférica	Razão de Bowen	Resistência
Seco	$\beta_{seco} = 1,5$	$R_0 = 1E7$
Úmido	$\beta_{\acute{u}mido} = -0,7$	$R_{m\acute{a}x} = 1E8$
Medida	β	R_{atm}

Tabela 10 – Relação linear entre razão de Bowen e resistência atmosférica

Ao se combinar a equação (45) e a Tabela 10 fornece a expressão:

$$R_{atm} = 1E7 - 4,09E7 (\beta - 1,5) \quad (46)$$

Para o valor da resistência atmosférica de $3,76E7 \text{ MPa.s.m}^{-3}$, tem-se $\beta = 0,8253$. Esse valor representa condições de atmosfera seca. A capacitância da camada limite é definida em $0,03 \text{ m}^3.\text{MPa}^{-1}$, bem menor que a capacitância da própria folha. A resistência para a camada limite deve ser bem pequena devido à fluidez do ar junto às folhas. No entanto, isso dependerá fortemente do vento sobre a lâmina foliar, de modo que o capacitor hídrico da camada limite deverá se descarregar exponencialmente.

Uma simulação transiente permite observar a contribuição importante do fluxo líquido da radiação absorvida, que causa uma variação no potencial hídrico atmosférico, cuja frequência depende do movimento de rotação da Terra. De maneira simples, essa contribuição pode ser modelada por uma fonte de potencial senoidal, o que acarreta, consequentemente, uma variação senoidal do fluxo hídrico (Figura 43).

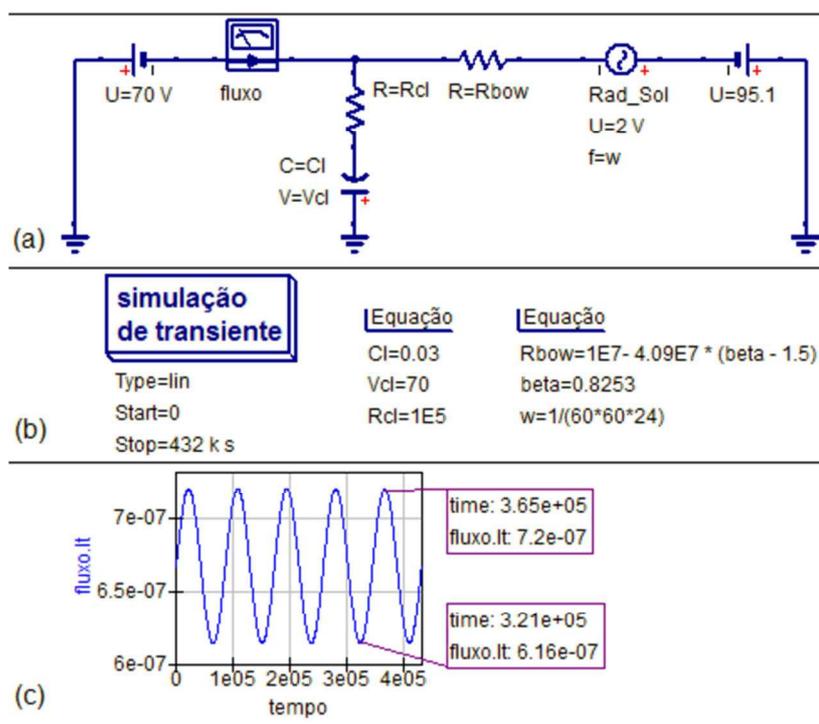


Figura 43 – Simulação transiente do Modulo Atmosfera

(a) Uma fonte de potencial senoidal modela a contribuição do fluxo líquido da radiação solar absorvida. O período dessa fonte é igual há 24 horas. As contribuições da camada limite, da razão de Bowen e do potencial hídrico devido à umidade relativa do ar (ou da pressão de vapor do ar atmosférico); (b) Valores dos parâmetros dos dispositivos e equações que definem a resistência atmosférica ao fluxo hídrico devido à razão de Bowen (R_{bow}) e a frequência de oscilação do potencial senoidal (w); (c) o gráfico do fluxo hídrico em função do tempo obedece também a uma função senoidal.

4.1.7. PRECIPITAÇÃO

O módulo chuva é composto por uma série de pulsos retangulares de voltagem, que se liga ao solo após o fluxo passar por um resistor de $1E7$ Ohm. Cada pulso retangular de voltagem representa uma célula de chuva.

São necessários, para a modelagem da precipitação seguindo o modelo de Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (BLPRM), os parâmetros: (i) intervalo de tempo entre cada evento (o número de eventos é a razão do período a ser modelado pelo intervalo de tempo entre cada evento); (ii) duração de cada evento; (iii) número de células; (iv) período de cada célula (largura); (v) amplitude (em mm de precipitação por segundo). Todos esses parâmetros médios permitem prever a localização, largura e altura de cada pulso a partir de um gerador de números aleatórios para uma distribuição de Poisson.

O resultado da geração de dois eventos de precipitação. Está consolidado na Tabela 11.

N	Evento	Célula	Δt (s)	Início (s)	T (s)	Final (s)	A (mm.s ⁻¹)	P (mm)
1	1	1	0	10	4500	4510	1,86E-04	0,837
2	1	2	2580	2590	3060	5650	2,36E-04	0,722
3	1	3	2581	5171	3960	9131	1,70E-04	0,673
4	1	4	2582	7753	3300	11053	1,94E-04	0,640
5	1	5	2583	10336	3480	13816	1,76E-04	0,612
6	1	6	2584	12920	2460	15380	2,08E-04	0,512
7	1	7	2585	15505	2700	18205	2,04E-04	0,551
8	1	8	2586	18091	4260	22351	1,80E-04	0,767
9	2	1	0	46820	2340	49160	2,12E-04	0,496
10	2	2	2400	49220	3780	53000	2,08E-04	0,786
11	2	3	2220	51440	3240	54680	2,10E-04	0,680
12	2	4	2280	53720	3300	57020	1,84E-04	0,607
13	2	5	2040	55760	3480	59240	2,18E-04	0,759
14	2	6	2100	57860	3360	61220	2,02E-04	0,679
15	2	7	2400	60260	3660	63920	1,94E-04	0,710
16	2	8	2640	62900	2460	65360	1,74E-04	0,428
17	2	9	1920	64820	3300	68120	2,02E-04	0,667
18	2	10	2460	67280	3600	70880	2,06E-04	0,742
Total	-	-	-	-	-	-	-	11,868

Tabela 11 – Células de Chuva segundo o modelo BLPRM

São dois eventos de precipitação. O número de células de chuva por evento, bem como seu início e duração (Δt) e a amplitude (A) obedecem a distribuições de Poisson. O total precipitado alcançou $11,868 \text{ mm.dia}^{-1}$.

Essa modelagem compreende um período de 24 horas (2 eventos com 6 horas de precipitação e 6 horas de período seco) e projeta a média diária:

$P = 20 \text{ células} * 3600 \text{ s} * 0,2 \mu\text{m.célula}^{-1} . \text{s}^{-1} = 14,4 \text{ mm.dia}^{-1}$. Para tanto, foram definidas as médias: (i) período entre o início de cada evento = 12 horas; (ii) largura do evento = 6 horas; (iii) largura de cada célula = 1 hora; (iv) número de células por evento = 10 e (v) amplitude = $0,2 \mu\text{m.célula}^{-1} . \text{s}^{-1}$ de precipitação.

Definidos parâmetros de cada célula, uma série de pulsos retangulares modela os eventos de precipitação (Figura 44).

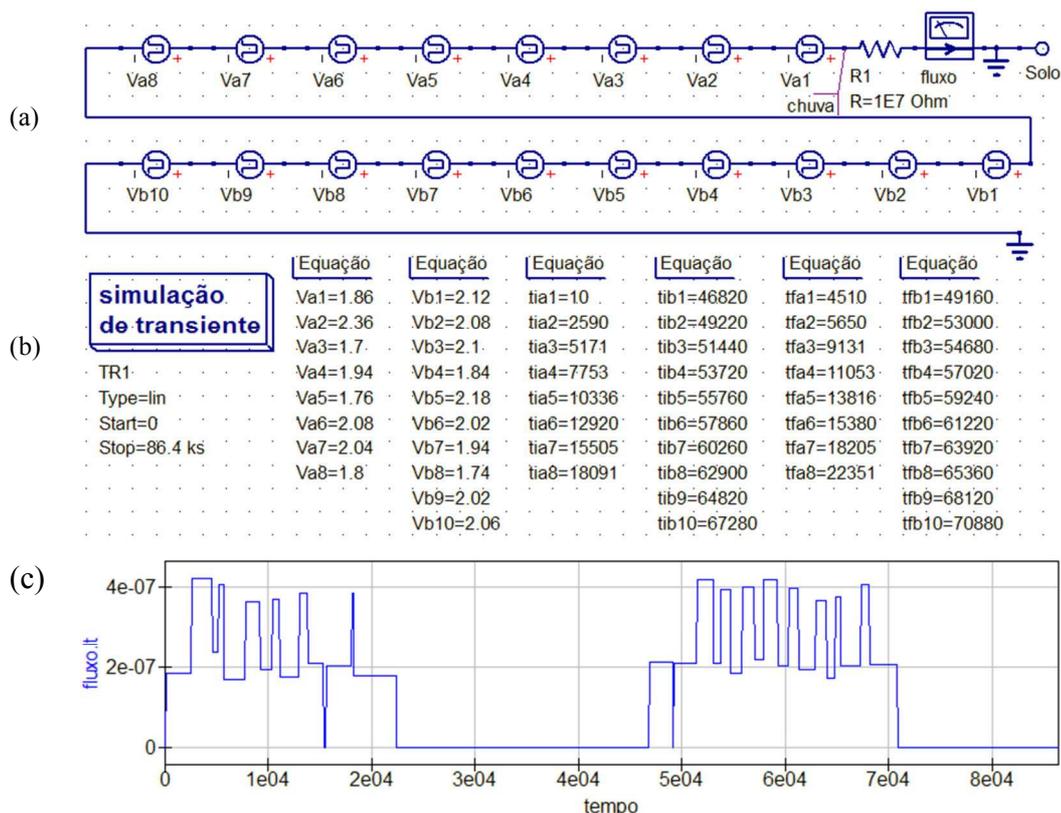


Figura 44 – Circuito Chuva.

