

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

**ANÁLOGO ELÉTRICO DA DINÂMICA
ESTOMÁTICA EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR
E POTENCIAL HÍDRICO ATMOSFÉRICO**

VINÍCIUS MARCIO RODRIGUES PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio

Cuiabá, MT, 25 de abril de 2016.

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

**ANÁLOGO ELÉTRICO DA DINÂMICA
ESTOMÁTICA EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR
E POTENCIAL HÍDRICO ATMOSFÉRICO**

VINÍCIUS MARCIO RODRIGUES PEREIRA

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

Orientador: Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio

Cuiabá, MT, 25 de abril de 2016.

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

P436a Pereira, Vinícius Marcio Rodrigues.
ANÁLOGO ELÉTRICO DA DINÂMICA ESTOMÁTICA EM
FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR E POTENCIAL HÍDRICO
ATMOSFÉRICO / Vinícius Marcio Rodrigues Pereira. -- 2016
xix, 56 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Denilton Carlos Gaio.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental, Cuiabá, 2016.
Inclui bibliografia.

1. movimento estomático. 2. simulador de circuitos. 3. transistor.
4. modelagem. 5. dispositivos hídricos. I. Título.

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

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

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

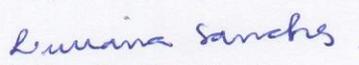
FOLHA DE APROVAÇÃO

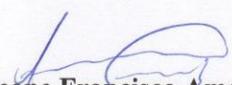
**TÍTULO: ANÁLOGO ELÉTRICO DO MOVIMENTO ESTOMÁTICO EM
FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR E POTENCIAL HÍDRICO
ATMOSFÉRICO**

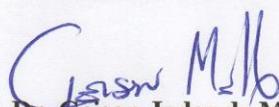
AUTOR: VINÍCIUS MÁRCIO RODRIGUES PEREIRA

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 15 de março de 2016, pela comissão julgadora:


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


Profa. Dra. Luciana Sanches
Examinadora Interna
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e
Tecnologia – UFMT


Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado
Examinador Interno
Instituto de Física - UFMT


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


Prof. Dr. Sérgio Wagner Gripp da Silveira
Examinador Externo
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais /INPE/Cuiabá

DEDICATÓRIA

À Eiriane, minha doce esposa, que está comigo nos momentos bons e difíceis e aos meus amados filhos, Maria Luísa (in memoriam), Vinícius Sávio e Miguel Gregório que são motivo de incentivo a realizar este trabalho da melhor maneira possível.

IN MEMORIAN

À meu avô José Rodrigues, que me ensinou os valores da moral e da vida durante minha infância.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Nosso Senhor Jesus Cristo que entregou sua Vida por mim e por todos para que pudéssemos viver a Vida eterna.

À Igreja Católica Apostólica Romana que, com sua Tradição de 2000 anos, construiu a Civilização Ocidental. Criou as primeiras universidades; desenvolveu com os filósofos escolásticos os conceitos básicos da economia moderna; influenciou positivamente na arquitetura e música; influenciou o direito com o direito canônico; criou praticamente todas as instituições de assistência que conhecemos (dos hospitais à previdência) e atualmente possui 24 cientistas com prêmio Nobel compondo a Pontifícia Academia das Ciências.

À minha esposa Eiriane que dedica integralmente todos os dias de sua vida educando os nossos filhos e cuidando da casa e mesmo assim é meu esteio e apoio seguro.

Aos meus pais (Erlita e Paulo “japonês”) por terem me permitido a vida.

Ao meu pai por ter me apresentado o primeiro circuito eletrônico, certamente me influenciou a chegar aos resultados deste trabalho.

Aos meus familiares que sempre acreditaram em meu esforço e me incentivaram com orgulho.

Ao Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio, que muito mais que um orientador é um amigo. Ele é o “maestro” deste trabalho, conduzindo o trabalho da melhor maneira possível;

Ao amigo e colega inpeano Prof. Dr. Sérgio Gripp que sempre me auxiliou quando lhe pedi ajuda, esta tese tem muito de sua ajuda, a quem agradeço também por suas contribuições como membro da banca de arguição;

Ao Prof. Dr. Leone “poconeano” que se mostrou um grande amigo e incentivador, agradeço também por ter aceito fazer parte da banca de arguição;

Ao Prof. Dr. Thiago “Thiaguinho” pelas conversas sobre o meu trabalho;

Aos professores. Dr. José de Souza Nogueira, Dr. Serginho, Dra. Iramaia, Dr. Carlo Ralph de Muisis, Dr. Francisco Lobo, Dr. Geraldo Diniz, Dr. Campelo, Dra. Carmen, Dra. Luciana Sanches por ter aceito fazer parte da banca de arguição, Dr. Paulo Arruda do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, que, com dedicação, transmitiram seus conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Geison Mello por ter aceito fazer parte da banca de arguição.

A todos os colegas de turma: Cristiano, Maísa, Paula, Raphael, Renan e Victor Hugo.

Ao secretário Cesário e às secretárias Soilce e Juliana pela colaboração nos serviços de secretaria, que nos auxiliou para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Pawel Rozenfelde, ao Me. Glauber Paz Miranda e ao Éder Teodoro Cardozo, ambos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo apoio e incentivo.

Ao prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos que me auxiliou com um dado muito importante da modelagem.

"Quanto mais e melhor souberes, tanto mais rigorosamente serás julgado, se com isso não viveres mais santamente."

Tomás de Kempis.

1 SUMÁRIO

SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xvi
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Problemática	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Potencial Hídrico e Mecanismos de transporte de água	3
2.1.1 Potencial hídrico osmótico ($\psi\pi$)	3
2.1.2 Pressão Hidrostática (ψp).....	4
2.1.3 Potencial Hídrico Gravitacional (ψg).....	4
2.1.4 Potencial Hídrico na fase gasosa.....	5
2.2 Estômatos.....	5
2.2.1 Estrutura do Estômato	6
2.2.2 A Luz na Abertura Estomática	7
2.3 Modelagem	10
2.3.1 Análogo elétrico-hídrico	10
2.4 Modelagem do estômato.....	15
2.5 Transistores.....	17
2.5.1 Transistor de Junção Bipolar (TJB)	17
2.5.2 Transistor de Junção por Efeito de Campo (JFET)	18
2.5.3 Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor tipo Intensificação (MOSFET).....	19
2.6 Irradiância Solar Global.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22

3.1	Simuladores de Circuito.....	22
3.2	Potencial osmótico mínimo em função da radiação solar.....	23
3.3	Equivalência fóton-elétron.....	24
3.4	Modelagem da Radiação Solar e na Atmosfera	25
	3.4.1 Modelagem da Radiação Solar no topo da atmosfera	25
	3.4.2 Modelagem da Radiação Global e Visível.....	27
	3.4.3 Modelagem das Faixas Espectrais Referentes ao Visível	28
3.5	Modelagem do Potencial hídrico da Atmosfera	29
3.6	Modelagem do Estômato	30
	3.6.1 Célula Guarda (Hiperpolarização da Membrana)	30
	3.6.2 Ostíolo (Poro Estomático).....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1	Construção e Simulação dos Módulos da Radiação Solar Atmosfera	32
	4.1.1 Simulação da Radiação Solar no topo da atmosfera	32
	4.1.2 Construção e Simulação dos Circuitos da Radiação Global	33
	e Visível	
	4.1.3 Construção e Simulação do Circuito das Faixas Espectrais	34
	Referentes ao Visível.....	
	4.1.1 Simulação do Potencial hídrico da Atmosfera	36
4.2	Construção, Simulação e Validação do Estômato	37
	4.2.1 Célula Guarda.....	37
	4.2.2 Ostíolo	40
	4.2.3 Simulação e Validação do Estômato	45
5	CONCLUSÃO.....	47
6	RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estômato de <i>Vicia faba</i>	6
Figura 2 – Influência da Pressão de turgescência sobre a abertura estomática.....	7
Figura 3 – Abertura estomática e teor de solutos.....	8
Figura 4 – Influência da luz azul na dinâmica estomática.....	9
Figura 5 – Influência da luz vermelha na dinâmica estomática.....	10
Figura 6 – Analogia à Lei de Ohm.....	12
Figura 7 – Modelo teórico de Lang.....	12
Figura 8 – Modelo de Cowan.....	13
Figura 9 – Modelo de Gaio.....	14
Figura 10 – Encapsulamento do circuito planta.....	14
Figura 11 – Circuito do estômato.....	15
Figura 12 – Circuito da pressão de turgescência.....	16
Figura 13 – Modelo estomático de Berg.....	16
Figura 14 – Transistores NPN e PNP.....	17
Figura 15 – Transistor JFET.....	18
Figura 16 – Transistor MOSFET.....	20
Figura 17 – Transistor MOSFET em funcionamento.....	21
Figura 18 – Análogo elétrico básico da modelagem em estudo.....	22
Figura 19 – Fonte de tensão e corrente.....	23
Figura 20 – Modelo simplificado da dinâmica estomática.....	24
Figura 21 – Representação do Sol.....	26
Figura 22 – Circuito referente à radiação global e radiação visível.....	28
Figura 23 – Espectro de frequência da radiação visível.....	28
Figura 24 – Circuito referente ao potencial hídrico atmosférico.....	30
Figura 25 – Analogia do estômato com transistor MOSFET.....	31
Figura 26 – Simulação da radiação solar no topo da atmosfera.....	32
Figura 27 – Construção do circuito radiação global e radiação visível.....	33
Figura 28 – Simulação da radiação global e visível.....	34
Figura 29 – Símbolo da atmosfera.....	34

Figura 30 – Circuito referente às faixas espectrais da luz visível.....	35
Figura 31 – Simulação da radiação nas faixas de 447 nm, 475 nm e 670 nm.....	36
Figura 32 – Simulação do circuito potencial hídrico atmosférico.....	37
Figura 33 – Potencial osmótico do soluto potássio.....	38
Figura 34 – Potencial osmótico do soluto sacarose.....	38
Figura 35 – potencial osmótico gerado pelos solutos cloro e malato.....	38
Figura 36 – Simulação da variação horária dos potenciais osmóticos.....	39
Figura 37 – Circuito ostíolo.....	41
Figura 38 – Simulação do fluxo hídrico em função do potencial osmótico e do potencial hídrico atmosférico.....	41
Figura 39 – Fluxo hídrico em função do potencial hídrico atmosférico.....	43
Figura 40 – Simulação do fluxo hídrico em função do potencial osmótico.....	44
Figura 41 – Simulação completa da dinâmica estomática.....	45
Figura 42 – Fluxo hídrico em função da radiação solar e do potencial hídrico atmosférico.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grandezas Análogas entre o fluxo elétrico e o fluxo hídrico.....	12
Tabela 2 – Estados estacionários para o potencial osmótico e hídrico atmosférico.....	42

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ATP	Adenosina Trifosfato
Ψ_{Pe}	Pressão de Turgescência da Célula Epidérmica
Ψ_{Pg}	Pressão de Turgescência da Célula Guarda
R_f	Resistência ao fluxo hídrico
V_{cg}	Volume do citosol da Célula Guarda
a_s	Abertura estomática
b_g	Constante de proporcionalidade da abertura estomática
c_j	Concentração do soluto “j” na célula
c_s	Concentração de solutos (mol. m ⁻³)
Π_s	Pressão Osmótica
μ_w	Massa específica da Água pura ($\mu_w = 10^3 \text{ Kg.m}^{-3}$ a 20°C e 1 atm)
Ψ_g	Potencial Gravitacional
Ψ_p	Pressão hidrostática
Ψ_π	Potencial Osmótico
NO^{-3}	Íon Nitrato
H_2O	Íon Cloro
CO_2	Fórmula química do Dióxido de Carbono
Cs^+	Íon Césio
D	Coefficiente de Difusão (m ² s ⁻¹)
EDD	Dispositivo definido por equação
H^+	Íon Próton
H^+ ATPase	Enzima da bomba iônica que atua no transporte de íons na membrana
Cl^-	Íon Cloro
K^+	Íon Potássio
Li^+	Íon Lítio
M	Massa molar da água (M=18 g)
Malato ⁻²	Ânion orgânico malato ⁻²
Na^+	Íon Sódio
O_2	Fórmula química do Oxigênio
Pa	Pascal

pl	Picolitros (10^{-12} litros)
pmol	Picomol (10^{-12} mol)
QUCS	Quite Universal Circuits Simulation
R	Constante dos Gases ($8.314E-4$ MPa.pl.pmol ⁻¹ .K ⁻¹)
Rb ⁺	Íon Rubídio
SPA	Contínuo Solo-Planta-Atmosfera
Spice	Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis
T	Temperatura absoluta do sistema
μm	Micrometros (10^{-6} metros)
V _M	Volume parcial molal da água pura
R _r	Resistência da raiz à entrada de água
z ₀	Altura de referência
Δψ	Déficit do Potencial Hídrico
Δc _s	Concentração da Substância s (mol m ⁻³)
Π _s	Pressão osmótica da célula
U.R	Umidade relativa do ar
f	Fluxo Hídrico
Pe	Pressão de turgescência da célula epidérmica
g	Campo gravitacional da Terra ($g = 9.81$ N.kg ⁻¹ ao nível do mar)
m	Vantagem mecânica da epiderme
n _j	Teor do soluto “j” na célula
μ	Potencial químico da água no estado considerado
ψ	Potencial Hídrico
ψ _{cg}	Potencial osmótico da célula guarda
E _{cg}	Energia solar absorvida pela membrana plasmática
Δt	Diferença do tempo
R ₀	Radiação solar no topo da atmosfera
Pha	Potencial hídrico atmosférico

RESUMO

PEREIRA, V.M.R.; ANÁLOGO ELÉTRICO DA DINÂMICA ESTOMÁTICA EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR E POTENCIAL HÍDRICO ATMOSFÉRICO.

Cuiabá. 2015. 70 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A dinâmica estomática é vital para a manutenção de plantas vasculares. A analogia hídrico-elétrica (*in silico*) ao utilizar, neste estudo, o software *Quite Universal Circuits Simulation* (QUCS) torna possível a realização de simulações da dinâmica estomática. O objetivo deste trabalho foi estimar o potencial osmótico da célula guarda em função da radiação solar e a correspondência fóton-elétron, para então modelar a radiação solar no topo da atmosfera como fonte de energia. Foram modelados e construídos os circuitos para a radiação global, radiação visível e as faixas espectrais referentes às frequências de 447 nm, 475 nm e 670 nm e o potencial hídrico atmosférico, os quais serviram de sinais para a dinâmica estomática. Foram modelados e construídos em duas partes: a célula guarda que utilizou uma fonte de tensão controlada por corrente e o ostíolo que utilizou um transistor MOSFET tipo intensificação canal p controlado pela célula guarda. Foram simulados todos os módulos e os resultados validados em consonância com a literatura.

Palavras-chave: movimento estomático, simulador de circuitos, transistor, modelagem, dispositivos hídricos.

ABSTRACT

PEREIRA, V.M.R.; **ANALOG ELECTRIC OF STOMATAL DYNAMIC DEPENDING ON THE SOLAR RADIATION AND POTENTIAL WATER ATMOSPHERIC**. Cuiabá. 2015. 70f. Thesis (Doctor in Environmental Physics), Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

The stomatal dynamics is vital to the maintenance of vascular plants. The hydric-electric analogy (in silico) using, in this study, the software Quite Universal Circuits Simulation (Quite Universal Circuit Simulator) makes it possible to perform dynamic simulations stomatal. The objective of this study was to estimate the osmotic potential of the guard cell as a function of solar radiation and correspondence photon-electron, and then model the solar radiation at the top of the atmosphere as an energy source for the model. They were modeled and constructed circuits for global radiation, visible radiation and the wavelengths relating to the frequencies of 447 nm, 475 nm and 670 nm and atmospheric water potential, which served signals to stomatal dynamics. They were modeled and built into two parts: guard cell that used a voltage source controlled by current and ostiole who used a MOSFET transistor type intensification p channel controlled by the guard cell. They were simulated all modules and the results validated in accordance with the literature.

Keywords: Stomatal movements, circuit Simulator, transistor, modeling, water devices.

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

Os estômatos, estruturas encontradas nos tecidos verdes das plantas, são responsáveis pelo controle da entrada de CO_2 e saída de vapor de água na folha da planta. Esse controle é muito sofisticado, pois quando entra CO_2 concomitantemente ocorre saída de vapor de água. Este último nem sempre disponível em larga escala para a planta (RAVEN, 2001; REICHARDT e TIMM, 2004).

O movimento estomático depende principalmente da demanda evaporativa atmosférica, da radiação solar, do vento e de fatores fisiológicos, dentre outros. Do ponto de vista da analogia hídrico-elétrica, o estômato pode ser estudado como se fosse uma válvula eletrônica controlada por sinais ambientais.

A grande dificuldade da modelagem hídrico-elétrica de plantas vasculares é se ter um conjunto de dados experimentais ou, em substituição a esses, teóricos verossímeis.

1.2 JUSTIFICATIVA

Utilizando analogia elétrica, devido à formalidade bem determinada das Leis da Eletricidade; o estômato, eficiente sistema de controle das trocas gasosas, necessita ainda ser estudado, compreendido e modelado, no âmbito da metodologia proposta, de tal forma que se possa encontrar um dispositivo eletrônico que tenha características semelhantes ao seu funcionamento.

Portanto, na construção, *in silico*, desse dispositivo eletrônico análogo ao ostíolo estomático, foco principal do trabalho, procurou-se justificar a plausibilidade do conjunto de aproximações adotadas, com respeito, por exemplo, ao rendimento da absorção de fótons pelo sistema; ao intervalo de umidade relativa do ar diária, dentre outras.