(a) Esquemático para uma simulação transiente. Cada pulso retangular representa uma célula de chuva; (b) As equações editam as propriedades dos pulsos retangulares – início, final e amplitude; (c) Gráfico do fluxo hídrico em $\text{m}^3 . \text{s}^{-1}$. Cada pulso no fluxo relaciona-se com um pulso de potencial, descritos pelas equações em b.

O modulo chuva é formado por pulsos retangulares de voltagem, para os quais se estabelece: a amplitude – V_{pc} – coluna A da Tabela 11; (b) Início do pulso (t_{ipc}) e (c) o instante final de cada pulso (t_{fpc}), em que p é o evento de precipitação e vale “a” ou “b” e c é a ordem da célula de chuva, podendo ser 1 a 8 para o evento de precipitação “a” ou 1 a 10 para o evento de precipitação “b”. Para obter o precipitado em cada pulso, multiplica-se a amplitude (A) pelo período de cada célula ($T = t_{fpc} - t_{ipc}$). O potencial do pulso é obtido pela Lei de Ohm, igualando-se o fluxo de água através do resistor com a amplitude.

4.2. TRANSPIRAÇÃO FOLIAR

O análogo mais simples do comportamento do fluxo hídrico no SPA pode ser obtido pela associação em paralelo de dois subsistemas RC e um resistor variável, como na Figura 45. A resistência não linear, R_{stoma} , depende do potencial do capacitor Folha, enquanto este depende do potencial do capacitor solo, além, é claro, de uma série complexa de outros fatores.

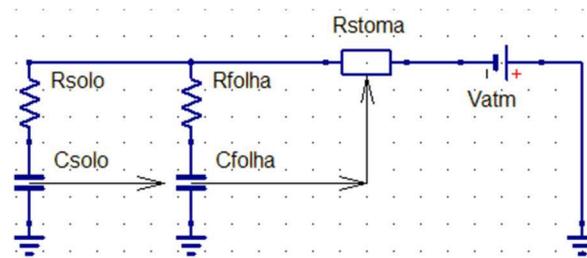


Figura 45 – Esquema mínimo de controle de fluxo no SPA.

A quantidade de água do solo exerce controle sobre a quantidade de água na folha, a qual finalmente exerce controle sobre a abertura do estômato e, portanto sobre a resistência estomática.

Uma análise qualitativa, com base na equação (27), permite descrever dois regimes. Quando há disponibilidade hídrica (DH na Figura 46), o termo capacitivo (C_{folha}) domina, a equação (27) reduz-se à equação (1) e o fluxo hídrico depende muito pouco da variação da quantidade de água no solo. A disponibilidade hídrica é caracterizada pela turgescência das células, de modo que os estômatos estão abertos. Ao contrário, quando há redução da quantidade de água disponível, abaixo da tensão de turgescência (AT na Figura 46), o termo dependente da umidade do solo domina, o resistor vai se fechando linearmente e uma reta descendente é traçada.

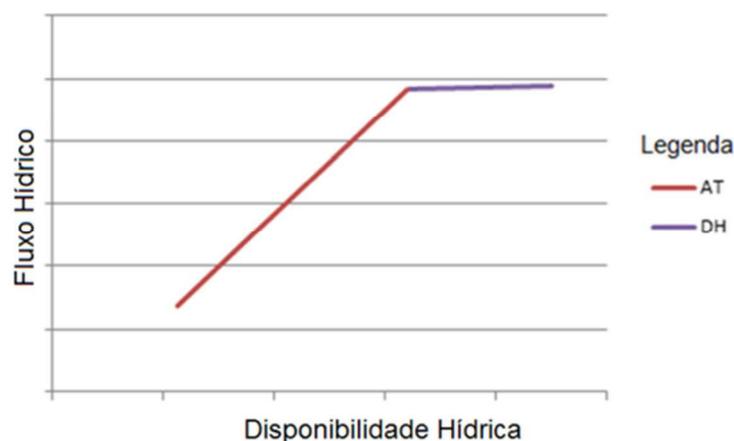


Figura 46 – Fluxo Hídrico x Disponibilidade Hídrica

O gráfico apresenta dois regimes hídricos no SPA: DH representa a condição de disponibilidade hídrica e AT, condição de restrição, após a de perda de turgescência das células guarda.

Para um estudo analítico, com base nos módulos construídos na seção (4.1), o circuito da Figura 47 foi construído. Estados estacionários para o potencial hídrico do solo variando de -0.3 a -1.4 MPa foram simulados a partir de estados transientes de longo tempo, resultando nas Tabelas 12 e 13.

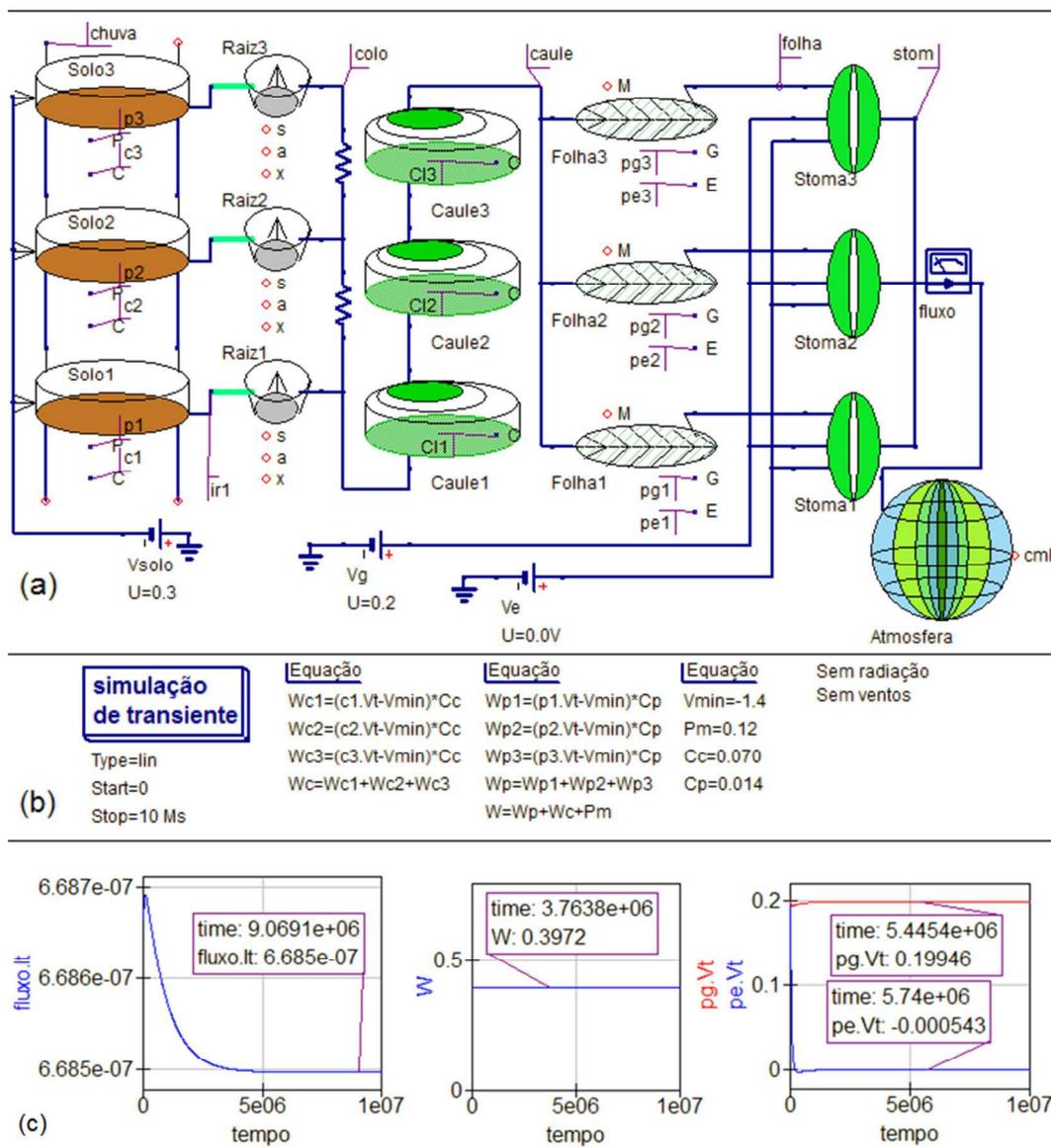


Figura 47 – Circuito SPA

(a) Circuito com todos os módulos encapsulados, como descritos na Figura 29, do solo, da planta e da atmosfera conectados em uma simulação transiente; (b) As equações calculam a quantidade total de água no solo (c) Os gráficos do fluxo e da quantidade de água no solo reproduzem os valores esperados. O potencial hidrostático, V_g , retorna do circuito folha, nas portas $pg1$, $pg2$, $pg3$ ($pg.Vt$ no gráfico à direita) com o valor aproximado ao fixado em 0.2 MPa no circuito estômato. Da mesma maneira, o potencial V_e , fixado em 0 MPa, retorna nas portas $pe1$, $pe2$ e $pe3$ ($pe.Vt$ no gráfico à direita) com valor aproximado ao fixado no circuito estômato, o que mostra a consistência do circuito.