Até o momento, foram utilizadas analogias elétricas para estudar o fluxo hídrico no contínuo solo-planta-atmosfera (SPA), incluindo analogia teórica (LANG et al., 1969), modelagem analógica de oscilação estomática (COWAN, 1972) e modelagem *in silico* com simulação de circuitos (GAIO, 2011). Foram realizadas também modelagem matemática computacional (HILLS et al., 2012; CHEN et al., 2012 e SUN et al., 2014).

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um análogo elétrico (*in silico*) em ambiente QUCS do movimento estomático em função da radiação solar e do potencial hídrico atmosférico. Para isso, cumpriram-se os seguintes objetivos específicos:

- Estimar o potencial osmótico mínimo em função da radiação solar e a correspondência fóton-elétron;
- Modelar a radiação solar no topo da atmosfera, radiação global, radiação visível, faixas espectrais referentes às frequências de 447 nm, 475 nm e 670 nm e o potencial hídrico atmosférico;
- Modelar o Estômato, composto pela célula guarda e ostíolo;
- Construir e Simular os módulos radiação solar no topo da atmosfera, radiação global, radiação visível, faixas espectrais referentes às frequências de 447 nm, 475 nm e 670 nm e o potencial hídrico atmosférico;
- Construir, simular e validar o modelo para o estômato;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POTENCIAL HÍDRICO E MECANISMOS DE TRANSPORTE DE ÁGUA

Conforme Taiz e Zeiger (2004), as plantas são compostas de 90% a 95% de água, que é uma das substâncias mais abundantes na superfície da Terra. O modo como as plantas obtêm, transportam e armazenam a água, dada a sua imobilidade, é um dos aspectos mais importantes da Fisiologia Vegetal e envolve, fundamentalmente, o gradiente do potencial hídrico em suas estruturas.

O potencial hídrico da água é definido como o potencial químico da água por unidade volumétrica molal (COSTA, 2001), conforme a equação 1:

$$\psi = \frac{\mu - \mu_0}{V_M} \quad (1)$$

Em que μ é o potencial químico da água no estado considerado, 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. Como consequência dessa definição, o potencial hídrico (ψ) é zero quando a água, à altura de referência (z_0), está disponível em grandes quantidades, diminuindo para valores negativos quando a água se torna mais escassa.

Os principais fatores que compõem o potencial hídrico (ψ) em plantas são o potencial osmótico (ψ_π), a pressão hidrostática (ψ_p) e o potencial gravitacional (ψ_g). (NOBEL, 2009). Assim, o potencial hídrico pode ser dividido em componentes individuais, conforme a equação 2:

$$\psi = \psi_\pi + \psi_p + \psi_g \quad (2)$$

2.1.1 Potencial hídrico osmótico (ψ_π)

Quando se adicionam solutos na água, tem-se um processo irreversível que aumenta a desordem do sistema, aumentando a entropia e diminuindo o seu

potencial hídrico. Esse potencial independe da natureza específica do soluto, mas depende do número de partículas do soluto (NOBEL, 2009).

Uma aproximação, geralmente utilizada em soluções biológicas, é a relação de van't Hoff (NOBEL, 2009):

$$\psi_{\pi} = -RTc_s \quad (3)$$

Em que R é a constante dos gases e vale $8,314 \cdot 10^{-4} \text{ MPa} \cdot \text{pl} \cdot \text{pmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, T é a temperatura absoluta do sistema (K) e c_s é a concentração de solutos ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$). O sinal negativo indica que os solutos dissolvidos reduzem o potencial hídrico da solução.

2.1.2 Pressão Hidrostática (ψ_p)

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 (NOBEL, 2009).

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 (para uma célula túrgida) (ROELFSEMA e HEDRIC, 2005).

2.1.3 Potencial Hídrico Gravitacional (ψ_g)

É a energia potencial gravitacional por unidade de volume molal da água pura localizada a uma altura z do ponto de referência z_0 . (NOBEL, 2009).

$$\psi_g = \frac{Mgz}{V_M} = \mu_w gz \quad (4)$$

Nessa expressão, M é a massa molar da água (18 g), g é o campo gravitacional da Terra (9,81 Nkg⁻¹ ao nível do mar) e μ_w é a massa específica da água (10³ kg·m⁻³ a 20°C e 1 atm).

2.1.4 Potencial Hídrico na fase gasosa

Em ambientes naturais, sempre haverá água em fase gasosa dissolvida no ar. 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 (NOBEL, 2009). O potencial hídrico na fase gasosa é dado pela Equação 5:

$$\psi_V = \frac{RT}{V_M} \ln \left(\frac{U.R.}{100} \right) \quad (5)$$

2.2 ESTÔMATOS

Os estômatos são estruturas extremamente importantes para a vida das plantas, estando diretamente ligados ao controle e regulação de dois processos vitais: fotossíntese e transpiração. (BUCKLEY, 2005).

O movimento de abertura e de fechamento estomático depende das particularidades fisiológicas das células guarda e dos fatores ambientais.

O controle estomático serve para maximizar a fotossíntese e minimizar a transpiração. (KWAK et al., 2008). Os estômatos estão localizados principalmente nas folhas, mas também podem estar presentes em frutos, caules jovens e flores. (TAIZ e ZEIGER, 2004).

A densidade de estômatos nas folhas varia entre 1000 e 100.000 unidades por centímetro quadrado, dependendo da espécie, podendo variar inclusive em uma mesma planta para diferentes condições ambientais. O tamanho médio dos estômatos

está entre 3 e 12 μm de largura e 7 a 40 μm de comprimento. Cerca de 1 a 2% da área da folha é composta por estômatos (VIEIRA et al., 2010).

2.2.1 Estrutura do Estômato

Composto por um par de células epidérmicas especializadas, as células guarda são ladeadas por células epidérmicas não especializadas (TAIZ e ZEIGER, 2004). As células guarda contêm cloroplastos para realizar fotossíntese e uma fenda denominada ostíolo, entre as células guarda, por onde ocorre saída de água e entrada de CO_2 (RAVEN et al., 2001), conforme Figura 1 para um estômato de *vicia faba*.

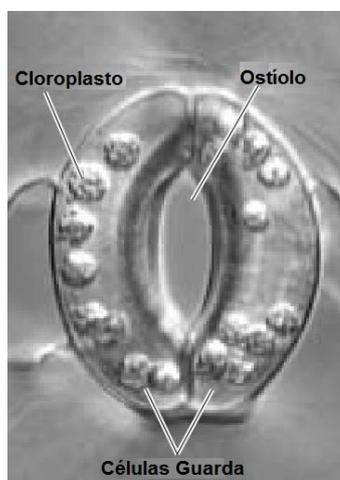


Figura 1 – Estômato de *Vicia faba*.
Fonte: adaptado de Taiz e Zeiger (2004).

As células guardas possuem uma grande diversidade de formas, no entanto, a mais comum é a forma de “rim”.

Conforme Taiz e Zeiger (2004), quando as células guarda estão pouco túrgidas, o poro está fechado, e, quando estão túrgidas, o poro estomático está aberto. Isso ocorre devido ao espessamento da parede interna das células guarda.

O acúmulo de sais de potássio (k^+) e açúcares nas células guarda resulta em uma diminuição no potencial hídrico e subsequente absorção de água, aumentando o volume das células guarda e promovendo a abertura dos estômatos (VAVASSEUR e RAGHAVENDRA, 2004).

Conforme Buckley (2005), a pressão de turgescência da célula guarda (Ψ_{Pg}) e a pressão de turgescência da célula epidérmica (Ψ_{Pe}) regulam a abertura estomática, que pode ser descrita na seguinte equação:

$$a_s = b_g(\Psi_{Pg} - m\Psi_{Pe}) \quad (6)$$

Em que a_s é a abertura estomática, b_g é a constante de proporcionalidade da abertura estomática e m é a vantagem mecânica da célula epidérmica, a qual tem sinal negativo devido ao movimento contrário ao de abertura.

Na Figura 2, tem-se a representação da equação (6). (a) para valores equivalentes de Ψ_{Pg} e Ψ_{Pe} ; (b) o aumento da turgescência Ψ_{Pg} nas células guarda, aumentando a abertura estomática; (c) o aumento da turgescência nas células epidérmicas Ψ_{Pe} ; fechando o poro estomático.

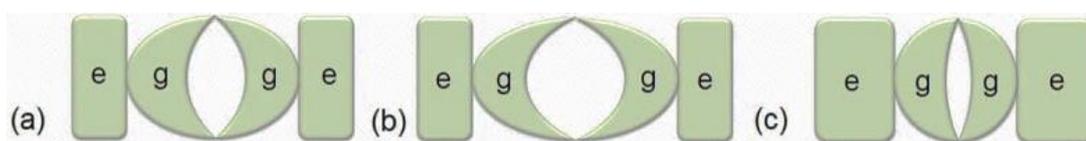


Figura 2 – Influência da Pressão de turgescência sobre a abertura estomática. Representação esquemática da equação 6. (a) Células guarda (g) e epidérmicas (e) em equilíbrio. (b) Pressão de turgescência da célula guarda maior que a epidérmica fazendo com que o estômato se abra. (c) Pressão de turgescência da célula epidérmica maior que a da célula guarda fazendo com que o estômato se feche.

Fonte: adaptado de Gaio (2011)

2.2.2 A Luz na Abertura Estomática

A abertura estomática é induzida pela radiação solar, principalmente nas faixas de 447 nm (violeta), 475 nm (azul) e 670 nm (vermelho) (SHIMAZAKI et al., 2007; DIETERLE et al., 2001). A radiação nas faixas do violeta e do azul funciona essencialmente como um sinal para desencadear a abertura estomática e na faixa do vermelho tanto como sinal e como fonte de energia (SHIMAZAKI et al., 2007; TAKEMIYA e SHIMAZAKI, 2010).

A radiação solar desencadeia os processos de captação de íons potássio (K^+) e produção de açúcares nas células guarda (DREYER e UOZUMI, 2011;

JOSHI-SAHA et al., 2011; KOLLIST et al., 2014; BENITO et al., 2014; NIEVES-CORDONES et al., 2014), no entanto, ainda existem dúvidas entre os pesquisadores sobre como a luz promove esse processo (KIM e LEE, 2007).

Talbott e Zeiger (1998) apresentam o comportamento da concentração de solutos para células estomáticas da espécie *Vicia faba* (Figura 3). O teor de potássio tem um pico entre 10 e 11 horas da manhã e declina até às 13:30 h. Ocorre então um leve aumento até às 15 horas, a partir desse ponto declina até o final do ciclo de luz diária. A sacarose, produto da fotossíntese, tem seu pico de concentração aproximadamente às 17 horas.

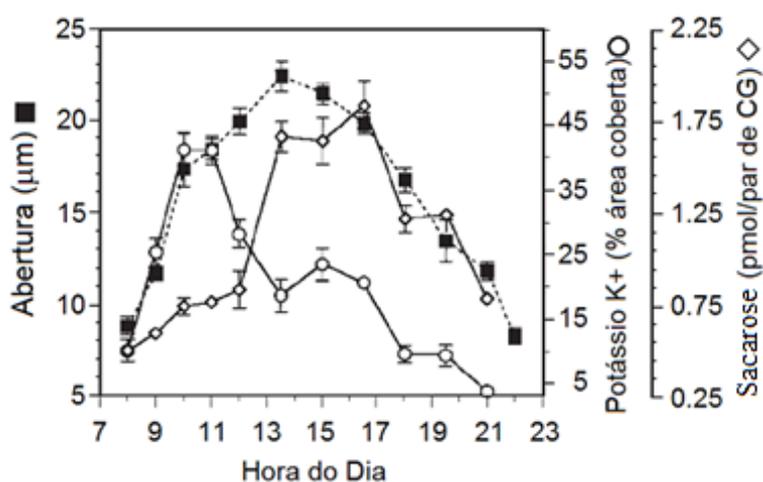


Figura 3 – Abertura estomática e teor de solutos. Teor de potássio e sacarose na célula guarda do estômato de *Vicia faba*. O teor de potássio é expresso pela porcentagem da área da célula guarda coberta por mancha da substância. O teor de sacarose é expresso em pmol por par de células guarda. Fonte: adaptado de Talbott e Zeiger (1996); Talbott e Zeiger (1998).

De acordo com Frechilla et al. (2004) e Taiz e Zeiger (2004), a radiação na faixa do azul é o principal sinal ambiental que controla a dinâmica estomática em plantas bem hidratadas. Ela age como um sinal em curto período de incidência (pulso de 30 a 60 s), induzindo a abertura estomática, que pode ser mantida por mais de 10 minutos após o pulso (IINO et al., 1985).

Quando a radiação na faixa do azul incide sobre a membrana plasmática do estômato, é ativado um processo de extrusão de prótons (H^+) por meio da bomba H^+ ATPase, hiperpolarizando a membrana (ASSMANN et al., 1985; WU et al., 1995; TOMINAGA et al., 2001; GOH et al., 2002). Para compensar a falta de prótons H^+ , é

aberto um canal para entrada de íons potássio, chamado bomba de potássio (SHIMAZAKI et al., 2007). Para contrabalancear a carga positiva devido ao acúmulo de potássio, ocorre a entrada de íons cloro (Cl^-) (ROELFSEMA e HEDRIC, 2005; WANG et al., 2013; BENITO et al., 2014). Esses solutos diminuem o potencial hídrico promovendo a absorção de água (SHIMAZAKI et al., 2007). Com isso o volume das células guarda é aumentado, alargando a abertura do estômato (FRANKS et al., 1995) (Figura 4).

A radiação na faixa do azul também causa a degradação do açúcar acumulado no cloroplasto da célula guarda que disponibiliza a sacarose e participa da síntese do malato⁻² (GAJDANOWICZ et al., 2011; LAWSON, 2009). Os íons potássio, cloro, malato⁻² e a sacarose são os principais solutos que alteram o potencial hídrico das células guarda (TALBOTT e ZEIGER, 1998; DE ANGELI et al., 2007).

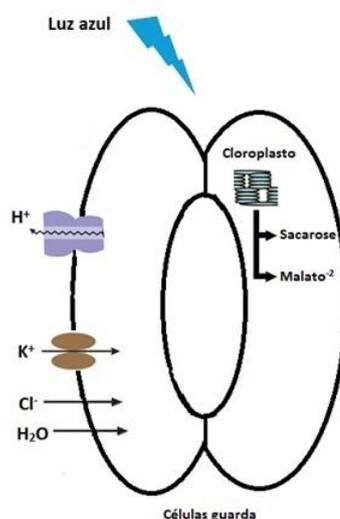


Figura 4 – Influência da radiação azul na dinâmica estomática. A radiação azul incide na membrana, ativando a bomba H^+ ATPase, que ativa a bomba de potássio e incita a entrada de íons cloro. Ocorre então a entrada de água nas células guarda, aumentando a pressão osmótica e abrindo o estômato. A radiação azul também degrada açúcar (sacarose) e auxilia na síntese do malato⁻². A luz azul funciona como um sinal para o movimento estomático.

Fonte: Pereira (2013)

A radiação na faixa do vermelho é absorvida pelos cloroplastos das células guarda e das células do mesófilo (VAVASSEUR e RAGHAVENDRA, 2004). As primeiras fornecem ATP (energia) para o funcionamento da bomba H^+ ATPase e da bomba de potássio, e auxiliam na síntese do malato⁻² (OLSEN et al.,

2002). Já os cloroplastos do mesófilo fixam CO_2 (realizam fotossíntese), o que reduz a concentração do CO_2 (ROELFSEMA e HEDRIC, 2005). Essa redução ativa um processo que sustenta a membrana hiperpolarizada, mantendo, portanto, a bomba de potássio em funcionamento (GAJDANOWICZ et al., 2011; POFFENROTH et al., 1992) (Figura 5).

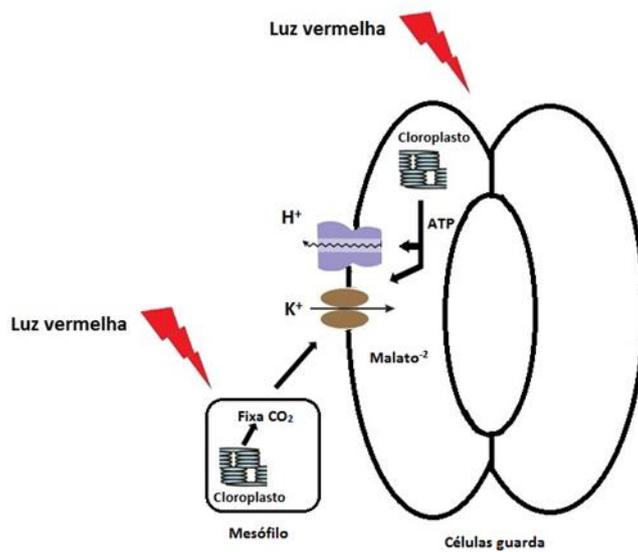


Figura 5 – Influência da radiação vermelha na dinâmica estomática. Os cloroplastos da célula guarda fornecem ATP (energia) para a manutenção da bomba H^+ ATPase e bomba de potássio além de auxiliar na síntese do malato²⁻. A concentração de CO_2 no cloroplasto do mesófilo diminui, mantendo a membrana plasmática hiperpolarizada e a bomba de potássio em funcionamento. A radiação vermelha funciona como mantenedora do movimento estomático.
Fonte: Pereira (2013).

2.3 MODELAGEM

2.3.1 Análogo elétrico-hídrico

De acordo com Tyree e Ewers (1991) desde o final da década de 1920, houve importantes contribuições para o uso da analogia do fluxo hídrico com a Lei de Ohm. Lang et al. (1969) incluíram o movimento da água através de todo o Continuo-Solo-Planta-Atmosfera utilizando a Lei de Ohm.

Considerando apenas a resistência, fluxo hídrico (f) corresponde ao déficit do potencial hídrico ($\Delta\psi$) dividido pela resistência (R_f) ao fluxo.

$$f = \frac{\Delta\psi}{R_f} \quad (7)$$

Hunt et al. (1991) estabeleceram como grandezas análogas entre fluxo elétrico e fluxo hídrico as constantes na Tabela 1, ampliando o modelo das resistências.

Tabela 1 - 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.

Fonte: Hunt (1991)

Fluxo Elétrico			Fluxo Hídrico		
Grandeza	Unidade	Relação	Grandeza	Unidade	Relação
Carga (Q)	Coulomb (C)		Volume (W)		m^3
Potencial (V)	Volt (V)	$\text{J}\cdot\text{C}^{-1}$	Potencial (ψ)	Pascal (Pa)	$\text{J}\cdot\text{m}^3$
Corrente (i)	Ampère (A)	$\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$	Fluxo (f)		$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
Resistência (R)	Omh (Ω)	$\text{V}\cdot\text{A}^{-1}$	Resistência (R)		$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$
Capacitância (C)	Farad (F)	$\text{C}\cdot\text{V}^{-1}$	Capacitância (C)		$\text{m}^3\cdot\text{Pa}^{-1}$

De acordo com Gaio (2011), o sistema de equações a ser resolvido surge da aplicação das leis de Kirchhoff para o fluxo de água.

1. 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.
2. Lei dos Nós: Considerando que o mesmo fluxo que entra é o que sai, há conservação de volume de água em qualquer ponto do circuito.

Assim, é possível criar modelos de uma planta feita por componentes análogos aos elétricos, tais como resistores e capacitores.

O modelo mais simples considerando apenas a resistência, conforme Figura 6, é composto por uma série de resistores que representam a raiz (R raiz), o caule (R caule), a folha (R folha), o estômato (R estômato) e a camada limite (R camada limite), submetidos a uma diferença de potencial entre a atmosfera e o solo. Pela 1ª Lei de Ohm, é possível determinar a corrente elétrica análoga à transpiração.

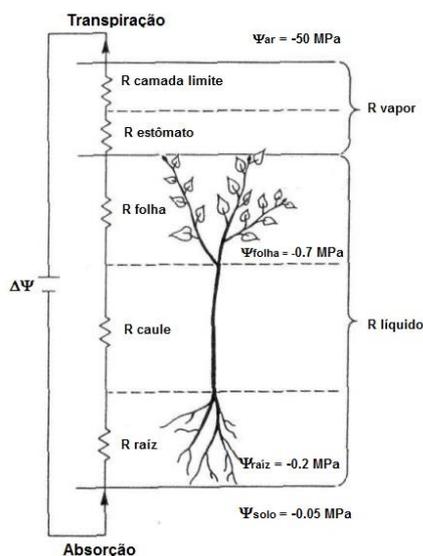


Figura 6 – Analogia à Lei de Ohm. A resistência equivalente corresponde à soma das resistências R raiz, R caule, R folha, R estômato e R camada limite. O fluxo hídrico é dirigido pela diferença de potencial entre o solo e a atmosfera, e corresponde à razão entre essa diferença de potencial e a resistência equivalente. Adaptado de TYREE e EWERS (1991).

Lang et al. (1969), na busca de uma explicação para a oscilação estomática, utilizaram uma modelagem análoga a um circuito RC (resistores e capacitores), conforme Figura 7, em que os capacitores, funcionando como armazenadores de água, permitiriam a defasagem entre a entrada e a saída de água. Mas 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 em que o fluxo hídrico oscila dinamicamente.

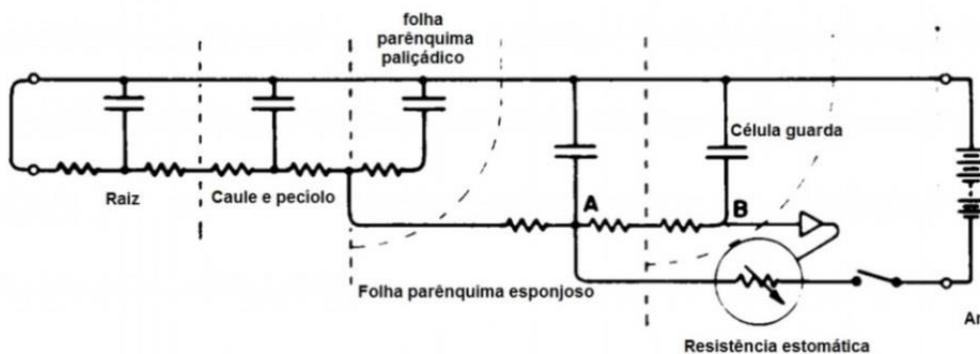


Figura 7 – O modelo teórico de Lang et al. (1969) apresenta o ostíolo estomático como um resistor variável, que depende do potencial hídrico da folha.

Cowan (1972) elaborou um análogo elétrico mais complexo, composto de três blocos denominados “transpiração”, “relação planta-agua” e “abertura estomática”, conforme Figura 8, em que a planta é controlada pela taxa de transpiração (i_p), resistência da raiz à entrada de água (R_r), potencial hídrico do solo (Ψ_0) e potencial osmótico da célula guarda (Δ), obtidos experimentalmente para alimentar o modelo. Nele, a função capacitiva contribui para a explicação das oscilações estomáticas, bem como a não linearidade do fluxo hídrico.

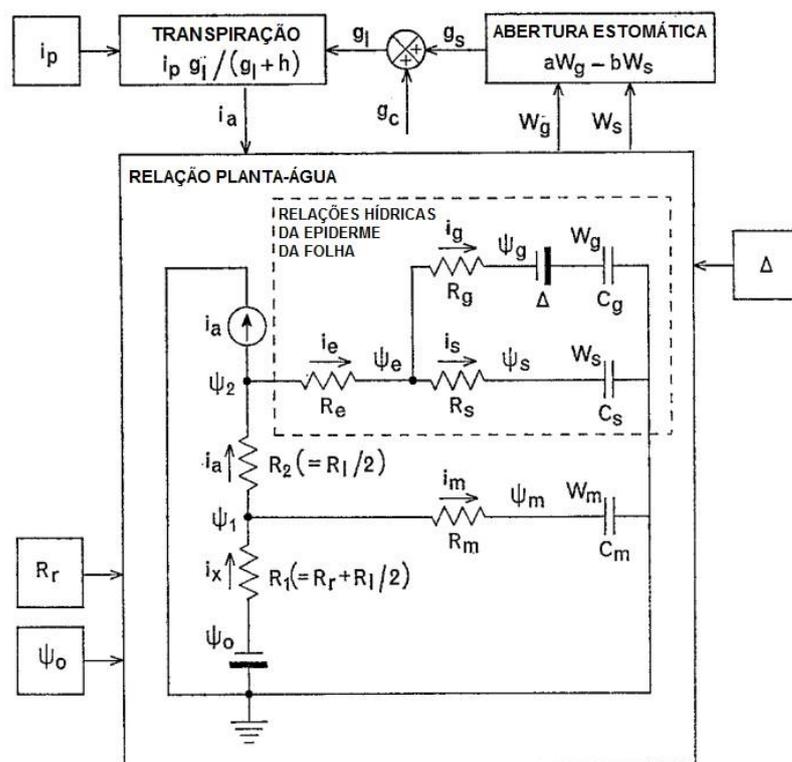


Figura 8 – Modelo de Cowan contendo três blocos, transpiração, relação planta-agua e abertura estomática. R_r corresponde à resistência da raiz à entrada da água, Ψ_0 ao potencial hídrico do solo, Δ ao potencial osmótico da célula guarda e i_p à taxa de transpiração; são os sinais que afetam o fluxo hídrico no modelo. O bloco abertura estomática é composto por equações fisiológicas que regem a dinâmica estomática. O bloco transpiração retroalimenta a planta para obtenção de um melhor controle da planta.

Fonte: Adaptado de Cowan (1972).

Gaio (2011) elaborou um análogo elétrico para cada parte do SPA (solo, raiz, caule, folha, estômato, atmosfera e também precipitação) que foi encapsulado em símbolos, conforme Figura 9. Baseando-se na fisiologia, buscou-se respeitar as características de resistência e armazenagem de cada componente.

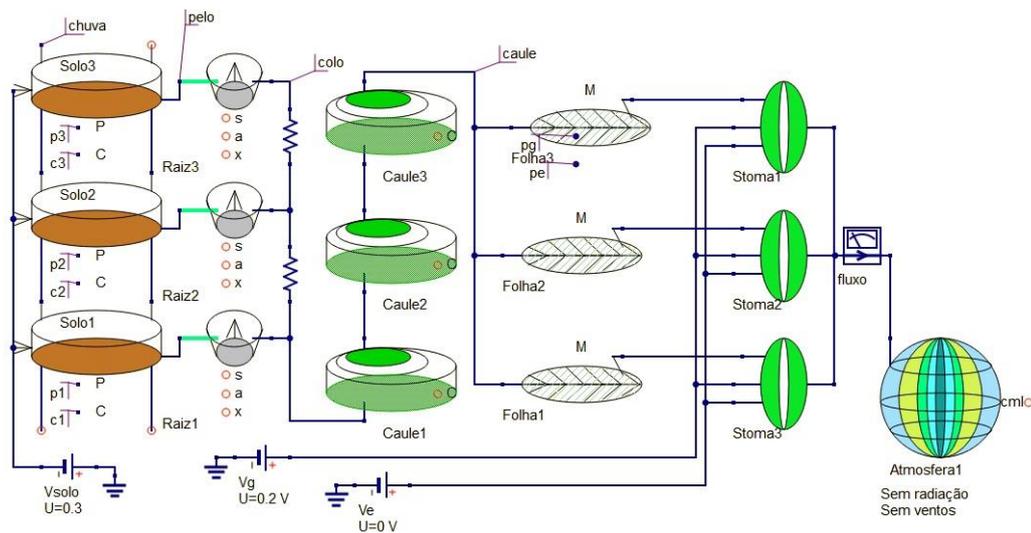


Figura 9 – Modelo de Gaio (2011). Módulos hídricos solo, atmosfera e componentes da planta (raiz, caule, folha e estômato) formando o SPA. Dentro de cada módulo hídrico existe um circuito composto por resistores e capacitores com a função de controlar e armazenar, respectivamente, o fluxo hídrico.

Pelo fato do simulador de circuitos encapsular e definir um símbolo para os circuitos, é possível simular uma comunidade de plantas com facilidade, desde que se tenham dados experimentais suficientes, conforme Figura 10.

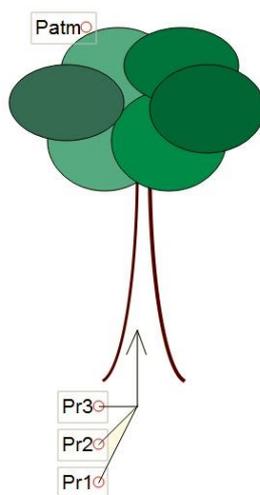


Figura 10 – Encapsulamento dos circuitos da planta. Os componentes da planta podem ser encapsulados e formar o módulo planta. Em que Pr1, Pr2 e Pr3 são as portas para conectar os módulos solo e Patm a porta para conectar o módulo atmosfera. O encapsulamento facilita a simulação de várias plantas simultaneamente.

Fonte: Gaio (2011).

2.4 MODELAGEM DO ESTÔMATO

A modelagem do estômato é um termo muito discutido para a modelagem do SPA, pois é o estômato que faz o controle do intercâmbio hídrico entre a planta e a atmosfera (KIM e LEE, 2007).

A seguir, são citados quatro modelos análogos elétrico-hídricos, bastante diferentes em suas características, apesar de todos serem construídos com base nas funções de resistência e armazenamento.

Lang et al. (1969), conforme Figura 7, foram pioneiros ao utilizar um resistor variável como análogo ao estômato para realizar o controle do fluxo hídrico, no entanto esse controle, dada a simbologia do resistor variável utilizado pelos autores, depende de ajustes manuais, o que é, obviamente, impossível. Já Cowan (1972), conforme Figura 8, sofisticou em seu modelo esse controle, que dependia do potencial osmótico da célula guarda.

Utilizando o software Simulador de Circuitos Totalmente Universal (QUCS), Gaio (2011), conforme Figura 11, desenvolveu um Dispositivo Definido por Equação (EDD) que controla o fluxo hídrico através do ostíolo, cuja resistência variável depende da pressão de turgescência da célula guarda (P_g) e da pressão de turgescência da célula epidérmica (P_e), respeitando a fisiologia da planta proposta por Buckley (2005) e Weyers e Meidner (1990).

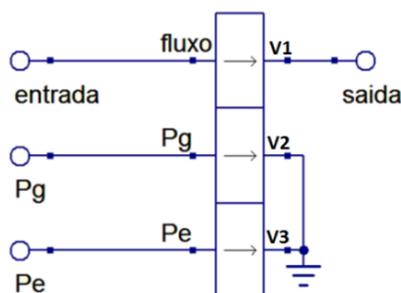


Figura 11 – Circuito do estômato. O circuito é composto por um único EDD com três ramos de potencial hídrico: entrada, P_g (pressão de turgescência da célula guarda) e P_e (pressão de turgescência da célula epidérmica). O dispositivo possui uma única saída, cuja corrente de saída obedece a equação de Weyers e Meidner (1990).

Fonte: Gaio (2011).

Pereira (2013) modelou a pressão de turgescência da célula guarda ao longo do dia utilizando parâmetros biofísicos do estômato da *Vicia faba* conforme a Figura 12, conectando o circuito na porta Pg do circuito estômato EDD (Figura 11). Dessa forma, o fluxo hídrico na saída da Figura 12 varia ao longo do dia em função da pressão osmótica (pressão de turgescência) gerada pelos solutos potássio, sacarose e cloro ao longo do dia (PEREIRA et al., 2015).

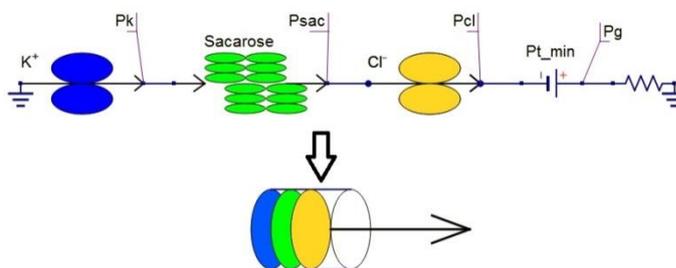


Figura 12 – Circuito da pressão de turgescência da célula guarda. Cada módulo é composto por uma fonte de tensão baseada em arquivo alimentada com valores de teor de potássio, sacarose e cloro estimados pela literatura.

Fonte: Pereira (2013).

Berg (2014) criou um modelo do estômato composto de três blocos, “poro estomático”, “célula guarda” e “célula epidérmica”, conforme Figura 13, em que por meio de variações na pressão de turgescência da célula guarda e da célula epidérmica (obtidas em laboratório com plantas reais) controla-se um transistor de efeito de campo (FET) (Rp) análogo ao poro estomático como aberto ou fechado.

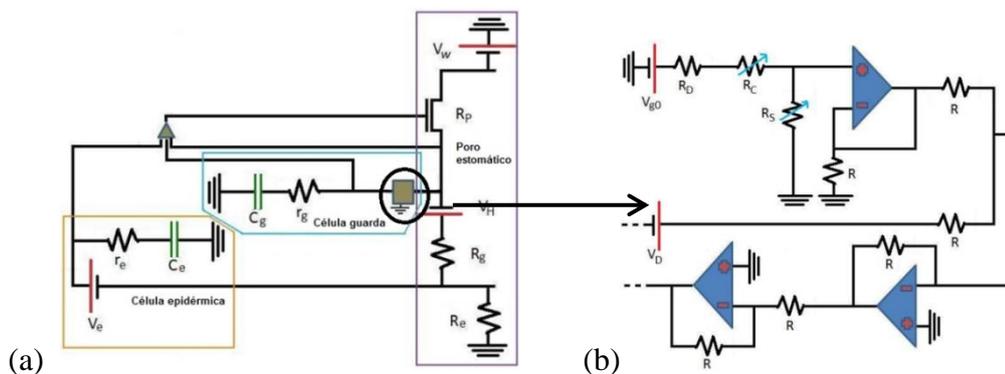


Figura 13 – Modelo estomático de Berg (2014). (a) Os módulos célula guarda e célula epidérmica são responsáveis por controlar o transistor FET que corresponde ao ostíolo ou poro estomático, controlando a abertura do estômato entre aberto e fechado. (b) Circuito principal da célula guarda (círculo preto). Os sinais que controlam o poro estomático são a concentração de CO_2 (resistor R_C) e a radiação solar (resistor R_S). Esse circuito possui também amplificadores operacionais que não tem analogia com a modelagem hídrica.

2.5 TRANSISTORES

2.5.1 Transistor de Junção Bipolar (TJB)

Conforme Boylestad e Nashelsky (2004), o transistor é um dispositivo semicondutor no qual existe uma camada do tipo p, isto é, uma camada de semicondutor (geralmente silício) dopado positivamente, entre duas camadas do tipo n (semicondutor dotado negativamente), ou uma camada do tipo n entre duas camadas p, conforme Figura 14. O primeiro é denominado transistor npn, enquanto que o último é chamado transistor pnp. O termo transistor é um acrônimo inglês para resistor/resistência de transferência.

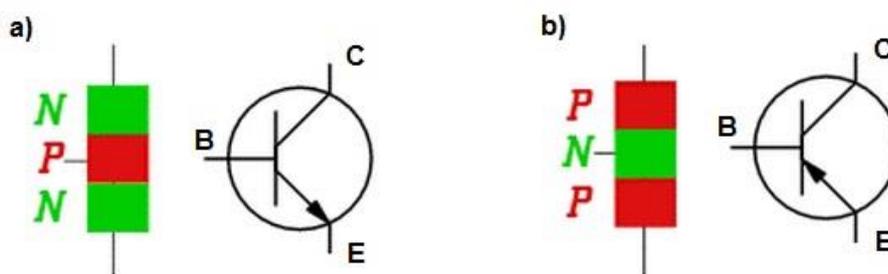


Figura 14 – Transistores NPN e PNP – O transistor é um dispositivo construído a partir de três camadas – coletor (C), base (B) e emissor (E) – de material semicondutor dopado positivamente (P) ou negativamente (N) com portadores de carga elétrica. Dois arranjos são possíveis: (a) NPN e (b) PNP. Ao lado 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 amplificada aparece entre o coletor e o emissor quando as duplas camadas (base-coletor e base-emissor) estão adequadamente polarizadas.