Na Tabela 12, as condições atmosféricas foram relativas a dias secos, em que a atmosfera tem alto poder evaporante. Essas condições foram determinadas a partir da razão de Bowen e o potencial hídrico atmosférico:

0,8253 e -95,1MPa, respectivamente. As condições atmosféricas usadas para a construção da Tabela 13 representam uma atmosfera, relativa a dias úmidos, com menor poder evaporante, caracterizada pela razão de Bowen igual a 0,25 e potencial hídrico atmosférico de -70 MPa.

Psolo (MPa)	Wsolo (m ³)	Pg (MPa)	fluxo (m ³ .s ⁻¹)
0,30	0,3972	0,20	6,69E-07
0,35	0,3846	0,18	6,68E-07
0,40	0,3720	0,16	6,68E-07
0,45	0,3594	0,14	6,67E-07
0,50	0,3468	0,12	6,67E-07
0,55	0,3342	0,10	6,67E-07
0,60	0,3216	0,08	4,32E-07
0,65	0,3090	0,06	3,19E-07
0,70	0,2964	0,04	2,53E-07
0,75	0,2838	0,02	2,10E-07
0,80	0,2712	0	1,79E-07
0,85	0,2590	0	1,79E-07

Tabela 12 – Fluxo hídrico para dia seco e claro

Valores obtidos a partir do circuito da Figura 47 com razão de Bowen igual a $\beta=0,8523$ e potencial hídrico da atmosfera $V_{atm}=-95,1$ MPa, caracterizando dia seco e claro.

Psolo (MPa)	Wsolo (m ³)	Pg (MPa)	fluxo (m ³ .s ⁻¹)
0,30	0,3972	0,20	4,22E-07
0,35	0,3846	0,19	4,21E-07
0,40	0,3720	0,18	4,21E-07
0,45	0,3594	0,17	4,21E-07
0,50	0,3468	0,16	4,20E-07
0,55	0,3342	0,15	4,20E-07
0,60	0,3216	0,14	4,20E-07
0,65	0,3090	0,13	4,19E-07
0,70	0,2964	0,12	4,19E-07
0,75	0,2838	0,11	4,19E-07
0,80	0,2712	0,10	4,19E-07
0,85	0,2590	0,09	3,39E-07
0,90	0,2460	0,08	2,85E-07
0,95	0,2330	0,07	2,46E-07
1,00	0,2210	0,06	2,16E-07
1,05	0,2080	0,05	1,93E-07
1,10	0,1960	0,04	1,74E-07
1,15	0,1830	0,03	1,58E-07
1,20	0,1704	0,02	1,45E-07
1,25	0,1578	0,01	1,34E-07
1,30	0,1450	0,00	1,25E-07
1,35	0,1326	0,00	1,25E-07
1,40	0,1200	0,00	1,24E-07

Tabela 13 – Fluxo hídrico para dia úmido e encoberto

Valores obtidos a partir do circuito da Figura 47 com razão de Bowen igual a $\beta=0,25$ e potencial hídrico da atmosfera $V_{atm}=-70$ MPa, caracterizando dia úmido e encoberto.

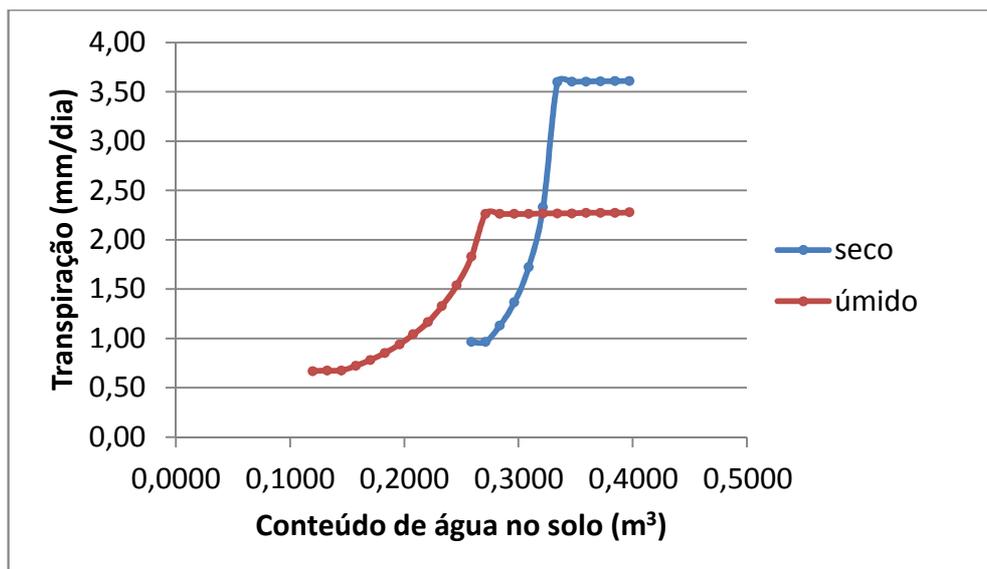


Figura 48 – Gráfico transpiração versus quantidade de água no solo
Gráfico dos dados da Tabela 12 (dia seco e claro) e da Tabela 12 (dia úmido e encoberto) para a transpiração (fluxo em $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) versus a quantidade de água no solo (m^3). Observa-se semelhança com o resultado do trabalho experimental de Denmead e Shaw (1962) conforme apresentado na Figura 5.

O gráfico da Figura 48 resume a relação obtida nessas tabelas com base no comportamento do fluxo hídrico com relação à quantidade de água no solo para o circuito da Figura 47. Os fluxos foram convertidos para $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$.

A resposta da árvore, para condições úmidas, foi considerada ao se proceder a redução do potencial hidrostático da célula guarda com a redução da quantidade de água no solo mais lenta que para condições de atmosfera seca.

As curvas concordam com as da Figura 5, observadas por Denmead e Shaw (1962). Os valores da transpiração diária, inclusive, são da mesma ordem de grandeza que os obtidos pelos autores.

Dentre as diversas possibilidades, propostas por Denmead e Shaw (1962), de explicação para a declividade da curva que se inicia no ponto de perda da turgescência, uma remete aos trabalhos de Thornthwaite e Mather (1955 apud DOURADO-NETO et al., 2010) em que a perda de água no solo obedece uma curva exponencial, de acordo com a equação (12) expressa na seção (2.2). Os autores, todavia, não citam terem realizado investigação sobre a validade dessa hipótese. Necessário, no entanto, observar que são condições experimentais diferentes. Nos trabalhos de Denmead e Shaw, tem-se uma sucessão de regimes estacionários, cujos fluxos dependem fundamentalmente do valor da resistência estomática e essa, inversamente da umidade do solo. Em Thornthwaite e Mather, tem-se um estado transiente de descarregamento de água no solo, o qual está modelado na seção seguinte.

4.3. UMIDADE DO SOLO

Com o objetivo de se reproduzir as condições experimentais do trabalho de Thornthwaite e Mather (1955 apud DOURADO-NETO et al., 2010), simulação transiente foi realizada (Figura 49) desligou-se a fonte de potencial conectada aos capacitores hídricos do solo, de modo a se descarregarem. Observa-se, como esperado, curvas exponenciais descendentes, tanto para a carga, como para o fluxo. As duas curvas são características de circuitos resistivo-capacitivo que obedecem as equações (25) e (26), respectivamente.