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 (βT). Assim, o transistor funciona como um resistor cuja resistência é controlada pela corrente da base.

2.5.2 Transistor de Efeito de Campo de Junção (JFET)

Enquanto o TJB é um dispositivo eletrônico controlado por corrente, o transistor de efeito de campo de junção é controlado por tensão. O JFET, conforme Figura 15, é um dispositivo de três terminais, com um terminal capaz de controlar o nível de corrente entre os outros dois (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004).

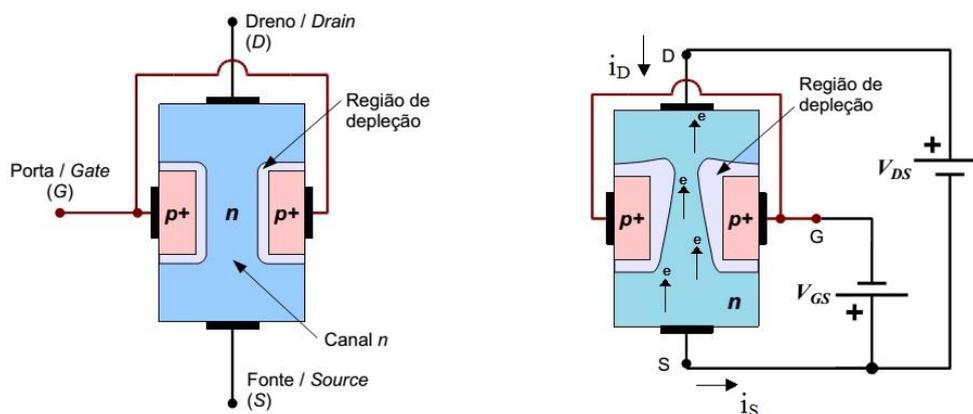


Figura 15 – é um transistor de efeito de campo que usa materiais portadores de carga colocados perpendicularmente e em contato direto com seu canal para que se possa controlar a passagem de corrente elétrica. Esses materiais podem ser do tipo P (dopado positivamente) ou do tipo N (dopado negativamente) dependendo da dopagem de seu canal, pois eles sempre serão o oposto. Com esses materiais colocados em contato direto com o canal, cria-se uma zona de depleção que é influenciada pelas tensões injetadas no Canal, fazendo com que elas se "abram" ou "fechem" mais, influenciando assim na resistência do canal do JFET.

Fonte: Boylestad e Nashelsky (2004).

De acordo com Boylestad e Nashelsky (2004) e Sedra (2007), o nome do transistor de efeito de campo deriva da essência do seu princípio de funcionamento, pois o mecanismo de controle da corrente entre fonte e dreno é baseado num campo elétrico estabelecido pela tensão aplicada na porta. Há dois tipos de JFETs (canal n e p). No caso do canal n, a maior parte da estrutura é composta do material tipo n, formando o canal entre as camadas imersas de material tipo p. A parte superior do canal tipo n está conectada através de um contato ôhmico ao terminal denominado dreno (D), enquanto que a extremidade inferior do mesmo material está ligada por meio de um contato ôhmico ao terminal referido como fonte (S). Os dois materiais tipo p estão ligados entre si e ao terminal porta (G). Em resumo, portanto, o dreno e a fonte estão conectados aos extremos do canal tipo n e a porta às duas camadas do

material tipo p. Sem um potencial aplicado, as duas junções p-n do JFET estão sob condições de não-polarização. De tal forma que, para o JFET pnp, quando se aplica uma tensão maior que zero entre dreno e fonte (V_{DS}) e a tensão entre fonte e porta (V_{GS}) é nula, os elétrons fluem da fonte para o dreno, estabelecendo a corrente convencional, sendo limitada apenas pela resistência do canal n entre fonte e dreno. É importante observar que a região de depleção é mais larga na parte superior, em ambas as camadas de material tipo p. Isso ocorre pelo fato de a corrente I_D estabelecer níveis de tensão ao longo do canal. Assim, quanto mais se aumenta o nível de V_{GS} , mais se estreita o canal e menor é a corrente I_D .

2.5.3 Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (MOSFET)

Conforme Boylestad e Nashelsky (2004) e Sedra (2007), o Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor subdivide-se em tipo depleção e tipo intensificação. Os termos depleção e intensificação definem os seus modos básicos de operação. Trataremos do MOSFET tipo intensificação.

São transistores formados pela associação entre um condutor, um isolante óxido e junções tipo p e n (um deles fortemente dopado). Assim como o JFET, seu princípio de funcionamento baseia-se no controle do canal de condução entre os terminais fonte (S) e dreno (D) através da porta de controle (G). Existem os MOSFET de canal n e de canal p. (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004).

A grande diferença entre o MOSFET tipo intensificação e outros transistores é o fato de não ter um canal de condução fisicamente implantado. A inexistência de um canal de condução entre as regiões de dreno (D) e fonte (S) tornam esse tipo de dispositivo um circuito normalmente aberto, conforme Figura 16, a menos que alguma tensão externa seja aplicada na porta (G) (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004 e SEDRA, 2007).

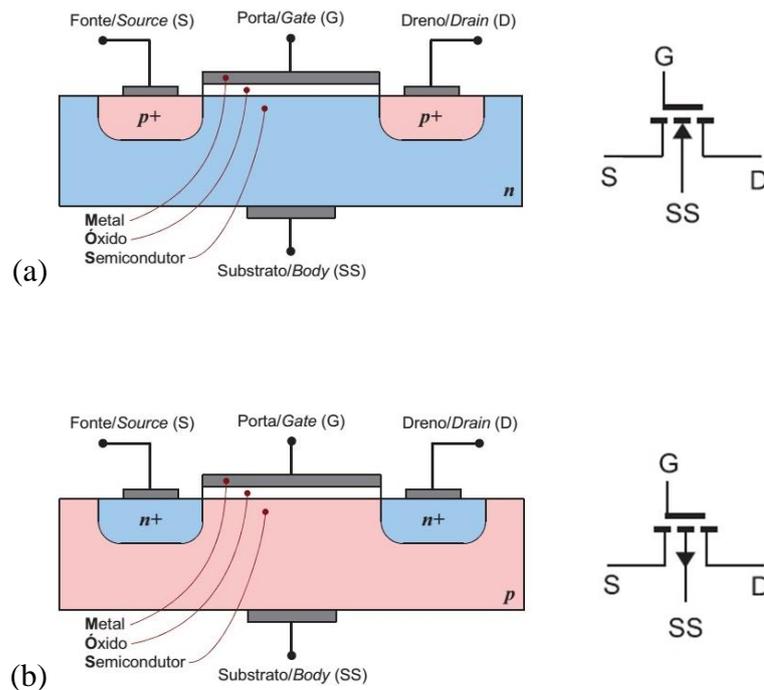


Figura 16 – Transistor MOSFET (acrônimo de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, ou transistor de efeito de campo Metal-Óxido-Semicondutor), é o tipo mais comum de transistores de efeito de campo em circuitos digitais ou analógicos. (a) MOSFET tipo p, pois possui a fonte e o dreno p, e, seu respectivo símbolo. (b) MOSFET tipo n, pois possui a fonte e o dreno n, e, seu respectivo símbolo.

Fonte: Adaptado de Boylestad e Nashelsky (2004) e Sedra (2007).

Ao se reduzir V_{GS} até um valor suficientemente baixo, denominado V_T (tensão limiar), a quantidade de cargas acumuladas torna-se suficiente para estabelecer um canal de condução tipo p, na forma de uma camada fortemente eletrizada negativamente, conforme Figura 17.

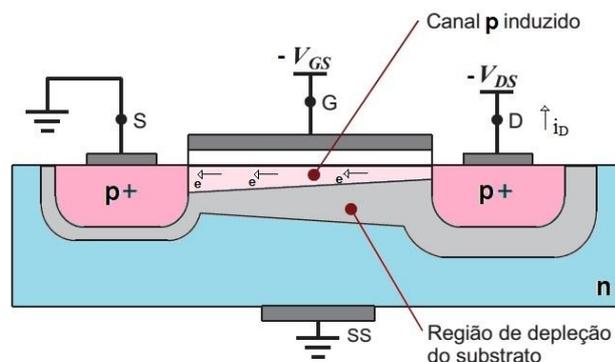


Figura 17 – Transistor MOSFET intensificação tipo p em funcionamento.
Fonte: Adaptado de Boylestad e Nashelsky (2004) e Sedra (2007).

2.6 IRRADIÂNCIA SOLAR GLOBAL

A radiação solar é considerada a principal, praticamente a única fonte de energia para os processos dinâmicos que ocorrem na Terra. Na interação da radiação solar que incide sobre uma superfície vegetada, parte dela é refletida e volta para o espaço, outra é absorvida pelo dossel e, eventualmente, pelo solo, contribuindo para o seu aquecimento (MARQUES FILHO, 1997; CURADO et al., 2011; DOS SANTOS et al., 2014).

Nem sempre é possível ter um sensor de radiação solar, assim, o valor de R_g (Radiação global) pode ser estimado a partir de medidas da razão de insolação (n/N), desde que se tenham para o local determinados os coeficientes da equação proposta por Angstrom-PreScott (equação 8). Tal equação é uma regressão linear para a Radiação global em função da Radiação solar no topo da atmosfera no instante considerado (R_0) e a razão de insolação (n/N) em que N é o fotoperíodo.

$$R_g = R_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (8)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os estômatos possuem uma grande complexidade em seu funcionamento. Apesar disso, é possível escolher as variáveis que mais influenciam em sua dinâmica, e, por meio da modelagem, obter funções análogas fisiologicamente ao estômato.

Neste estudo buscou-se modelar a estrutura completa desde a radiação solar, condições da atmosfera até a dinâmica estomática com fluxo hídrico. A estrutura elétrica simplificada se encontra na Figura 18.

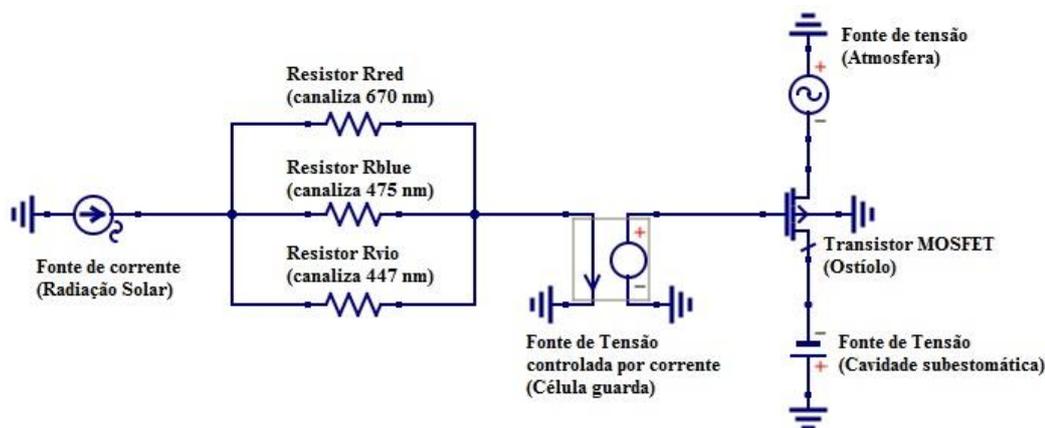


Figura 18 – Análogo elétrico básico da modelagem em estudo. A fonte de corrente funciona como fonte de radiação solar. Os resistores Rvio, Rblue e Rred canalizam as faixas de 447 nm, 475 nm e 670 nm respectivamente. A fonte de tensão controlada por corrente converte a corrente referente aos comprimentos de onda de 447 nm, 475 nm e 670 nm em tensão elétrica referente ao potencial osmótico. O transistor MOSFET controla o fluxo elétrico referente ao fluxo hídrico da cavidade subestomática para a atmosfera em função da tensão aplicada em sua entrada.

3.1 SIMULADORES DE CIRCUITO

O uso de simuladores de circuito para o cálculo do fluxo hídrico foi utilizado pela primeira vez por Gaio (2011), que na ocasião utilizou o Simulador de Circuitos Totalmente Universal (QUCS). O QUCS é uma ferramenta baseada em software livre e aberto (licença GNU). Possui também uma grande biblioteca nativa de elementos de circuito (capacitores, resistores, fontes, diodos, transistores etc.).

O QUCS permite inserir fontes de potencial contínuas, periódicas (senoidal), de tensão controlada por corrente e vice-versa, o que é útil para modelagem de variáveis estocásticas e introdução de dados experimentais, como foi o caso deste estudo, conforme Figura 19.

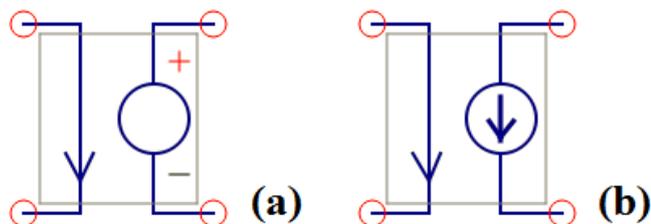


Figura 19- Fonte de tensão e corrente. (a) Fonte de tensão controlada por corrente. É um dispositivo que tem por finalidade converter a corrente elétrica em tensão elétrica, para isso utiliza a 1ª Lei de Ohm. (b) Fonte de corrente controlada por corrente. É um dispositivo, que em ambiente QUCS, que tem por finalidade converter a tensão elétrica em corrente elétrica, para isso utiliza a 1ª Lei de Ohm.

3.2 POTENCIAL OSMÓTICO MÍNIMO EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

O potencial osmótico da célula guarda (ψ_{cg}), resultante da concentração de solutos no citosol, pode ser calculado em função da quantidade de energia solar absorvida pela membrana plasmática ou pelo cloroplasto, organela responsável pela fotossíntese (E_{cg}), conforme os mecanismos descritos em Pereira (2013). Sendo V_{cg} o volume do citosol da célula guarda, tem-se para o potencial osmótico da célula guarda:

$$\psi_{cg} = -\frac{E_{cg}}{V_{cg}} \quad (9)$$

Por sua vez, a radiação solar absorvida (E_{cg}) pode ser estimada em função do rendimento dos sistemas vivos (n), da energia incidente (I) sobre a superfície da célula, de área A_{cg} , exposta a essa radiação por um intervalo de tempo Δt :

$$E_{cg} = n \cdot I \cdot A_{cg} \cdot \Delta t \quad (10)$$

O rendimento de qualquer máquina não pode ser superior ao de uma máquina de Carnot. Para o caso, o rendimento de uma máquina de Carnot que trabalhe com os comprimentos de onda de 475 nm (fonte quente) e de 965 nm (fonte fria) é 95%. Na literatura especializada não há valores experimentais do rendimento de sistemas vivos. Dada, no entanto, a alta eficiência desses sistemas, considerou-se, conforme Barber (2009), que 70% da radiação específica é aproveitada, resultando na seguinte equação:

$$\psi_{cg} = -\frac{0,7 \cdot I \cdot A_{cg} \cdot \Delta t}{V_{cg}} \quad (11)$$

Em que ψ_{cg} é o potencial osmótico da célula guarda, I é a irradiância, A_{cg} é a área da célula guarda, V_{cg} é o volume da célula guarda e Δt , o intervalo de tempo.

3.3 EQUIVALÊNCIA FÓTON-ELÉTRON

De forma simplificada (considerando somente a dinâmica estomática), o estômato converte a radiação solar em potencial osmótico. No entanto, o estômato utiliza especificamente uma estreita faixa do espectro referente ao violeta, azul e vermelho para sua dinâmica, conforme Figura 20.

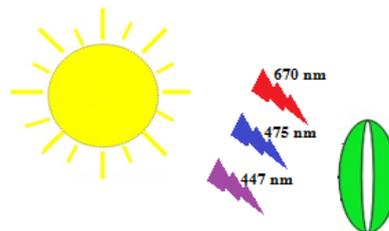


Figura 20 – Modelo simplificado da dinâmica estomática em função da radiação solar. As faixas de 447 nm, 475 nm e 670 nm são as principais responsáveis pela dinâmica estomática.

Por isso neste estudo foi necessário converter a radiação solar em corrente elétrica para encontrar o percentual de cada faixa do espectro solar. Dessa forma, conforme Gueymard et al. (2002) e Muneer (2007), o percentual referente a cada faixa do espectro solar foi convertido quantitativamente em corrente elétrica.

Posteriormente a corrente elétrica será convertida em potencial osmótico. Torna-se necessária a utilização de corrente elétrica neste modelo devido a necessidade de sinal em corrente elétrica para alimentar a fonte de tensão controlada por corrente (Figura 19a). Assim, neste modelo análogo considerou-se que cada fóton absorvido pelo sistema deverá mover um elétron. Ou seja, 1 fóton equivale a carga de 1 elétron. Dessa forma, tem-se:

$$1 \text{ fóton} \Leftrightarrow 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (12)$$

Sabendo que:

$$1 \mu\text{mol} = 6,023 \cdot 10^{17} \text{ fótons} \quad (13)$$

Encontra-se a corrente elétrica para $1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, que corresponde a $9,65 \cdot 10^{-2} \text{ A}$.

Sabendo que:

$$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = 4,65 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \quad (14)$$

Temos então, neste modelo análogo, que a absorção de $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ induzirá um aumento da corrente elétrica que equivale a 0,45 A. Assim:

$$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \Leftrightarrow 0,45 \text{ A} \quad (15)$$

3.4 MODELAGEM DA RADIAÇÃO SOLAR E NA ATMOSFERA

3.4.1 Modelagem da Radiação Solar no topo da atmosfera

A radiação solar é o principal sinal que desencadeia os processos de captação de íons potássio (K^+) e produção de açúcares nas células guarda, *mutatis mutandis*, que promove a dinâmica estomática. A faixa espectral da luz visível (principalmente as faixas azul e vermelha), por exemplo, desempenha forte papel nesse processo.

Nesta modelagem em ambiente QUCS, foi utilizada a variável ambiental radiação solar para controlar o movimento estomático.

Para representar sinais de luz no QUCS, utilizou-se uma fonte de tensão elétrica para gerar a corrente elétrica que equivale ao fluxo de fótons da radiação solar (intensidade da luz). Dessa forma, conforme Figura 21, foi utilizada uma fonte de tensão alternada com um diodo retificador em série para permitir a passagem apenas da parte positiva do sinal senoidal que é análoga à radiação solar ao longo do dia. A fonte possui uma defasagem de 270° para o ápice da meia onda ficar exatamente às 12:00 horas.

A radiação solar no topo da atmosfera (R_0) possui aproximadamente 1360 W.m^{-2} , que equivalem a 612 A, conforme equação 15. Assim, a fonte de radiação solar possui um potencial de 612 V que gera uma corrente elétrica de 612 A. Uma fonte de corrente controlada por corrente foi inserida após o diodo para fazer com que o circuito que seja conectado ao Sol não cause queda de tensão no circuito Sol, pois a potência do Sol é independente dos circuitos que serão conectados a ela.

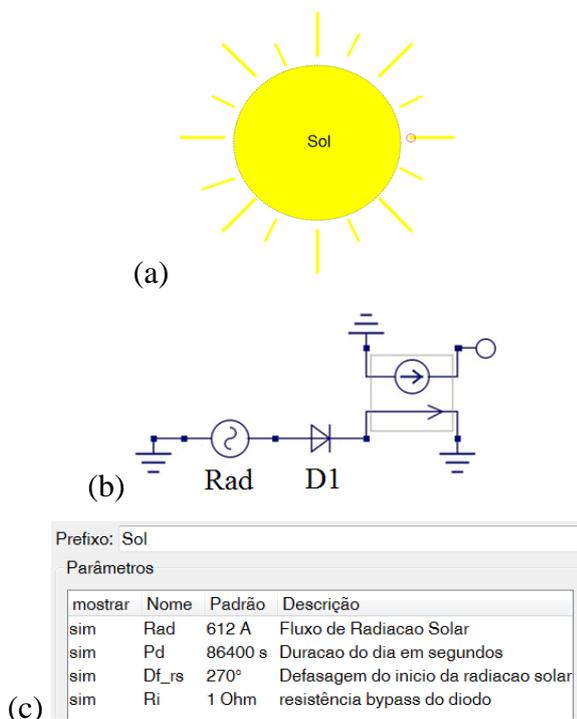


Figura 21 – (a) Símbolo do circuito Sol, em que terá o circuito da radiação solar encapsulado (b). Circuito correspondente à radiação solar no topo da atmosfera, composto por uma fonte de tensão alternada (Rad), diodo retificador (D1), fonte de corrente controlada por corrente e porta de saída. (c) Parâmetros que foram utilizados nos componentes do circuito Radiação Solar.

3.4.2 Modelagem da Radiação Global e Visível

Neste estudo, considerou-se que para Cuiabá, ao se aplicar a equação 8 no equinócio, obtém-se aproximadamente $1088 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para a radiação global que corresponde a 489,6 A.

O circuito da radiação global é composto por dois resistores em paralelo, sendo R_{ad} o resistor que representa os fatores (absorção, difusão, latitude, época do ano e cobertura do céu) da equação 8 e R_g a radiação global. Utilizou-se um divisor de correntes com os resistores R_g e R_{ad} . Este último foi aterrado, pois essa radiação não será aproveitada neste estudo. Foi colocada uma fonte de corrente controlada por corrente após R_g de tal forma que o fluxo de radiação que passa por R_g seja independente do circuito posterior, conforme Figura 22.

No entanto, nem todo o espectro da radiação solar na superfície será aproveitado para os processos envolvidos neste estudo. Somente a faixa do visível, que, segundo Jayaraman et al. (1998) possui aproximadamente 44% da radiação global, será aqui tratada:

$$R_v = R_g \cdot 0,44 \quad (16)$$

Em que R_v é a radiação na faixa espectral do visível.

Utilizando a equação 16 obtém-se a radiação na faixa do visível (R_v) de aproximadamente $478,72 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, o que equivale a aproximadamente 215,4 A.

Para o tratamento análogo da radiação global, será utilizada também a técnica de divisão de correntes com o uso de dois resistores em paralelo. O resistor R_{ocol} canaliza o fluxo elétrico relativo à radiação de ondas curtas e ondas longas que não serão utilizadas neste estudo, por isso esse resistor está aterrado. R_{vi} representa a radiação visível que estará disponível para processos posteriores. De acordo com a equação 16, R_{vi} possui 44% de R_g . Foi colocada uma fonte de corrente controlada por corrente após R_{vi} , de tal forma que o fluxo de radiação que passa por R_{vi} seja independente do circuito posterior, conforme Figura 22.

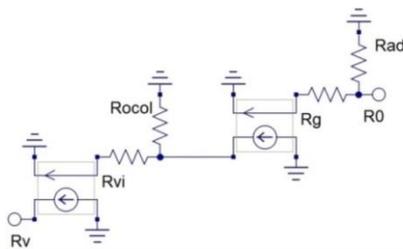


Figura 22 – Modelagem referente à radiação global e visível. Rad é o resistor que canaliza o espectro das perdas por difusão e absorção da atmosfera, Rg é o resistor que canaliza a radiação global, Rocol é o resistor que canaliza a radiação de ondas curtas e longas e Rvi é o resistor que canaliza a radiação visível.

3.4.3 Modelagem das Faixas Espectrais Referentes ao Visível

As faixas espectrais da radiação solar que nos interessam são as do violeta, azul e vermelho. Foram utilizados metadados de Gueymard et al. (2002) referentes à irradiância espectral solar. Considerando que os comprimentos de onda da luz visível compreendem a faixa entre 400 e 700 nm, foi estimada a área sob a curva dessa faixa, que corresponde à energia transportada pela radiação em $W.m^{-2}$. Com base em Muneer (2007) foi estimado o percentual energético referente a cada faixa espectral, conforme Figura 23.

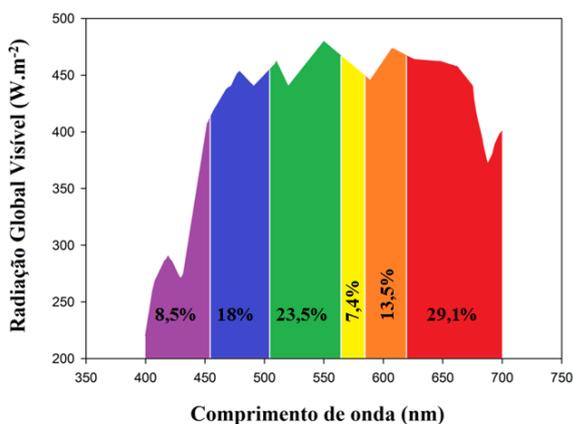


Figura 23 – Espectro da radiação visível, compreendendo 400 e 700nm. Metadados de Gueymard et al. (2002).

Assim, para essa modelagem, a radiação solar foi decomposta em seis faixas que compreendem o violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. No

circuito, cada faixa de cor possui um resistor canalizando a corrente elétrica referente a respectiva radiação, que pode ser utilizada em outros processos em novos estudos. Por isso, com exceção do violeta, azul e vermelho, as outras faixas foram aterradas. De acordo com Sharkey e Raschke (1981), Shimazaki et al. (2007) e Kang et al. (2009), o espectro de absorção na faixa do violeta e azul para a dinâmica estomática ocorre nos picos de 447 nm e 475 nm da radiação visível. Já, de acordo com Kang et al. (2009), Kami et al. (2010) e Dieterle et al. (2001), o espectro de absorção na faixa do vermelho ocorre no pico de 670 nm. Dessa forma, foi estimado o percentual referente a cada faixa (MUNEER 2007).

3.5 MODELAGEM DO POTENCIAL HÍDRICO DA ATMOSFERA

A diferença de potencial, quando é baixa a umidade relativa do ar, pode chegar a algumas centenas de atmosferas de pressão, o que drena o vapor d'água que existe na câmara subestomática. Tal fato tem forte influência na abertura estomática, pois a célula guarda ao perder água, fecha o ostíolo até recuperar a sua turgescência.

Para a análise do comportamento do ostíolo em função da umidade relativa do ar, foram atribuídos valores dentro da faixa de 60% a 80%, com variação senoidal. A aplicação da equação 6 fornece valores correspondentes para o potencial hídrico da atmosfera, o qual deverá variar de -70 MPa (correspondendo a 60% da umidade relativa do ar) a -30 MPa (80%). No entanto, o transistor MOSFET possui uma limitação de funcionamento quando a diferença das tensões entre a fonte, dreno e porta são muito grandes. Para solucionar o problema, foi feita uma regra de conversão, dividindo-se por 10 os valores dos potenciais, ficando -3 MPa e -7 MPa, respectivamente. Essa regra de conversão foi aplicada de modo inverso posteriormente na análise dos resultados.

Assim, ao modelar o potencial hídrico atmosférico ao longo do dia foi utilizada, conforme Figura 24, uma fonte de tensão de corrente contínua com -5 V em série com uma fonte de tensão alternada de -2 V que fornece o intervalo entre -3 MPa e -7 MPa.

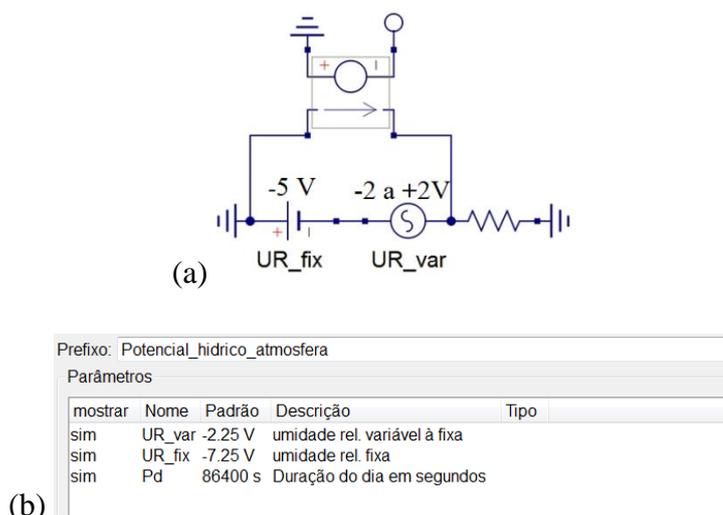


Figura 24 – (a) Circuito correspondente ao potencial hídrico da atmosfera na fase gasosa, composto por uma fonte de tensão contínua (UR_fix) em série com uma fonte de tensão alternada (UR_var), sendo estas duas em paralelo com uma fonte de tensão controlada por tensão. (b) Parâmetros das fontes.

3.6 MODELAGEM DO ESTÔMATO

A modelagem do circuito hídrico referente ao estômato foi dividida em duas partes: célula guarda e poro estomático, sendo que a hiperpolarização da membrana da célula guarda gera o potencial osmótico necessário para controlar a abertura do poro estomático.

3.6.1 Célula Guarda (Hiperpolarização da Membrana)

Na modelagem da célula guarda (hiperpolarização da membrana), uma fonte de tensão controlada por corrente desempenha o papel da bomba de potássio que ao receber a corrente elétrica, que corresponde à radiação solar nas faixas espectrais de 447 nm e 475 nm, converte essa corrente elétrica em tensão elétrica que é análoga ao potencial osmótico gerado pelo soluto potássio. Uma outra fonte de tensão controlada por corrente desempenha o papel dos cloroplastos da célula guarda e do mesófilo que ao receberem a luz na faixa de 670 nm fornecem ATP mantendo a bomba de potássio em funcionamento além de produzir a sacarose. Neste estudo, foi considerada apenas a produção de sacarose, pois estimar a quantidade de ATP seria mais complexo.

Para modelar os solutos cloro (Cl^-) e malato⁻², que acompanham a entrada do soluto potássio, para contrabalancear a carga positiva do íon potássio, na célula guarda, foi utilizada uma fonte de tensão alternada com um diodo retificador em série. O resultado é a passagem apenas do semiciclo positivo do sinal senoidal. Uma fonte de tensão controlada por corrente foi inserida após o diodo, para fazer com que o circuito posterior, ao ser conectado, não cause queda de tensão na fonte, que, neste modelo, tem o mesmo comportamento da bomba de potássio.

3.6.2 Ostíolo (Poro Estomático)

Nesta montagem, a fonte do MOSFET corresponde à porção do poro estomático ligado à câmara subestomática, enquanto que à porção do poro em contato com a atmosfera externa à folha corresponde ao dreno. O potencial osmótico da célula guarda é, finalmente, correspondente ao sinal de controle sobre o MOSFET tipo intensificação canal p. (Figura 25).

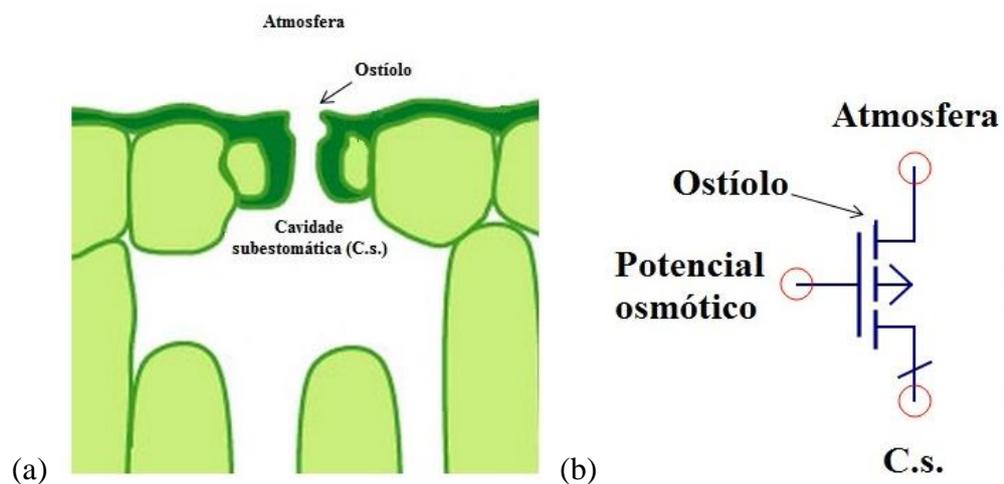


Figura 25 – (a) Corte de uma folha com ostíolo, câmara subestomática e atmosfera. (b) Transistor MOSFET tipo intensificação canal p e suas portas controle (potencial osmótico), fonte (cavidade subestomática), dreno (atmosfera) e SS (aterrado). A cavidade estomática é representada pela fonte do transistor, enquanto o ostíolo é representado pelo dreno e a atmosfera como o circuito posterior ao dreno. Já o potencial osmótico das células guarda é representado pela porta controle.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONSTRUÇÃO E SIMULAÇÃO DOS MÓDULOS DA RADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

4.1.1 Simulação da Radiação Solar no topo da atmosfera

Para se estudar o comportamento estomático, foram realizadas simulações transientes, conforme Figura 26 com períodos de um dia, isto é, 86400 s. Os circuitos foram construídos de modo a simular radiação solar nula das 00:00 às 05:59h. A partir das 06:00 h há um aumento da radiação solar, até o ápice de 612 A às 12:00 h. A partir desse horário, há diminuição da radiação até as 17:59 h, sendo nula a partir das 18:00 h. Houve, portanto 12 h de radiação solar e 12 h sem radiação solar. A curva da radiação solar modelada está de acordo com a curva de Al-Riahi et al., 2003.

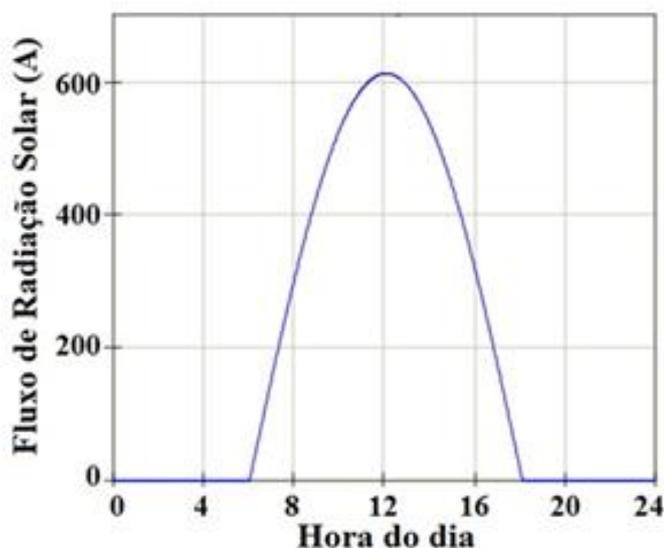
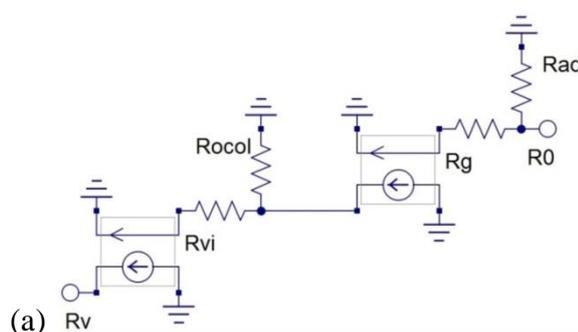


Figura 26 – Simulação do circuito radiação solar no topo da atmosfera. Foi obtida 12 h de radiação solar e 12 h de escuridão com ápice de 612 A ao meio dia.