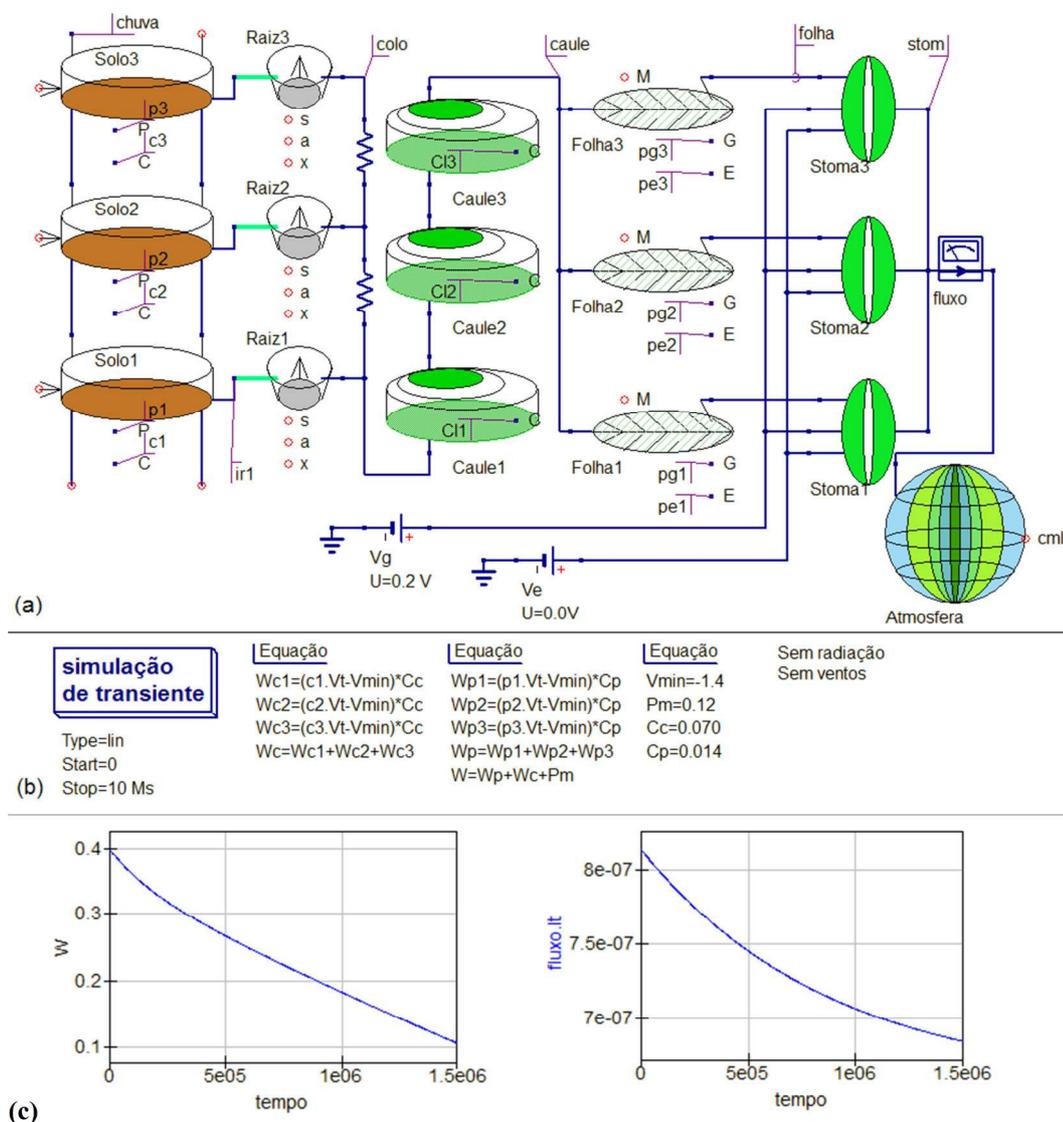


Figura 49 – Simulação transiente do trabalho de Thornthwaite e Mather

O circuito baseado nas condições experimentais do trabalho de Thornthwaite e Mather (1955 apud DOURADO-NETO et al., 2010) em que a quantidade de água no solo pode variar não há fixação da quantidade de água no solo – os capacitores estão em descarga no regime transiente. (a) Circuito com a ponteira “fluxo” medindo o fluxo de água que atravessa os estômatos para a atmosfera; (b) Equações para o cálculo da quantidade de água no solo; (c) Quedas exponenciais da carga e do fluxo, como previstos pelas equações (25) e (26).

O gráfico da Figura 50 concorda com a relação linear entre fluxo e carga prevista pela equação (27) que resulta das duas equações combinadas.

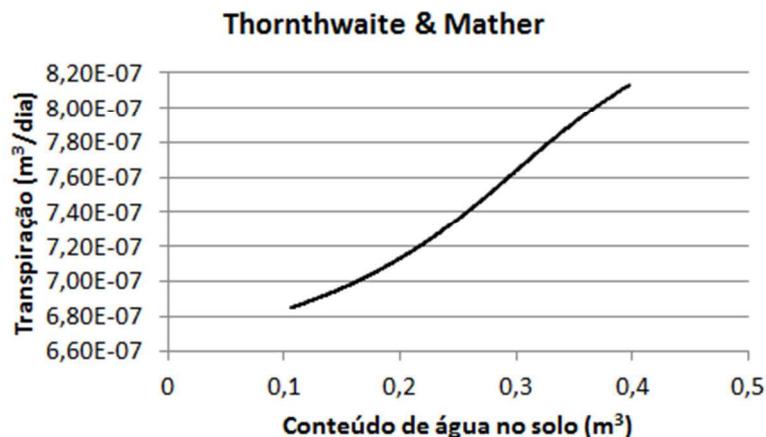


Figura 50 – Transpiração foliar em função do Conteúdo de água no solo
Gráfico da Transpiração foliar e Conteúdo de água no solo para uma simulação transiente com base nas características do trabalho experimental de Thorntwaite e Mather (1955 apud DOURADO-NETO et al., 2010). A relação linear é prevista pela equação (27).

Na simulação, a concordância dos dois regimes deve-se à equivalência dos efeitos do comportamento capacitivo do solo e o linearmente variável do potencial hidrostático da célula guarda com a quantidade de água no solo.

4.4. BALANÇO HÍDRICO

Inicialmente, para o estudo do balanço hídrico, serão conectados os módulos das três camadas de solo ao módulo chuva, conforme mostra a Figura 51 na próxima página. Uma fonte de corrente controlada por corrente (SRC1) é usada para permitir os fluxos independentes de chuva e carregamento do solo. Se fossem ligados diretamente, a resistência do solo iria modelar o fluxo hídrico da precipitação. Em outras palavras: o quanto chove independe da resistência do solo à infiltração, por isso os circuitos devem ser independentes.

Uma segunda fonte de corrente controlada por corrente (SRC2) é utilizada no cálculo da água precipitada. Em um circuito com capacitância unitária, o potencial nas placas do capacitor é numericamente igual à quantidade de água acumulada: $|\Delta\psi| = W$ (de acordo com a equação (23) com $R=0$ e $C=1$, para carregamento do capacitor, a partir de $W(t=0)=0$) Assim, o capacitor ligado à SRC2 é um integrador do fluxo sobre o tempo (Mita e Toshiyoshi, 2009):

$$|\Delta\psi| = W = \int_0^t f dt \quad (47)$$

A variável estocástica precipitação, $Pp(t)$, pode ser escrita na forma $Pp(t) = \bar{\mu} + \varepsilon(t)$, em que $\varepsilon(t)$ são as flutuações e $\bar{\mu}$ é um estimador para a média: $\bar{\mu} = (\Delta t)^{-1} \int_{t_0}^t Pp(t) dt$. Os capacitores do solo, portanto, dado que são integradores da função estocástica precipitação, agem como atenuadores dessas flutuações.

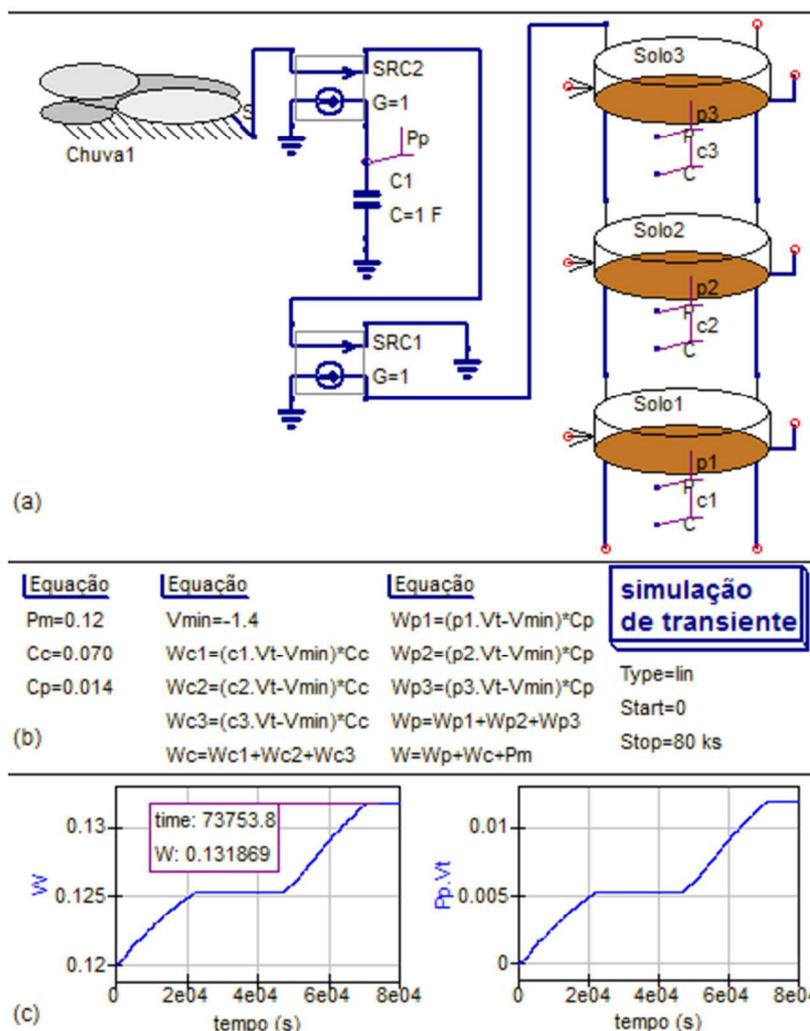


Figura 51 – Conexão dos módulos chuva e solo.