4.1.2 Construção e Simulação dos Circuitos da Radiação Global e Visível

Foi construído o circuito referente às radiações solar global e visível, conforme Figura 27. Conforme a equação 8, R_g possui 80% da radiação de R_0 , enquanto que R_{ad} possui 20% de R_0 . Para se alcançar o valor de 80%, utilizou-se um divisor de correntes com os resistores R_g e R_{ad} , obtendo o valor de $R_g = 2 \Omega$ e $R_{ad} = 8 \Omega$.

De acordo com a equação 16, R_v possui 44% de R_g , sendo adotado, pelo método da divisão de correntes, o valor de $R_v = 5,6 \Omega$ e $R_{ocol} = 4,4 \Omega$.



(b)

Prefixo: Radiacao_visivel				
Parâmetros				
mostrar	Nome	Padrão	Descrição	Tipo
sim	Rad	8 Ohm	absor; dif; latit; cob.	
sim	Rg	2 Ohm	resistor canaliza rad. global	
sim	Rocol	4.4 Ohm	resistor canaliza onda curta e longa	
sim	Rvi	5.6 Ohm	resistor canaliza visível	

Figura 27– (a) Circuito correspondente à radiação global e radiação visível na superfície. Resistores canalizam a radiação referente à sua faixa espectral. Rad é o resistor que canaliza o espectro das perdas por difusão e absorção da atmosfera; R_g , o resistor que canaliza o espectro da radiação global; R_{ocol} , o resistor que canaliza o espectro de ondas curtas e ondas longas, e R_{vi} , o resistor que canaliza o espectro do visível. (b) Valores das resistências de cada resistor.

Foi feita a simulação da radiação global e visível dependentes do circuito radiação solar. O pico da radiação global ocorreu ao meio dia com valor de 489 A. Já a radiação visível teve um pico de 215,4 A, também ao meio dia, conforme Figura 28.

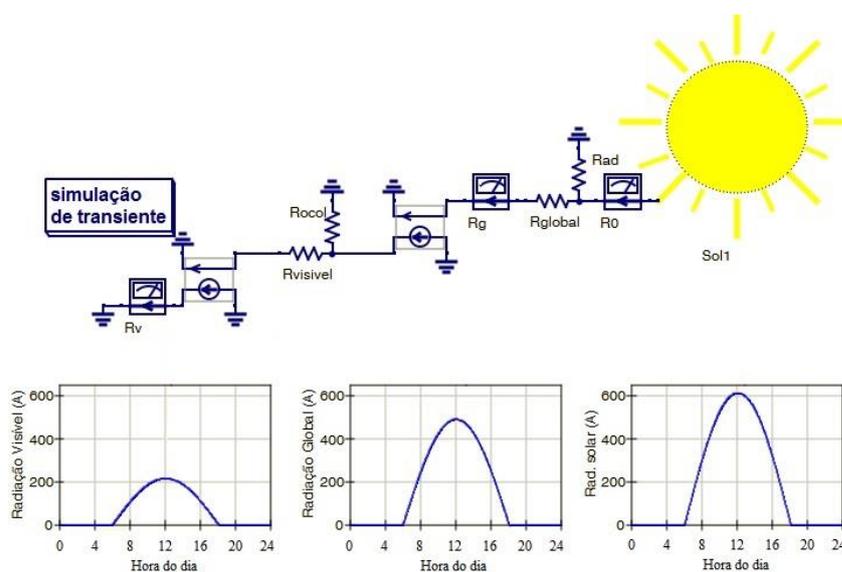


Figura 28 – Simulação da radiação global e visível. A radiação global (R_g) teve um pico de 489 A as 12 h e a radiação visível (R_{vi}) teve um pico de 215 A também as 12h. As curvas de R_g e R_{vi} estão em fase com a curva da radiação solar no topo da atmosfera.

O análogo elétrico do potencial hídrico atmosférico e da radiação solar com os efeitos da atmosfera foram encapsulados no seguinte símbolo utilizado por Gaio (2011):

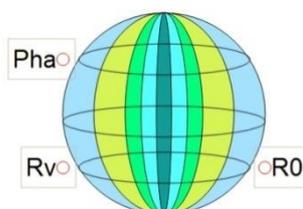
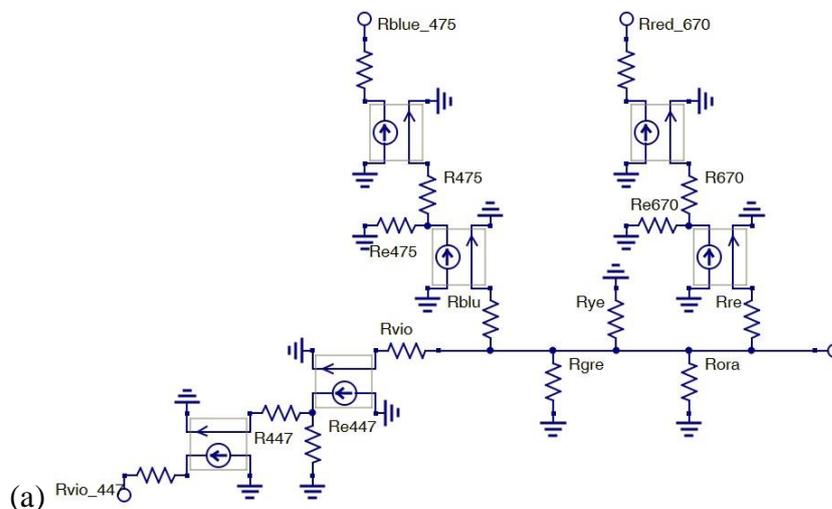


Figura 29 – Símbolo da atmosfera contendo os módulos Radiação global e a radiação visível disponível na porta R_v e Potencial hídrico atmosférico disponível na porta Pha . A porta R_0 corresponde à entrada da radiação gerada pela radiação solar no topo da atmosfera.

4.1.3 Construção e Simulação do Circuito das Faixas Espectrais Referentes ao Visível

Utilizando os metadados da irradiância espectral de Gueymard et al. (2002) e estimando o percentual energético referente a cada faixa espectral (MUNEER, 2007), pelo método de divisão de correntes, encontrou-se o valor de cada

resistor, conforme Figura 30. Assim, cada porta disponibiliza uma corrente elétrica ao circuito correspondente à energia da radiação de cada uma das faixas de 447 nm, 475 nm e 670 nm. Na Figura 30, essas portas são nomeadas como Rvio_447, Rblue_475 e Rred_670, respectivamente.



(b)

Prefixo: Rad_visivel				
Parâmetros				
mostrar	Nome	Padrão	Descrição	Tipo
sim	Rviol	11.5 Ohm	Resistencia que canaliza radiacao violeta	
sim	Rblue	5.561 Ohm	Resistencia que canaliza radiacao azul	
sim	Rgreen	4.669 Ohm	Resistencia que canaliza radiacao verde	
sim	Ryel	10.56 Ohm	Resistencia que canaliza radiacao amarela	
sim	Roran	7.271 Ohm	Resistencia que canaliza radiacao laranja	
sim	Rred	3.486 Ohm	Resistencia que canaliza radiacao vermelha	

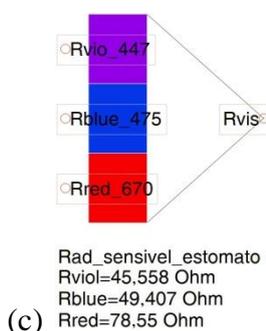


Figura 30 – (a) Circuito referente às faixas espectrais da luz visível. Há três portas de saída que canalizam as faixas espectrais de 447 nm, 475 nm e 670 nm. As faixas espectrais que não foram utilizadas neste estudo (Rgre, Rye e Rora) foram aterradas. (b) Valores dos resistores utilizados no circuito. (c) Portas que estão disponíveis para canalizar as faixas utilizadas no movimento estomático.

As curvas obtidas na simulação, conforme Figura 31, representam o percentual de radiação canalizado pelos resistores referente ao total de sua faixa

espectral específica (violeta, azul e vermelho). O pico da faixa de 447 nm foi de 0,411 A ao meio dia. Da faixa de 475 nm foi 0,784 A e da faixa de 670 nm foi 0,786 A. A radiação nessas três faixas que, neste modelo, serão responsáveis pela dinâmica estomática.

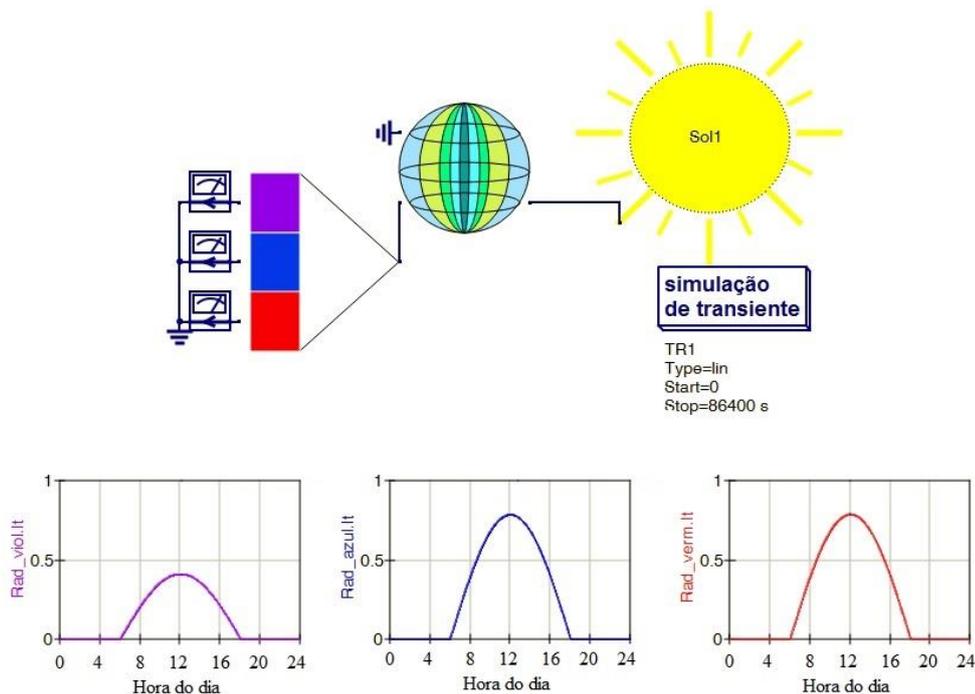


Figura 31– Simulação da variação da intensidade das três faixas espectrais (447 nm, 475 nm e 670 nm) às quais o estômato é mais sensível neste modelo. As curvas acompanham em fase e tempo a radiação global e a radiação solar no topo da atmosfera.

4.1.1 Simulação do Potencial hídrico da Atmosfera

Foi feita a simulação do circuito radiação solar no topo da atmosfera, considerando um período de 24 horas (Figura 24). A curva gerada pelo circuito, conforme (Figura 32), foi senoidal com defasagem de 150° negativa em relação às 00:00 h, para se ajustar melhor à curva encontrada por ALLEN (1998). O potencial hídrico máximo (-3MPa) ocorreu às 04:00 h e o mínimo (-7MPa) às 16 horas. A curva é semelhante à curva encontrada por ALLEN et al., 1998. No entanto, difere do último modelo em relação ao horário do potencial hídrico mínimo (06:30 h) e máximo (13:30 h) ao longo das 24 horas. O modelo de ALLEN et al., 1998, por ser

empírico, se ajusta melhor à inércia térmica da atmosfera que altera o seu potencial hídrico.

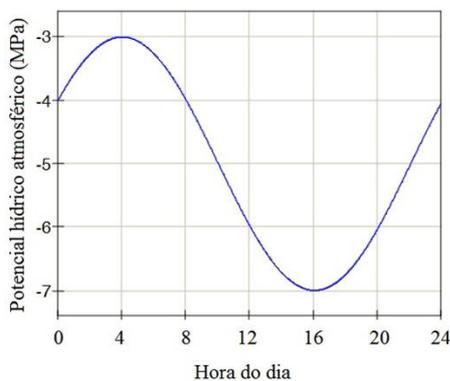


Figura 32 – Simulação do circuito potencial hídrico atmosférico. Pico máximo de -3MPa às 04:00 h e mínimo de -7MPa às 16:00 h.

4.2 CONSTRUÇÃO, SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO ESTÔMATO

4.2.1 Célula Guarda

Conforme Shope et al. (2003) e Roelfsema e Hedric (2005), tendo o estômato aproximadamente 4 pl de volume na máxima turgescência e acumulando 2 pmol de soluto potássio (K^+) e 2 pmol do soluto cloro (Cl^-) com o soluto malato⁻², utilizando a equação 3 obtemos um potencial osmótico de aproximadamente -1,245 MPa para o potássio e -1,245 MPa para o cloro e malato⁻².

Considerando as mesmas condições da estrutura estomática do parágrafo anterior, conforme Talbott e Zeiger (1998), aproximadamente 1,3 pmol de sacarose é acumulada no estômato, utilizando a equação 3 obtêm-se um potencial osmótico de aproximadamente -0,81 Mpa.

Assim, tem-se um total de aproximadamente -3,3 MPa. Considerando que o potencial osmótico do estômato fechado é de -1 MPa, temos então o valor total de aproximadamente -4,3 MPa. Próximo ao valor de -4,5 MPa encontrado experimentalmente por Franks e Farquhar (1998).

O circuito referente à bomba de potássio recebe a radiação (corrente elétrica) nas faixas de 447 nm e 475 nm convertendo esse fluxo de radiação em potencial osmótico (tensão elétrica), o que está de acordo com a literatura (ASSMANN et al., 1985; WU et al., 1995; GOH et al., 2002; ROELFSEMA e HEDRIC, 2005; SHIMAZAKI et al., 2007; KIM e LEE, 2007; TAKEMIYA e SHIMAZAKI, 2010), conforme Figura 33.

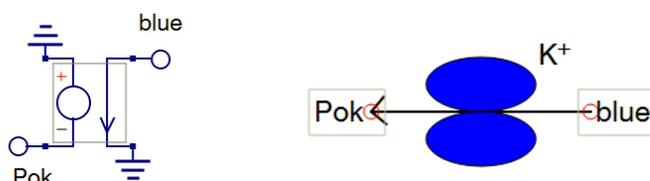


Figura 33 – Fonte de tensão controlada por corrente que representa o potencial osmótico do soluto potássio gerado pelos comprimentos de onda 447 nm e 475 nm e seu respectivo símbolo.

O circuito referente ao cloroplasto recebe a radiação na faixa de 670 nm convertendo esse fluxo de radiação em potencial osmótico, o que está de acordo com a literatura (VAVASSEUR e RAGHAVENDRA, 2004; ROELFSEMA e HEDRIC, 2005; SHIMAZAKI et al., 2007; KAMI et al., 2010; DIETERLE et al., 2001) conforme Figura 34.

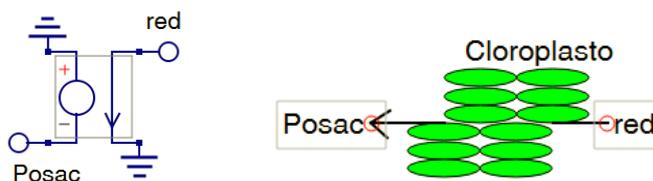


Figura 34–Fonte de tensão controlada por corrente que representa o potencial osmótico do soluto sacarose gerado pelo comprimento de onda 670 nm, e seu respectivo símbolo.

Circuito referente à produção de cloro (Cl^-) e malato⁻² para contrabalancear a entrada de íons positivos na célula guarda que está de acordo com (ROELFSEMA e HEDRIC, 2005; WANG et al., 2013; BENITO et al., 2014), conforme Figura 35.

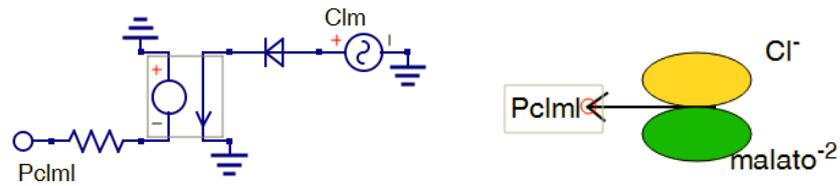


Figura 35 – Fonte de tensão que representa o potencial osmótico gerado pelos solutos cloro e malato e seu respectivo símbolo.

O fator de conversão da corrente para tensão (parâmetro interno da fonte de tensão controlada por corrente), na bomba de potássio para que em sua saída tenha $-1,245$ MPa tem o valor de $1,041 \Omega$. Já, para a saída do cloroplasto ter $-0,81$ MPa, tem o valor de $1,03 \Omega$.

Foi feita a simulação, conforme Figura 36, obtendo-se as curvas com valores mínimos de $-1,245$ MPa para o potencial osmótico gerado pelo potássio e do cloro (Cl^-) e malato⁻² e valor mínimo de $-0,81$ para o potencial osmótico gerado pela sacarose.