(a) A conexão dos módulos chuva e solo deve ser feita por uma *fonte de corrente controlada por corrente* (SRC1) de modo que a resistência à infiltração da água no solo não interfira com o fluxo de água precipitada. Uma segunda *fonte de corrente controlada por corrente* (SRC2) cria um circuito independente com um capacitor unitário. A carga nesse capacitor é igual ao valor precipitado acumulado; (b) cálculo da quantidade de água no solo, em que Pm é o valor inicial da quantidade de água antes da precipitação e $Wp+Wc$ é a quantidade de água recebida durante os eventos de precipitação; (c) Os gráficos mostram que os valores de W (quantidade de água no solo) e Pp (precipitado) concordam a menos do valor inicial ($Pm=0.12$ m³/m³ de solo).

Na equação (47), o fluxo é a taxa de variação da quantidade de água armazenada, $f = \frac{dW}{dt}$. Assim, a carga desse capacitor é a quantidade de água precipitada no período e deve coincidir com o total da Tabela 11 que é 11,868

mm.dia⁻¹. Convertendo em metros cúbicos, tem-se 0,011868. A diferença na sexta casa decimal entre o valor da tabela e o obtido da integração no QUCS (ver letra c da Figura 51: $Pp = 0,011869 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$) deve-se unicamente a arredondamentos.

A variação do conteúdo de água nas três camadas de solo será dada pela equação (11), com valores nulos para interceptação, infiltração e evapotranspiração: $q = Pp(t) = 0,011868 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ de solo}$.

Antes de se considerar a evapotranspiração, para facilitar a visualização, fez-se mais um encapsulamento de circuitos. Na Figura 52, tem-se à esquerda o esquemático do subcircuito “Planta” em que todos os componentes estão conectados e à direita, o símbolo do subcircuito com as portas de comunicação com a raiz e a atmosfera.

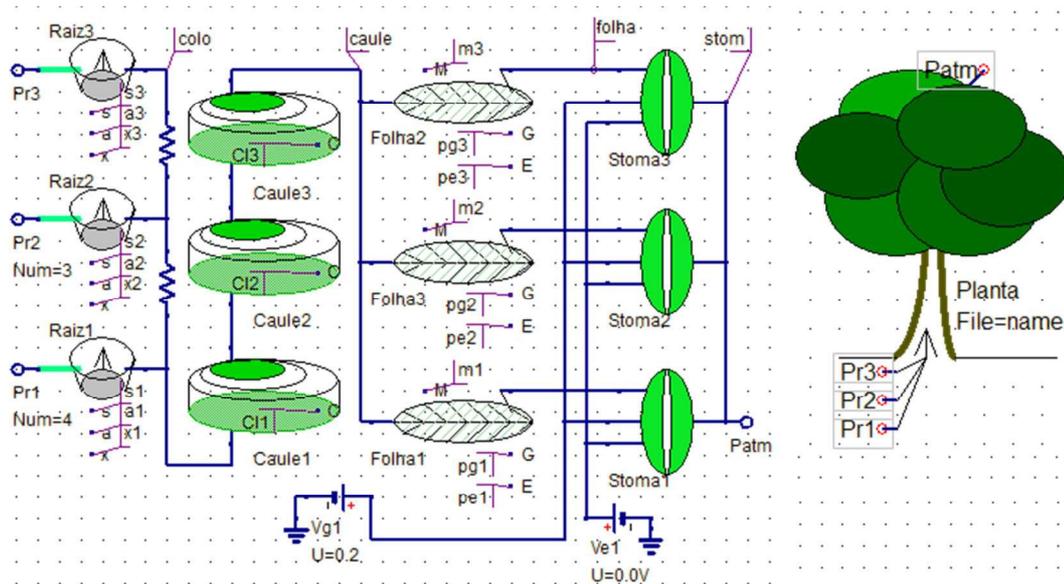


Figura 52 – Encapsulamento do subcircuito Planta

A esquerda o circuito Planta com todos os módulos: três módulos para raiz, três para caule, três para folhas e três para estômatos; à direita, está o símbolo do circuito com três portas para se conectar ao solo (Pr1, Pr2 e Pr3) e uma porta para a conexão com a atmosfera (Patm).

A simulação a seguir avalia a variação da quantidade de água no solo considerando a parcela transpirada pela planta, porém, diferentemente do que propõe a equação (11), é preciso se considerar a variação acumulada do armazenamento de água na planta (W_{planta}):

$$q = Pp(t) - ET(w, t) - W_{planta} \quad (48)$$

A quantidade W_{planta} pode representar um parâmetro que indique o estresse hídrico, pois se for negativa significa que a planta está reduzindo a quantidade de água armazenada.

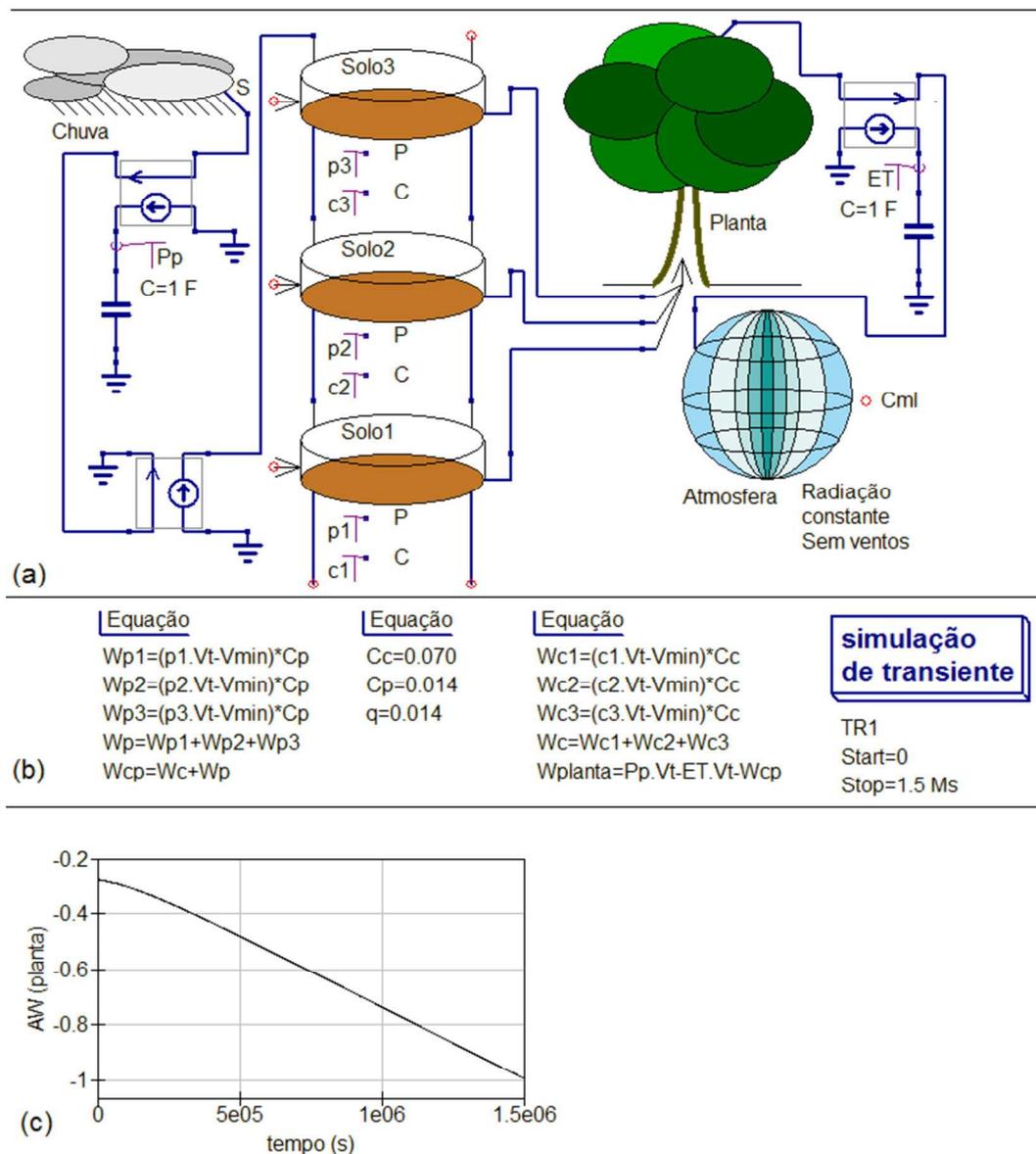


Figura 53 - Circuito de precipitação conectado ao contínuo solo-planta-atmosfera.

(a) O encapsulamento simplificar o esquema, sem reduzir a complexidade do circuito: da esquerda para a direita tem-se ligados o circuito chuva, solo, planta e atmosfera. Dispositivos SRC, associados a capacitores unitários, permitem o cálculo de quantidades acumuladas de fluxo (Pp – Precipitação e ET -Evapotranspiração); (b) Equações para o cálculo da variação da quantidade de água na planta (c) O gráfico de $Wplanta$ mostra que a planta está descarregando.

4.5. RADIAÇÃO SOLAR

Diversos são os efeitos da radiação sobre o fluxo hídrico. Esses efeitos dependem inclusive da faixa espectral de frequências. Radiação fotossinteticamente ativa, por exemplo, imprime um aumento na concentração de carboidratos nas células da folha. Neste estudo, no entanto, queremos investigar como a variação periódica das condições climáticas devido à radiação solar é transmitida para os diversos componentes da planta.