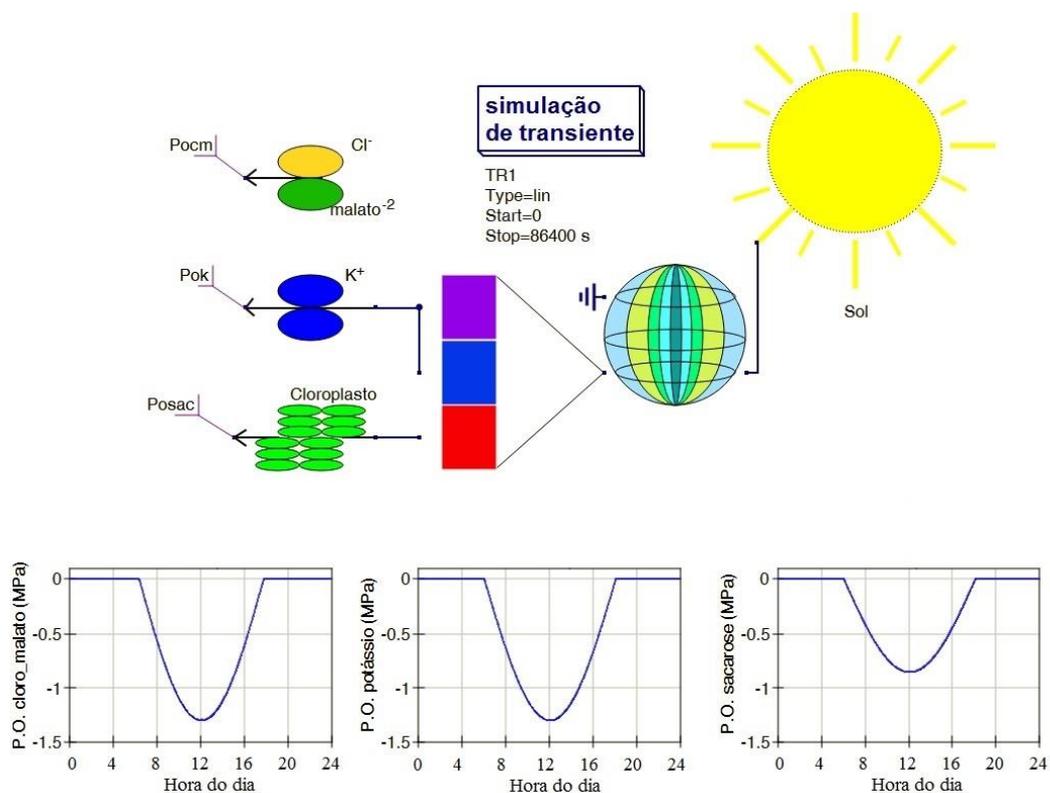


Figura 36 – Simulação da variação horária dos potenciais osmóticos gerados pelos solutos potássio e sacarose em função dos comprimentos de onda 447 nm, 475 nm e 670 nm.

O percentual dos solutos (K^+ , Cl^- , malato⁻²) corresponde a aproximadamente 76% do potencial osmótico total gerado no estômato, enquanto que a sacarose, 24%. De acordo com a simulação de Sun et al. (2014), o estômato ao receber um feixe duplo de luz (azul e vermelho) tem o percentual dos solutos (K^+ , Cl^- , malato⁻², NO_3^-) que correspondem a 82,5% da abertura estomática. A sacarose, no entanto, é responsável por 17,5% da abertura estomática. Nota-se que houve uma diferença de aproximadamente 6,5% entre a simulação de Sun et al. (2014) e este estudo, que pode estar relacionada à diferença dos valores dos parâmetros biofísicos do estômato e os teores dos solutos.

4.2.2 Ostíolo

Existem duas possíveis maneiras de fazer com que o transistor, MOSFET intensificação canal p, funcione adequadamente. A polarização por realimentação do dreno e a polarização por divisão de tensão. Utilizou-se a polarização por realimentação do dreno por deixar apenas um resistor entre a porta controle e o dreno do transistor.

O dispositivo ostíolo, conforme Figura 37, possui a porta SS aterrada e, portanto, foi adotado o valor de $R=100\text{ M}\Omega$ para o resistor de polarização. A fonte de tensão contínua Po_{min} é análoga ao potencial osmótico mínimo do estômato, com valor de -1 MPa. Um circuito soma foi utilizado para somar as tensões referentes aos potenciais osmóticos do circuito potássio, cloroplasto e cloro e malato⁻².

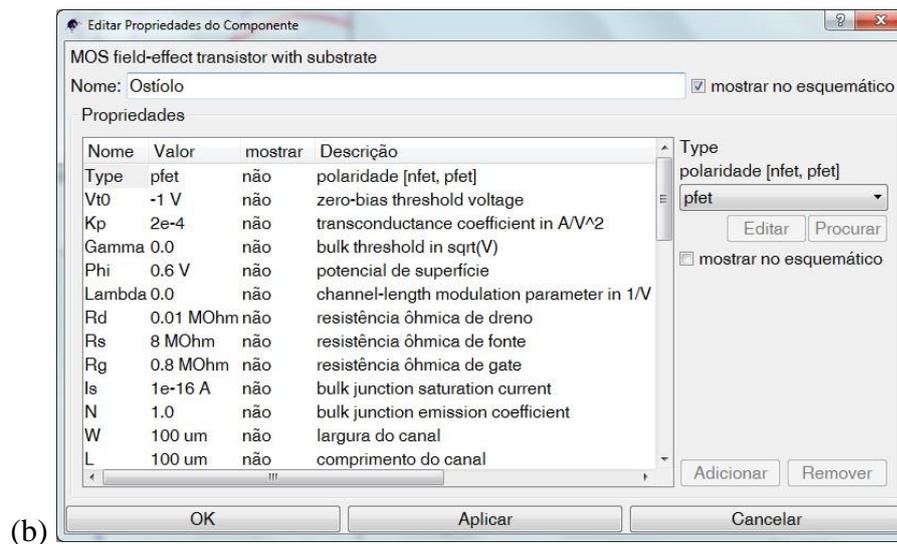
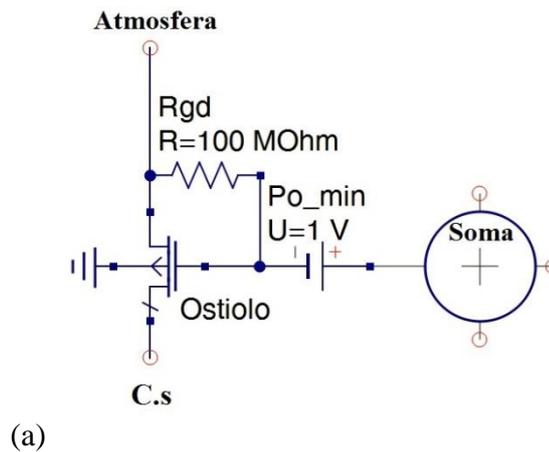


Figura 37 – (a) Circuito ostiolo. A porta cavidade subestomática e atmosfera estão disponíveis para conectar. Na porta controle foi inserido um circuito soma para poder conectar adequadamente, respeitando a Lei de Ohm, as radiações referentes aos comprimentos de onda 447 nm, 475 nm e 670 nm. (b) Relatório de Parâmetros com nomes, descrições e valores para as variáveis associadas ao transistor MOSFET tipo intensificação canal p.

Para um estudo analítico do ostiolo, o circuito da Figura 38 foi montado. Neste estudo, considerou-se que na cavidade subestomática há saturação de vapor d'água, de tal forma que o potencial hídrico seja sempre nulo, ou seja, a umidade relativa seja 100%. Isso implica na não redução dos valores de potenciais entre a fonte e o controle do transistor.

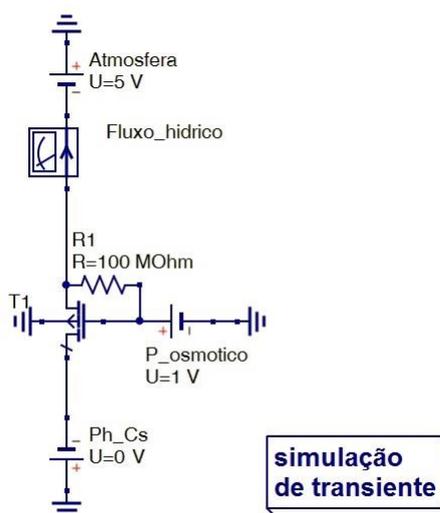


Figura 38 – Simulação do fluxo hídrico em função do potencial osmótico e do potencial hídrico atmosférico.

Estados estacionários para o potencial osmótico variando de -1 a -4,3 MPa foram simulados a partir de estados transientes do potencial hídrico da atmosfera, resultando na tabela 3.

Tabela 3 - Estados estacionários para o potencial osmótico e hídrico atmosférico para obtenção do fluxo hídrico.

P_Atmosfera (MPa)	P_osmótico (MPa)	Fluxo_hidrico ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
-3,0	-1,0	$2,00 \cdot 10^{-8}$
-3,0	-2,0	$1,31 \cdot 10^{-7}$
-3,0	-3,0	$2,44 \cdot 10^{-7}$
-3,0	-4,0	$3,57 \cdot 10^{-7}$
-3,0	-4,3	$3,60 \cdot 10^{-7}$
-4,0	-1,0	$3,00 \cdot 10^{-8}$
-4,0	-2,0	$1,41 \cdot 10^{-7}$
-4,0	-3,0	$2,54 \cdot 10^{-7}$
-4,0	-4,0	$3,67 \cdot 10^{-7}$
-4,0	-4,3	$4,12 \cdot 10^{-7}$
-5,0	-1,0	$4,00 \cdot 10^{-8}$
-5,0	-2,0	$1,51 \cdot 10^{-7}$
-5,0	-3,0	$2,64 \cdot 10^{-7}$
-5,0	-4,0	$3,77 \cdot 10^{-7}$
-5,0	-4,3	$4,22 \cdot 10^{-7}$
-6,0	-1,0	$5,00 \cdot 10^{-8}$
-6,0	-2,0	$1,61 \cdot 10^{-7}$

Continua na próxima página

Tabela 3 - continuação

-6,0	-3,0	$2,74 \cdot 10^{-7}$
-6,0	-4,0	$3,87 \cdot 10^{-7}$
-6,0	-4,3	$4,32 \cdot 10^{-7}$
-7,0	-1,0	$6,00 \cdot 10^{-8}$
-7,0	-2,0	$1,71 \cdot 10^{-7}$
-7,0	-3,0	$2,84 \cdot 10^{-7}$
-7,0	-4,0	$3,97 \cdot 10^{-7}$
-7,0	-4,3	$4,42 \cdot 10^{-7}$

Foi plotado o gráfico com os dados da Tabela 3 resultando na Figura 39.

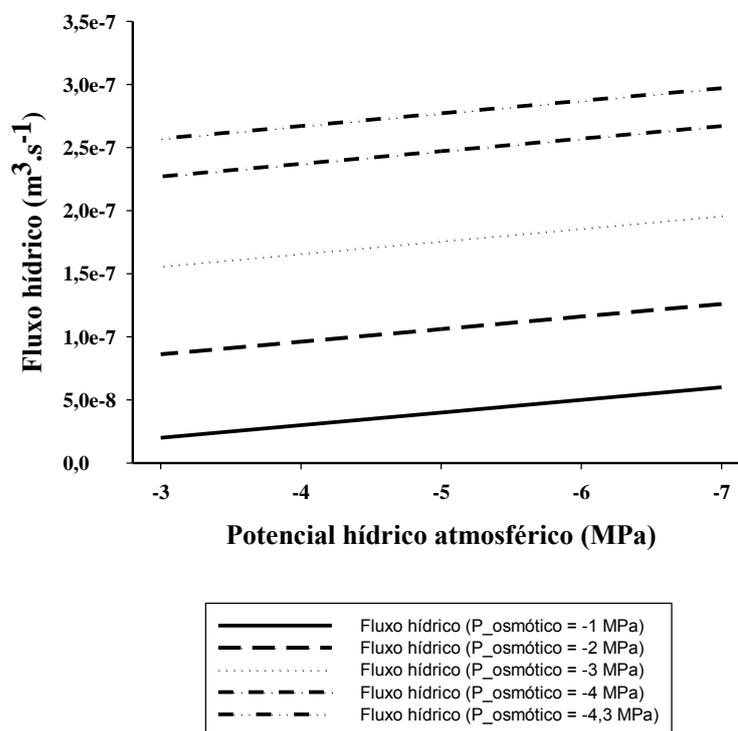


Figura 39 – Fluxo hídrico em função do potencial hídrico atmosférico, considerando diferentes valores de potencial osmótico.

Verifica-se que a taxa de transpiração é proporcional à alteração da umidade relativa do ar, desde que a mudança não seja abrupta no tempo, o que está de acordo com a literatura (Tibbitts, 1979; Saliendra et al., 1995).

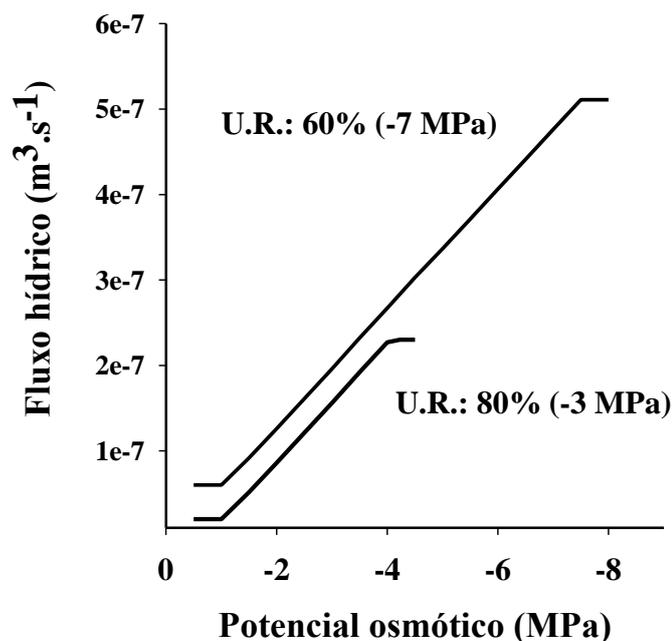


Figura 40 – Simulação do fluxo hídrico em função do potencial osmótico considerando o potencial hídrico atmosférico a -3 MPa e a -7 MPa .

A Figura 40 apresenta, para valores maiores que -1 MPa de potencial osmótico, independente da umidade relativa do ar, fluxo hídrico mínimo, devido ser mínimo o potencial osmótico quando o estômato está fechado, em acordo com os resultados de Roelsema e Hedric, (2005). Isso ocorreu porque o valor da tensão de limiar do transistor foi imposto em -1 MPa . Para o potencial hídrico atmosférico de -3 MPa , o fluxo hídrico máximo foi de aproximadamente $2,27 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ quando o potencial osmótico foi -4 MPa . A partir deste valor, o fluxo torna-se constante. Já, para o potencial hídrico atmosférico de -7 MPa , o fluxo hídrico máximo foi aproximadamente $5,11 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, quando o potencial osmótico foi $-7,5 \text{ MPa}$, tornando-se constante a partir deste valor. Isso nos mostra que o modelo funciona mais adequadamente entre -3 MPa e $-3,5 \text{ MPa}$ de potencial hídrico atmosférico, pois essa faixa está de acordo com o potencial osmótico de $-4,3 \text{ MPa}$, estimado neste estudo, e de $-4,5 \text{ MPa}$, encontrado por Franks e Farquhar (1998) experimentalmente. A curva obtida na Figura 40 está de acordo com Lee (2002) para um transistor MOSFET real.

A abertura estomática, considerando o potencial osmótico de 0,92 MPa gerado pela célula epidérmica, apresenta curva sigmoïdal em função do potencial osmótico (FRANKS e FARQUHAR 1998; FRANKS et al., 2001; FRANKS, 2003; FRANKS, 2004). De acordo com Fitter e Ray (2002), Nobel (2009) e Gaio (2011) o fluxo hídrico é diretamente proporcional à abertura estomática. Portanto, a fim de avaliar o desempenho deste modelo, foi realizada a correlação de Spearman entre o fluxo hídrico obtido neste trabalho e a abertura estomática obtida experimentalmente por Franks e Farquhar (1998), obtendo o valor de 0,873.

4.2.3 Simulação e Validação do Estômato

Foi feita a simulação com todos os módulos desenvolvidos nesta pesquisa conforme Figura 41.

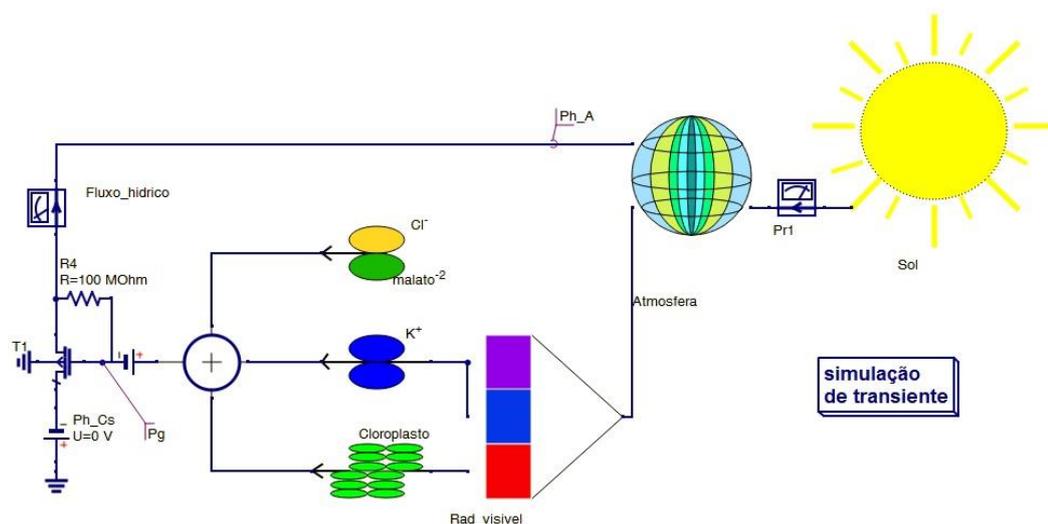


Figura 41 – Simulação completa da dinâmica estomática em função da radiação solar e do potencial hídrico atmosférico.