Ligando a fonte de potencial senoidal do circuito atmosfera com frequência de uma oscilação por dia e amplitude de 30 MPa, observa-se que todo o potencial hídrico da planta também irá oscilar na mesma frequência. Os gráficos da Figura 54 mostram que a amplitude de oscilação, no entanto vai se reduzindo drasticamente. Entre o estômato e a camada limite foliar, o potencial hídrico varia em torno de 0,5 MPa; na folha a amplitude cai para 0.01 MPa; no caule está na ordem de 0.0001 MPa e no colo da raiz chega a 0.00001 MPa. Provavelmente esse fato deve-se à propriedade de amortecimento dos reservatórios hídricos. É possível se observar também uma defasagem no potencial hídrico provavelmente ligada à inércia do sistema.

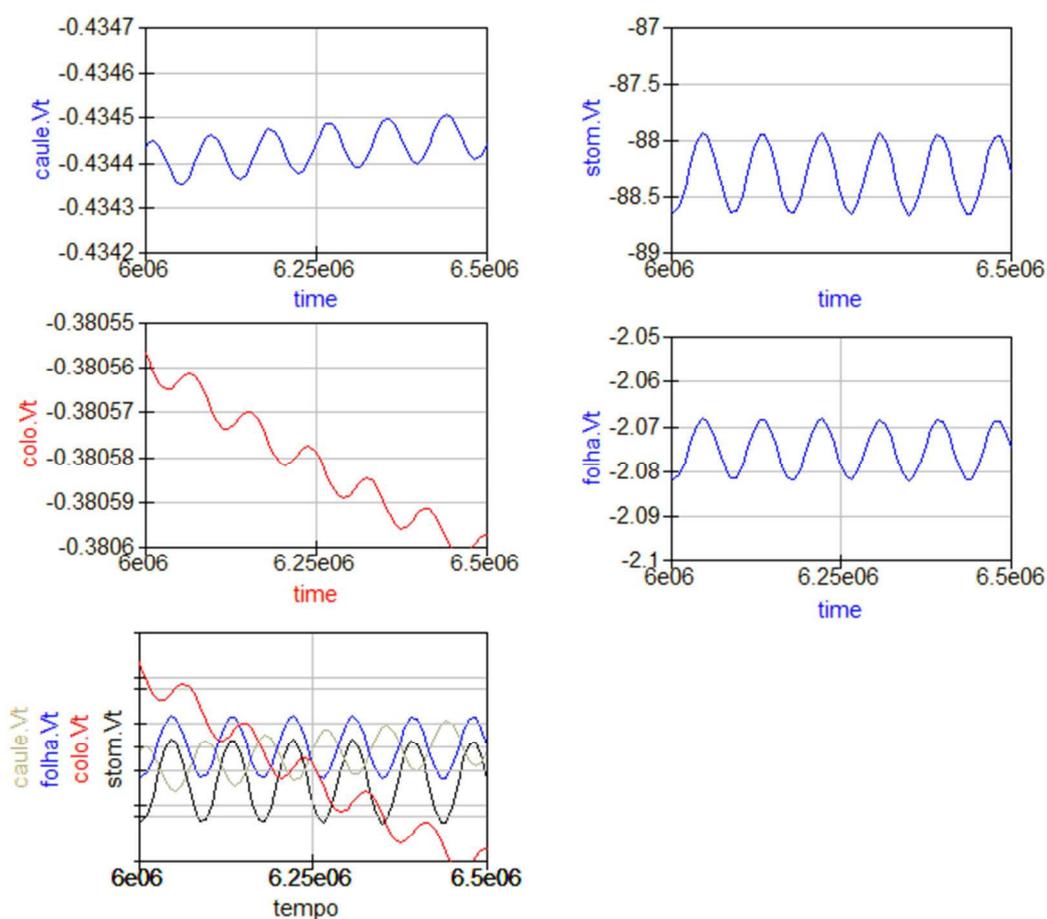


Figura 54 – Oscilações diárias no potencial hídrico de componentes da planta.

Os gráficos dos fluxos no colo da raiz (colo.Vt), do caule (caule.Vt), da folha (folha.Vt) e estômato (stom.Vt) mostram a ação da radiação sobre os diferentes componentes da planta. Os valores vão reduzindo em uma ordem de grandeza do estômato para a folha, da folha para o caule e desta para o caule da raiz. Observa-se no gráfico abaixo em que os fluxos estão juntos, que há progressivamente defasagem devido à presença dos capacitores.

4.6. OSCILAÇÕES ESTOMÁTICAS

Na seção 4.5, os reservatórios hídricos podiam servir de amortecedores às oscilações produzidas no potencial hídrico pela radiação solar. No entanto, só há oscilações de fluxos quando há não linearidade das equações que os descrevem. Pode-se assim dizer que há um sinal – transferido de outro elemento do circuito – que modula a resistência ao fluxo da quantidade (carga elétrica – no caso do circuito elétrico – ou volume de água – no caso do circuito hídrico) que atravessará o transistor.

O circuito hídrico em uma folha que permite observar oscilações na abertura estomática (Figura 55) foi baseado no oscilador astável de desvio de fase de rede progressiva de três estágios com transistor NPN da Figura 18.

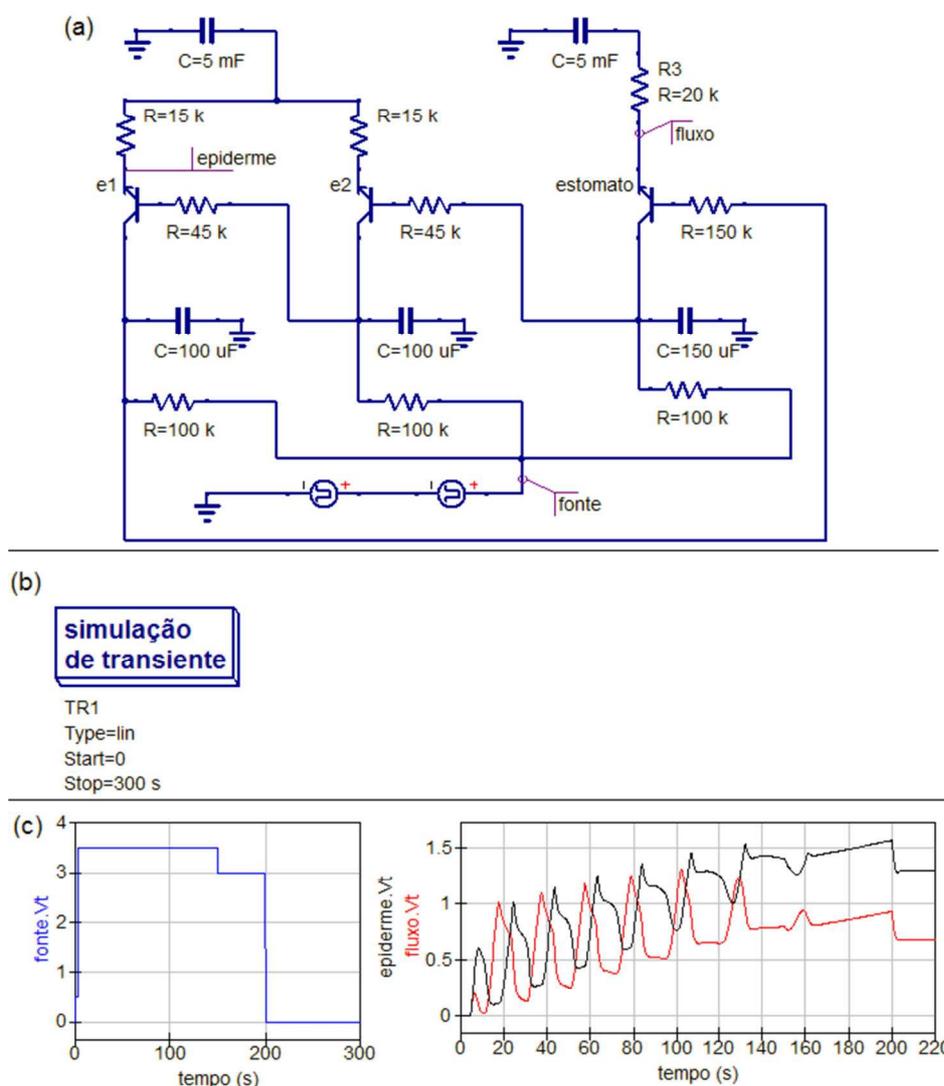


Figura 55 – Oscilador Hídrico de Desvio de Fase de Rede Progressiva

(a) Circuito que simula a abertura estomática controlada pelo potencial de células da epiderme (e1, e2) e da célula guarda (g); (b) simulação transiente de 5 minutos; (c) à esquerda, gráfico da fonte (dois pulsos de potencial) e à direita, os potenciais de saída da epiderme e do fluxo através do estômato. Observa-se que há uma defasagem entre eles, condição necessária para a existência de oscilação.

A entrada de água é modelada por dois pulsos de onda quadrada. Quer-se observar qual o comportamento do fluxo após atravessar o transistor que modela o estômato (marcado com est na Figura 55). O gráfico (à esquerda na área c da Figura 55) mostra dois pulsos de potencial hídrico com amplitudes de 0,5 e 3 MPa. O pulso maior representa um “forçante” atmosférico constante; o segundo pulso poderia ter sido causado por uma variação rápida na umidade do ar semelhante ao estabelecido no arranjo experimental de Farquhar e Cowan (1974). A resposta do sistema é uma oscilação amortecida também semelhante à obtida pelos autores para situação de ganho ambiental menor que um.

Na seção anterior, a razão da variação periódica do fluxo nos diferentes componentes da planta era a periodicidade da radiação solar. Nesta seção, a razão da oscilação é o controle que a quantidade de água (e, portanto o potencial hídrico) das células epidérmicas exerce sobre a abertura estomática. A saída de água do capacitor (g) indica que o estômato está aberto, abrindo os transistores ligados às células da epiderme. Há assim saída de água dos capacitores das células epiteliais, cujo sinal irá fechar o transistor relativo ao estômato. O capacitor relativo à célula guarda irá se carregar até o valor que imponha aos transistores ligados às células da epiderme que se abram. O ciclo se repetirá, porém, a cada ciclo os potenciais serão atenuados pelos resistores, o que é mais facilmente observável a partir de $t=120s$ no gráfico à esquerda da área c da Figura 55. Observa-se inclusive devido ao desvio de fase da rede progressiva que os fluxos após a saída do estômato e da saída da célula da epiderme estão em defasagem de 180° aproximadamente, como nos trabalhos de Lang et al (1969), que preconiza essa defasagem para a existência da oscilação. Por sua vez, essa defasagem só é possível devido aos diferentes tempos característicos dos diversos componentes do fluxo hídrico.

5. CONCLUSÃO

“O procedimento de construção de um modelo constitui-se uma arte” Essa frase de Gomes e Varialle (2001) contém, segundo meu entendimento, dupla interpretação. Se por um lado revela a beleza de tornar inteligível uma imensidão de dados e informações, a partir de suas relações dinâmicas, por outro, aponta a atuação particular do pesquisador na sua construção. A escolha das variáveis que melhor descrevem um fenômeno, por exemplo, faz parte dessa arte.

Há escolha fundamental deste trabalho pode ser descrita desta forma: à estrutura do fluxo e armazenamento de portadores de carga elétrica descrita pela eletricidade não deve diferir a da água.

O foco do trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia consistentemente formalizada a partir de (i) leis análogas à eletricidade, que, porém derivam de leis maiores: de conservação de energia e de continuidade de fluxo; (ii) representar a estrutura do fluxo a partir de um reduzido grupo de dispositivos localizados: resistores, capacitores, diodos, fontes e transistores; (iii) aplicação de programas de resolução de complexos e extensos sistemas de equações integrais e diferenciais; (iv) reproduzir resultados experimentais. Com respeito ao alcance desses objetivos, há de se considerar, inicialmente, que as leis propostas foram respeitadas na construção de cada circuito, analiticamente ou a partir do cálculo numérico, pois integram o programa QUCS; estratégias foram desenvolvidas capazes de se estimar valores importantes na descrição da dinâmica hídrica, como fluxos e acumulações de fluxo, armazenamentos, resistências, tempos característicos, períodos etc; a complexidade crescente do arranjo a cada adição de novo dispositivo foi minimizada pela possibilidade de encapsulamentos, em que as características anteriormente programadas foram preservadas.

A localização de funções, em eletrônica, é permitida desde que as frequências de oscilação dos campos sejam pequenas. Essa propriedade permite o desenvolvimento de dispositivos localizados que controlam fluxo e armazenamento de cargas, em intrincados circuitos elétricos. A par disso, há o desenvolvimento de ferramentas de estudo, de simulação desses fluxos. Por traz dos desenhos na prancheta de trabalho do QUCS, há algoritmos poderosos para soluções de sistemas de equações diferenciais acopladas das grandezas envolvidas.

A evolução dotou os sistemas vegetais de sofisticados órgãos para o controle do fluxo hídrico. Dessa forma, torna-se difícil descrever os fluxos a partir de um conjunto pequeno de equações dado o grande número de variáveis envolvidas. Estabelecer analogias é, portanto, incluir ferramentas sofisticadas de análise, que permitem abarcar um maior número de funções fisiológicas nesse sistema que regula o fluxo hídrico.

Na construção de cada dispositivo, solo, raiz etc., buscou-se respeitar as características de resistência e armazenagem. As simulações mostraram consistência nas escolhas com respeito aos valores de armazenamento, de fluxo, de tempos característicos. Esses representam a medida da vulnerabilidade de cada estrutura ao estresse hídrico. O acoplamento desses diversos módulos é, por assim dizer, o acoplamento dos diversos tempos característicos de cada órgão vegetal em particular.

As condições das simulações procuraram respeitar as condições experimentais descritas na literatura para cada caso. Para citar um: a condição de manter constante o potencial hídrico do solo é equivalente ao controle da umidade a partir de regas.

A possibilidade de se criar símbolos para circuitos e utilizar o símbolo como um novo dispositivo facilita a compreensão do processo, evita erros e permite uma comunicação entre os usuários. Podendo ser essa potencialidade do sistema utilizada para o ensino. O simulador permite também “encapsulamentos de ordem superior”, como foi o caso da união dos módulos de raiz, caule, folha e estômato para se formar o módulo árvore. É possível se unir módulos árvores para se fazer uma comunidade e módulos comunidade para se estudar um ecossistema inteiro.

Por outro lado, é possível se avançar na modelagem de efeitos mínimos, partindo-se das características físicas e estruturais da planta que, esperase, acoplados produzam resultados significativos. O movimento do torus no xilema, a permeabilidade da membrana plasmática hiperpolarizada, a influência do vento sobre a folha, a influência das concentrações de CO_2 na condutância estomática e a arquitetura da copa são algumas das possibilidades de fenômenos cujos modelos físicos ou fisiológicos já existentes podem ser transladados para a linguagem QUCS e acoplados aos módulos já criados. No balanço hídrico, outros termos além dos anteriormente prescritos podem também ser implementados. Pretende-se futuramente modelar inclusive os equipamentos de medida.

A resistência estomática está modelada neste trabalho em função dos potenciais de turgescência das células guarda e da epiderme. Esses potenciais de turgescência foram avaliados em função do potencial hídrico dessas células resultando nos coeficientes P_g e P_e da equação que o circuito estômato obedece. A planta pode, em parte, sustentar os valores dos potenciais de turgescência ao aumentar o potencial osmótico, o que pode ser feito de forma passiva, a partir da síntese de carboidratos, ou ativamente, com gasto de energia armazenada.

Os sinais, no entanto, não são independentes e nisso consiste a não-linearidade do sistema. Ambos os potenciais dependem de síntese de carboidratos, radiação solar (azul e vermelha), fito-hormônios etc. e, principalmente, um sinal depende do outro. Um resultado importante, portanto, foi observar oscilações do fluxo hídrico quando há queda brusca na umidade relativa do ar. Este resultado está em acordo com o esperado em uma modelagem da realimentação (*feedback*) entre as células de uma folha (que depende da quantidade de água armazenada) por um oscilador astável modificado com relaxação. No coração desse oscilador está o transistor: um resistor cujo controle é exercido pelo próprio sistema.

O oscilador astável, no entanto, como encontrado na literatura não possui amortecimento, isso implicaria em um ganho ambiental igual a 1. Da mesma forma, é possível compreender que há possibilidade de injeção de energia de modo a produzir um ganho ambiental maior que 1.

A observação de uma série de estados estacionários, com valores diferentes de carga hídrica do solo, como é o caso do experimento de Denmead e Shaw produzir o mesmo efeito de um descarregamento do solo, como previsto por Thornthwaite e Mather, implica na condição de o controle estomático sobre uma série de regimes estacionários ser equivalente ao descarregamento em regime transitório de circuitos Resistivo-Capacitivos. A abertura estomática, que responde aos sinais dos potenciais hidrostáticos das células da folha, é, portanto, resposta dos estoques de água das células das folhas ou dos estoques do solo. A função capacitiva torna-se fundamental para a descrição do fluxo hídrico, dado que, é possível afirmar que os estoques moderam e modelam o fluxo hídrico. Incluindo-se assim, o “tempo” na modelagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSON, A. W.; GAST, A. P. **Physical Chemistry of Surfaces**, 6a ed., Ney York: John Wiley and Sons Inc. 1997
- B.LOG.IA 2.0 **Anatomía y fisiología vegetal III: estructuras implicadas en el transporte**. Disponível em <http://20.blogspot.com/2010/12/anatomia-y-fisiologia-vegetal-iii.html>. Acessado em 20/02/2011.
- BAKSHI, U.A.; GODSE, A. P. **Analog Electronics**. 5. Ed. India, Pune: Technical Publication Pune. 2009.
- BETTS et al. Impact of agriculture, forest and cloud feedback on the surface energy budget in BOREAS. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, p. 156-169, 2007.
- BILDES, M.S. **Balço de energia em área de vegetação monodominante de camará e pastagem no norte do pantanal**. - Cuiabá, 2008.149p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical. Universidade Federal de Mato Grosso.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Phys. Rev. Ser.** Vol. 2, 1926. p. 779-787.
- BUCKLEY, T.N. et al. A hydromechanical and biochemical model of stomatal conductance. **Plant, Cell & Environment**, 26: 1767–1785. 2003.
- BUCKLEY, T.N. The control of stomata by water balance. Tansley Review. **New Phytologist**. 168: 275–292. 2005.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, 1995.
- COSTA, A. R. **As Relações Hídricas das Plantas Vasculares**. 2001. Disponível em <http://www.angelfire.com/ar3/alexcosta0/RelHid/RhwIndice.htm>. Acessado em 07/09/2010.
- COWAN, I.R. Oscillations in stomatal conductance and plant functioning associated with stomatal conductance: Observations and a model. **Planta**, 106: 185-219. 1972a.