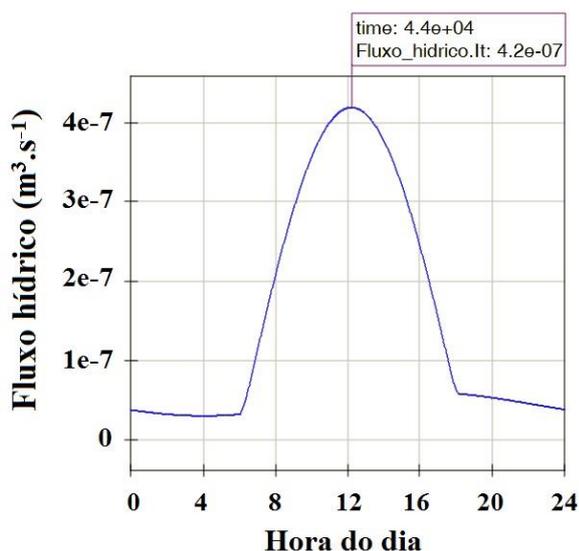


Figura 42 – Fluxo hídrico em função da radiação solar e do potencial hídrico atmosférico.

O gráfico do fluxo hídrico ao longo do dia, na Figura 42, mostra baixa atividade de transpiração, entre 00:00 h e 05:59 h, com valor mínimo de $3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ às 04:15 h. A partir das 06:00 h, quando se inicia atividade solar, a transpiração aumenta rapidamente, tendo seu pico de $4,38 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ às 12:00 h, que é semelhante ao encontrado por Gaio (2011) $4,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A partir das 12:00 h, a transpiração começa a diminuir até às 17:59 h. Das 18:00 às 23:59 h, há baixa atividade transpiratória com o mínimo de $3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ às 23:59 h. O fluxo hídrico máximo está na mesma ordem de grandeza encontrado por Gaio (2011). A transpiração diária foi $0,0143 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, valor que está na mesma ordem de grandeza, $0,064 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, encontrado por Nobel (2009).

5 CONCLUSÃO

O potencial osmótico mínimo em função da radiação solar foi estimado com base na literatura. Da mesma forma, foi obtida uma relação de correspondência fóton-elétron a qual foi utilizada para obter valores para o potencial osmótico na célula guarda quando da incidência da radiação solar.

Os módulos Radiação Solar, Potencial Hídrico Atmosférico, Radiação Global e Visível foram modelados, construídos e simulados, obtendo curvas de acordo com Al-Riahi et al. (2003), Gueymard et al. (2002) e Muneer (2007).

A analogia elétrico-hídrica se mostrou adequada para representar a célula guarda, pois com a analogia radiação solar-corrente elétrica foi possível utilizar a fonte de tensão controlada por corrente para representar a conversão da radiação solar em potencial osmótico, que é representado pela tensão elétrica, em conformidade com Roelfsema e Hedric, 2005 e Shimazaki et al., 2007. Os valores dos potenciais osmóticos gerados no circuito Célula Guarda respeitaram a Lei de Conservação da Energia e a Segunda Lei da Termodinâmica.

O transistor MOSFET tipo intensificação canal p apresentou características adequadas, para a analogia, do ponto de vista fisiológico no âmbito da modelagem estomática em estudo, pois o fluxo elétrico, análogo ao fluxo hídrico da transpiração é controlado por um potencial elétrico negativo (gate) que é análogo ao potencial osmótico, conforme Roelfsema e Hedric, 2005; Shimazaki et al., 2007. O potencial elétrico do dreno, por onde flui a corrente elétrica (sentido convencional), também é negativo, sendo análogo ao potencial hídrico da atmosfera, conforme Tibbitts, 1979; Saliendra et al., 1995 e Nobel, 2009. Assim, foi possível modelar a dinâmica estomática com esse transistor. As simulações foram validadas mostrando consistência com a literatura com respeito aos valores de fluxo hídrico instantâneo e transpiração total diária, conforme Franks e Farquhar, 1998; Nobel, 2009 e Gaio, 2011.

O modelo desenvolvido neste estudo possui várias condições de contorno, tais como, pequeno intervalo de potencial hídrico atmosférico aplicado ao

dreno do MOSFET; divisão por 10 da tensão negativa aplicada ao dreno; tensão nula aplicada à fonte (cavidade subestomática) do MOSFET. Foram condições de contorno adotadas neste estágio da modelagem, que com novos estudos podem ser diminuídas e até mesmo sanadas.

6 RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

- Modelar bancos de capacitores para buscar ajustar a curva do potencial hídrico atmosférico à curva do potencial hídrico real.
- Modelar a concentração de CO₂ e ABA para auxiliar no controle estomático.
- Buscar construir a plataforma QUCSH (Simulador de Circuitos Hídricos Totalmente Universal).
- Buscar desenvolver um transistor (*in silico*) mais adequado às dimensões do ostíolo e com fluxo de corrente menor, próximo ao valor de transpiração estomático real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-RIahi, M.; AL-JUMAILY, K.; KAMIES, I. Measurements of net radiation and its components in semi-arid climate of Baghdad. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 4, p. 509-525, 2003.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, vol. 300, n. 9, 1998.

ASSMANN, S.M.; SIMONCINI, L.; SCHROEDER, J.I. Blue light activates electrogenic ion pumping in guard cell protoplasts of *Vicia faba*. **Nature**, vol. 318, pp 285 – 287, 1985.

BARBER, J. Photosynthetic energy conversion: natural and artificial. **Chemical Society Reviews**, vol. 38, n. 1, pp. 185-196, 2009.

BENITO, B.; HARO, R.; AMTMANN, A.; CUIN, T. A.; DREYER, I. The twins K^+ and Na^+ in plants. **Journal of plant physiology**, v. 171, n. 9, p. 723-731, 2014.

BERG, D. Creating an Electronic Analog of a Stomatal Network. 2014. Disponível em: http://digitalcommons.usu.edu/phys_capstoneproject/5/. Acessado em: 21/02/2016.

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de circuitos**, Pearson Prentice Hall, 8ª edição, 2004.

BUCKLEY, T.N. The control of stomata by water balance. Tansley Review. **New Phytologist**, vol.168, pp 275–292, 2005.

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

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. An Electrical Analogue of Evaporation from, and Flow of Water in Plants. *Planta*, 106: 221-226. 1972.

CURADO, L.F.A.; RODRIGUES, T.R.; BIUDES, M.S.; DE PAULO, S.R.; DE PAULO, I.J.C.; NOGUEIRA, J.S. **Estimativa Sazonal da Emissividade Atmosférica Através da Equação de Brutsaert no Norte do Pantanal Mato-Grossense.** *Ciência e Natura*, Vol.33, No.2, 2011, pp. 167-180.

DE ANGELI, A.; THOMINE, S.; FRACHISSE, J.M.; EPHRITIKHINE, G.; GAMBALE, F.; BARBIER-BRYGOO, H. Anion channels and transporters in plant cell membranes. **FEBS letters**, v. 581, n. 12, p. 2367-2374, 2007.

DIETERLE, M.; ZHOU, Y.C.; SCHÄFER, E.; FUNK, M.; KRETSCH, T. EID1, an F-box protein involved in phytochrome A-specific light signaling. **Genes & Development**, v. 15, n. 8, p. 939-944, 2001.

DOS SANTOS, C.M.; DE SOUZA, J.L.; TERAMOTO, É.T.; TIBA, C.; DE MELO, R.O. MODELAGEM DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÉDIA HORÁRIA MENSAL (Hgh) PARA QUATRO LOCALIDADES DE ALAGOAS/BRASIL. **Nativa**, v. 2, n. 2, p. 79-88, 2014.

DREYER, I; UOZUMI, N. Potassium channels in plant cells. **FEBS Journal**, v. 278, n. 22, p. 4293-4303, 2011.

FITTER, A.; HAY, R. **Environmental Physiology of Plants**. 3.ed. Cornwall – Great Britain: Academic Press. 2002.

FRANKS, P.J. Stomatal control and hydraulic conductance, with special reference to tall trees. **TREE PHYSIOLOGY-VICTORIA-**, v. 24, n. 8, p. 865-878, 2004.

FRANKS, P.J. Use of the pressure probe in studies of stomatal function. **Journal of Experimental Botany**, vol. 54, pp 1495 – 1504, 2003.

FRANKS, P.J.; BUCKLEY, T.N.; SHOPE, J.C.; MOTT, K.A. Guard Cell Volume and Pressure Measured Concurrently by Confocal Microscopy and the Cell Pressure Probe. **Plant Physiology**. vol. 125, pp 1577 – 1584, 2001.

FRANKS, P.J.; COWAN, I.R.; TYERMAN, S.D.; CLEARY, A.L.; LLOYD, J.; FARQUHAR, G.D. Guard cell pressure/aperture characteristics measured with the pressure probe. **Plant, Cell and Environment**, vol. 18, pp 795–800, 1995.

FRANKS, P. J.; FARQUHAR, G.D. A study of stomatal mechanics using the cell pressure probe. **Plant, Cell and Environment**, vol. 21, pp 94 – 100, 1998.

FRECHILLA, S.; TALBOTT, L.D.; ZEIGER, E. The blue light-specific response of *Vicia faba* stomata acclimates to growth environment. **Plant and Cell physiology**, v. 45, n. 11, p. 1709-1714, 2004.

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.

GAJDANOWICZ, P.; MICHARD, E.; SANDMANN, M.; ROCHA, M.; CORRÊA, L.G.G.; RAMÍREZ-AGUILAR, S.J.; GOMEZ-PORRAS, J.L.; GONZÁLEZ, W.; THIBAUD, J.B.; VAN DONGEN, J. T.; DREYER, I. Potassium (K⁺) gradients serve as a mobile energy source in plant vascular tissues. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 2, p. 864-869, 2011.

GOH, C.H.; DIETRICH, P.; STEINMEYER, R.; SCHREIBER, U.; NAM, H.G.; HEDRICH, R. Parallel recordings of photosynthetic electron transport and K⁺-channel activity in single guard cells. **Plant Journal**, vol. 32, pp 623 – 630, 2002.

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

HILLS, A.; CHEN, Z.H.; AMTMANN, A.; BLATT, M. R.; LEW, V. L. OnGuard, a computational platform for quantitative kinetic modeling of guard cell physiology. **Plant Physiology**, v. 159, n. 3, p. 1026-1042, 2012.

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

IINO, M.; OGAWA, T.; ZEIGER, E. Kinetic properties of the blue-light response of stomata. **Botany**, vol. 82, pp 8019-8023, 1985.

JAYARAMAN, A.; LUBIN, D.; RAMACHANDRAN, S.; RAMANATHAN, V.; WOODBRIDGE, E.; COLLINS, W.D.; ZALPURI, K.S. Direct observations of aerosol radiative forcing over the tropical Indian Ocean during the January-February 1996 pre-INDOEX cruise. **Journal of Geophysical Research**, V. 103, 13,827-13,836, 1998.

JOSHI-SAHA, A.; VALON, C.; LEUNG, J. A brand new START: abscisic acid perception and transduction in the guard cell. **Science signaling**, v. 4, n. 201, p. re4-re4, 2011.

KAMI, C.; LORRAIN, S.; HORNITSCHKE, P.; FANKHAUSER, C. Chapter two-light-regulated plant growth and development. **Current topics in developmental biology**, v. 91, p. 29-66, 2010.

KANG, C.Y.; LIAN, H.L.; WANG, F.F.; HUANG, J.R.; YANG, H.Q. Cryptochromes, phytochromes, and COP1 regulate light-controlled stomatal development in Arabidopsis. **The Plant Cell**, v. 21, n. 9, p. 2624-2641, 2009.

KIM, D.J.; LEE, J.S. Current theories for mechanism of stomatal opening: Influence of blue light; mesophyll cells, and sucrose. **Journal of Plant Biology**, v. 50, n. 5, p. 523-526, 2007.

KOLLIST, H.; NUHKAT, M.; ROELFSEMA, M.R.G. Closing gaps: linking elements that control stomatal movement. **New Phytologist**, v. 203, n. 1, p. 44-62, 2014.

KWAK, J.M.; MASER, P.; SCHROEDER, J. The clickable guard cell, version II: interactive model of guard cell signal transduction mechanisms and pathways. **The Arabidopsis book/American Society of Plant Biologists**, v. 6, 2008.

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

LAWSON, T. Guard cell photosynthesis and stomatal function. **New Phytologist**, vol. 181. pp. 13 – 34, 2009.

LEE, T.H. A Review of MOS Device Physics. 2002. Disponível em: http://people.seas.harvard.edu/~jones/es154/lectures/lecture_4/pdfs/MOS_review.pdf. Acessado em: 21/02/2016.

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 14/06/2014.

MARQUES FILHO, Arí de O. Solar Radiation Regime and Characteristics of the Vegetation-Inversion Models. **Acta Amazonica**, v. 27, n. 2, p. 119-133, 1997.

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

NIEVES-CORDONES, M.; ALEMÁN, F.; MARTÍNEZ, V.; RUBIO, F. K⁺ uptake in plant roots. The systems involved, their regulation and parallels in other organisms. **Journal of plant physiology**, v. 171, n. 9, p. 688-695, 2014.

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

OLSEN, R.L.; PRATT, R.B.; GUMP, P.; KEMPER, A.; TALLMAN, G. Red light activates a chloroplast-dependent ion uptake mechanism for stomatal opening under reduced CO₂ concentrations in *Vicia faba* spp. **New Phytologist**, vol. 153. pp 497 – 508, 2002.

PEREIRA, V.M.R. **Análogo Elétrico da Pressão de Turgescência em Células Guarda de *Vicia Faba*: Modelo Científico e Conceitual**. 2013. 66 p. (Mestrado em Física Ambiental). Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, Universidade de Mato Grosso.

PEREIRA, V.M.R.; Gaio, D.C.; de Paulo, I.J.C.; Curado, L.F.A.; Nogueira, J.S. Estimativa do volume e da pressão de turgescência do estômato de *vicia faba* ao longo do dia. **Ciência e Natura**, v.37 n.2, 2015, mai.- ago. p. 194 – 199.

POFFENROTH, M.; GREEN, D.B.; TALLMAN, G. Sugar concentrations in guard cells of *Vicia faba* illuminated with red or blue light. **Plant Physiology**, vol. 98, p. 1460-1471, 1992

RAVEN, P.H., EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. **Biologia Vegetal**. 6ª edição. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S. A, 2001. 968p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera**. Conceitos, processos e aplicações. 1. Barueri: Editora Manole Ltda, 2004. 476p.

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

SALIENDRA, N.Z.; SPERRY, J.S.; COMSTOCK, J.P. Influence of leaf water status on stomatal response to humidity, hydraulic conductance, and soil drought in *Betula occidentalis*. **Planta**, v. 196, n. 2, p. 357-366, 1995.

SEDRA, A.S.; SMITH, K.C. **Microeletrônica**. Pearson Prentice Hall, 2007.

SHARKEY, T.D.; RASCHKE, K. Effect of light quality on stomatal opening in leaves of *Xanthium strumarium* L. **Plant Physiology**, v. 68, n. 5, p. 1170-1174, 1981.

SHIMAZAKI, K.I.; DOI, M.; ASSMANN, S.M.; KINOSHITA, T. Light Regulation of Stomatal Movement. **Plant Biology**, vol. 58, pp. 219 – 247, 2007.

SHOPE, J.C.; DEWALD, D.B.; MOTT, K.A. Changes in Surface Area of Intact Guard Cells Are Correlated with Membrane Internalization. **Plant Physiology**, vol. 133, pp 1314 – 1321, 2003.

SUN, Z.; JIN, X.; ALBERT, R.; ASSMANN, S.M. Multi-level Modeling of Light-Induced Stomatal Opening Offers New Insights into Its Regulation by Drought. **PLoS Computational Biology** vol.10, n.11, p. e1003930, 2014.

TAIZ, L. e ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ª edição, Porto Alegre, Artmed, 2004, 719p.

TAKEMIYA, A.; SHIMAZAKI, K.I. Phosphatidic acid inhibits blue light-induced stomatal opening via inhibition of protein phosphatase 1. **Plant physiology**, v. 153, n. 4, p. 1555-1562, 2010.

TALBOTT, L.D. e ZEIGER, E. Central Roles for Potassium and Sucrose in Guard-Cell Osmoregulation. **Plant Physiology**, vol. 111, pp. 1051 – 1057, 1996.

TALBOTT, L.D. e ZEIGER, E. The role of sucrose in guard cell osmoregulation. **Journal of Experimental Botany**, vol. 49, pp. 329 – 337, 1998.

TIBBITTS, T.W. Humidity and plants. *BioScience*, v. 29, n. 6, p. 358-363, 1979.

TOMINAGA, M; KINOSHITA, T; SHIMAZAKI, K. Guard-cell chloroplasts provide ATP required for H⁺ pumping in the plasma membrane and stomatal opening. **Plant and Cell Physiology**, v. 42, n. 8, p. 795-802, 2001.

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

VAVASSEUR, A.; RAGHAVENDRA, A.S. Guard cell metabolism and CO₂ sensing. **New Phytologist**, vol. 165, pp. 665 – 682, 2004.

VIEIRA, E.L.; de SOUZA, G.S.; dos SANTOS, A.R.; dos SANTOS SILVA, J. **Manual de Fisiologia Vegetal**. 2010. São Luís: EDUFMA, 2010. 230p.

WANG, Y.; CHEN, Z.H.; ZHANG, B.; HILLS, A.; BLATT, M.R. PYR/PYL/RCAR abscisic acid receptors regulate K⁺ and Cl⁻ channels through reactive oxygen species-mediated activation of Ca²⁺ channels at the plasma membrane of intact *Arabidopsis* guard cells. **Plant physiology**, v. 163, n. 2, p. 566-577, 2013.

WEYERS, J.D.B.; MEIDNER, H. "Methods in Stomatal Research". Essex: Longman Scientific and Technical. 1990.

WU, W.H., ASSMANN, S.M. Is ATP required for K channel activation in *Vicia* guard cells? **Plant Physiol**, vol. 107, pp. 101 – 109, 1995.