- COWAN, I.R. An Electrical Analogue of Evaporation from, and Flow of Water in Plants. **Planta**, 106: 221-226. 1972b.
- DAMÉ, R. C. F. et al. Simulação de precipitação com duração horária mediante o uso do modelo Bartlett-Lewis do pulso retangular modificado. **R. Bras. Agrobiologia**, Pelotas, v.13, n.1, p.13-18, jan-mar, 2007.
- DENMEAD, O.T.; SHAW, R. H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. **Agronomy J.** 54:385-90, 1962.
- DEWAR RC. The Ball-Berry-Leuning and Tardieu-Davies stomatal models: synthesis and extension within a spatially aggregated picture of guard cell function. **Plant, Cell e Environment** 25: 1383–1398. 2002.
- DIXON H. H. ; JOLY J. On the ascent of sap. Phil. Trans. Royal Society of London B, **Biological Sciences** 186, 563–576. 1894.
- DOURADO-NETO, D. et al. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)**, v.67, n.1, p.87-95, January/February. 2010.
- FARQUAR, G.; COWAN I. Oscillations in Stomatal Conductance: The Influence of Environmental Gain. **Plant Physiol.** 54. 1974. pp 769-772.
- FITTER, A.; HAY, R. **Environmental Physiology of Plants**. 3.ed. Cornwall – Great Britain: Academic Press. 2002.
- GALLON, M.M.P. **Um estudo sobre a dinâmica de sistemas complexos a partir de séries temporais de dados microclimatológicos para uma floresta de transição no noroeste de Mato Grosso**. 115p. Dissertação de Mestrado. UFMT, Cuiabá – MT, 2005.
- GOMES, A. G.; VARRIALE, M. C., **Modelagem de Ecossistemas: Uma Introdução**. RS. Santa Maria: Ed da UFSM. 2001. 503pp
- HARRIS, P. P. et al. Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**. 122. 2004. pp. 215–227.
- JARVIS P. G. et al. Coniferous forests. In: MONTEITH, J.L. (Ed.) **Vegetation and the Atmosphere**. Case Studies London: Acad. Press, v.2, 171-240, 1976.
- JARVIS, A. J.; DAVIES, W. J. The coupled response of stomatal conductance to photosynthesis and transpiration. **Journal of Experimental Botany**, Vol. 49, Special Issue, March 1997. pp. 399–406.

- JOHANSSON A.; PRYTZ G. **Period Doubling of Rhythmic Water Regulation in Plants**. In: Biological Rhythms. Editor: Vinod Kumar. New Delhi: Narosa Publishing House. 2002.
- KATO, E.R.R. **Circuitos Osciladores – Engenharia de Computação**. Disponível em www2.dc.ufscar.br/~kato/Download/osciladores.pdf. Acessado em 01/03/2011.
- KIRKHAM, M.B. **Principles of Soil and Plant Water Relations**. USA: Elsevier Academic Press, 2005.
- LAIO F. et al., Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress. II. Probabilistic soil moisture dynamics. **Advances in Water Resources** 24. 2001.pp 707-723.
- LANG, A. et al. Leaf Water Balance During Oscillation of Stomatal Aperture. **Plant Physiol.** 44. 1969. pp 826-830.
- LELLES et al., Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. **Scientia Forestalis**, n. 59 pp. 77-87, jun. 2001
- LESURF, J. **Bipolar Transistors**. University of St. Andrews. Disponível em st-andrews.ac.uk/~www_pa/Scots_Guide/info/comp/active/BiPolar/page1.html. Acessado em 14/06/2011.
- MARIANO, R. T. G. **Análise Espectral de séries temporais de variáveis microclimatológicas em uma área de ecótono entre os biomas Amazônia e Cerrado no norte de Mato Grosso** - Cuiabá, 2008.100p Dissertação (Mestrado) Instituto de Física, Departamento de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.
- MITA, M. e TOSHIYOSHI, H. An equivalent-circuit model for MEMS electrostatic actuator using open-source software Qucs. **IEICE Electronics Express**, Vol. 6, No.5, 256-263. 2009.
- NOBEL, P.S. **Physicochemical and Environmental Plant Physiology**, 4th edition, San Diego, CA Academic Press/Elsevier 1-582. 2009.
- NOY-MEIER, I. Desert ecosystems: environment and producers. *Ann Rev Ecol Syst* 1973; 4:25-51.
- ÖPIK, H.; ROLFE, S. **Physiology of Flowering Plants**. 4.ed. New York: Cambridge University Press. 2005.

- PASSOS, M. A. B.; MENDONÇA, M. S. de. Epiderme dos segmentos foliares de *Mauritia flexuosa* L. f. (Arecaceae) em três fases de desenvolvimento. **Acta Amazônica**. Manaus, v. 36, n. 4, Dez. 2006.
- PHILIP, J. R. Plant water relations: Some physical aspects. **Annu. Rev. Plant Physiol.** 17, 245-268. ,1966.
- RODRIGUEZ-ITURBE et al. **Some models for rainfall based on stochastic point process**. Proceedings of the Royal Society of London, London, Series A, v.410, n.1839, p.269-288, 1987.
- SALISBURY, F. e ROSS, C. **Plant Physiology**. Belmont: Wadsworth Publishing Company , 1992.
- SALINAS, S. R. A. **Introdução à Física Estatística**. São Paulo: EdUSP, 2005.
- SCODILIS, T. et al. Qucs Work Book. 2007. Disponível em qucs.sourceforge.net/docs.html. Acessado em 03/12/2010.
- SOBIOLOGIA. **Tecidos Vegetais**. Disponível em www.sobiologia.com.br/conteudos/Morfofisiologia_vegetal/morfovegetal18.php. Acessado em 20/02/2011.
- SQUIRE et al. Crop growth in semi-arid environments. IN: **Proceedings of the International Pearl Millet Workshop**. ICRISAT Center, India, 1987.
- TAIZ, L. e ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 3. ED. Sunderland: Sinauer Associates, Inc., Publishers. 1998.
- TALBOOT e ZEIGER, The role of sucrose in guard cell osmoregulation. **Journal of Experimental Botany**, Vol. 49, Special Issue, pp. 329–337, Março, 1998.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, JR. **The Water Balance**. Laboratory of Climatology, Centerton, NJ, USA. 1955.
- TUZET A. et al. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. **Plant, Cell and Environment**, **26**, 1097–1116. 2003.
- VAHISALU et al, SLAC1 is required for plant guard cell S-type anion channel function in stomatal signaling. **Nature**, 452(7186):487-91 2008.
- VERRUIJT, A. **Soil Mechanics**. An elementary textbook for students of civil engineering. Screen Version. Delft University of Technology. Disponível em <http://geo.verruijt.net/software/SoilMechBook.pdf>. Acessado em 15/12/2010.

VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre o Balanço de Energia em cultura de Arroz**. 78 p. Tese (Meteorologia Agrícola). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1973.

WEYERS, J.D.B. e H. MEIDNER “Methods in Stomatal Research”. **Essex: Longman Scientific and Technical**. 1990.

ZWEIFEL, R. et al. Stomatal regulation by microclimate and tree water relations: interpreting ecophysiological field data with a hydraulic plant model. **Journal of Experimental Botany**, Vol. 58, No. 8, 2007. pp. 2113–2131.

APÊNDICE A – CONDUTIVIDADE DO SOLO

Para avaliar se esse valor está em acordo com o da condutividade expressa na Tabela 1, é necessário, inicialmente, se estabelecer uma relação de conversão das unidades de condutividade hidráulica de $\text{m}^2 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ para m/s , com base na expressão:

$$k = \frac{f}{A (\Delta\psi/\Delta L)} \quad (49)$$

O potencial hídrico de uma coluna de água pura de 1 m de altura é equivalente a 10^4 Pa. Considera-se a massa específica da água $\rho_{\text{água}}=10^3 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e o campo gravitacional da Terra $g=10 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$. A relação de conversão (\equiv) será:

$$[k] = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \equiv \frac{\text{m}^3/\text{s}}{\text{m}^2(10^4\text{Pa}/\text{m})} = 10^2 \text{m}^2 \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (50)$$

A condutividade também pode ser obtida da resistência, a partir da relação $k = \Delta L/RA$. Supõem-se que esta planta esteja em uma parcela de solo de 10 m^3 de volume ($Z_r=10\text{m}$ e $A=1\text{m}^2$). Porém, a diferença de potencial de $0,2 \text{ MPa}$ é medida com relação à distância de 1 cm da raiz ($\Delta L \cong 0,01 \text{ m}$). A condutividade hídrica desse solo está, portanto, na ordem de $10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

Ao se aplicar a relação de conversão (50), obtêm-se que a condutividade hídrica está na ordem de $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Considera-se, portanto, dentro dos valores possíveis para um solo argiloso.