

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

**ANÁLOGO ELÉTRICO DA PRESSÃO DE
TURGESCÊNCIA EM CÉLULAS GUARDA DE *Vicia*
faba: MODELO CIENTÍFICO E CONCEITUAL**

VINÍCIUS MARCIO RODRIGUES PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio

Coorientadora: Profa. Dra. Iramaia Jorge Cabral De Paulo

Cuiabá, MT, Fevereiro de 2013.

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

**ANÁLOGO ELÉTRICO DA PRESSÃO DE
TURGESCÊNCIA EM CÉLULAS GUARDA DE *Vicia
faba*: MODELO CIENTÍFICO E CONCEITUAL**

VINÍCIUS MARCIO RODRIGUES PEREIRA

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

Orientador: Prof. Dr. Denilton Carlos Gaio

Coorientadora: Profa. Dra. Iramaia Jorge Cabral De Paulo

Cuiabá, MT, Fevereiro de 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

P436a Pereira, Vinícius Marcio Rodrigues.
ANÁLOGO ELÉTRICO DA PRESSÃO DE TURGESCÊNCIA EM
CÉLULAS GUARDA DE Vicia faba : MODELO CIENTÍFICO E
CONCEITUAL / Vinícius Marcio Rodrigues Pereira. -- 2013
xvii, 49 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Denilton Carlos Gaio.
Co-orientadora: Iramaia Jorge Cabral de Paulo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto
de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2013.
Inclui bibliografia.

1. Estômato. 2. solutos osmoticamente ativos. 3. modelo. 4. dispositivos
hídricos. 5. mapa conceitual. 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 DA PRESSÃO DE TURGESCÊNCIA
EM CÉLULAS GUARDA DE *Vicia faba*: MODELO
CIENTÍFICO E CONCEITUAL**

AUTOR: VINÍCIUS MÁRCIO RODRIGUES PEREIRA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 28 de fevereiro de 2013, pela comissão julgadora:


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


Profa. Dra. Iramaiá Jorge Cabral de Paulo
Coorientadora
Instituto de Física - UFMT


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


Prof. Dr. Carlo Ralph De Musis
Examinador Interno
Universidade de Cuiabá - UNIC


Profa. Dra. Maricéia Tatiana Vilani
Examinadora Externa
Centro Universitário de Várzea Grande/UNIVAG

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 à 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 e à minha prima Nilzete que faleceu no dia da minha defesa.

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 (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 cuidando de nossos filhos e da casa e mesmo assim é meu esteio e apoio seguro.

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

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

Aos meus familiares que sempre acreditaram no 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;

A Prof. Dra. Iramaia que sempre esteve a disposição para me auxiliar e me dar ânimo para realizar o trabalho com excelência.

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

Ao amigo Sérgio Gripp que sempre me auxiliou quando lhe pedi ajuda, mesmo quando muito ocupado;

Ao Leone (poconeano) que mostrou-se um grande amigo e incentivador;

Aos professores Dr. Carlo Ralph de Muis, Dr. Francisco Lobo, Dr. Geraldo Diniz, Dr. Campelo, Dra. Carmen, Dra. Luciana Sanches, Msc. Paulo Arruda do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, que, com dedicação, transmitiram seus conhecimentos.

À todos os colegas de turma: Aryadne, Cristiano, Maísa, Patrick, Paula, Pedro, Raphael, Renan, Saiani, Thomas, Vanessa e Victor Hugo

Ao colega Geison que muito me ajudou no início do meu trabalho;

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

À SEDUC/MT que me proporcionou afastamento remunerado para que eu pudesse com dedicação executar este trabalho.

À CNPQ pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Dr. Pawel e Glauber por flexibilizarem meu horário no INPE.

“Se não podes entender, crê para que entendas. A fé precede, o intelecto segue”.

Santo Agostinho.

RESUMO

PEREIRA, V.M.R.; **Análogo Elétrico da Pressão de Turgescência em Células Guarda de *Vicia Faba*: Modelo Científico e Conceitual.**

Cuiabá. 2013. 66 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um análogo elétrico para simular a pressão de turgescência do par de células guarda estomática da *Vicia faba* e o circuito estômato. Para isso foram utilizados parâmetros biofísicos do estômato da *Vicia faba*. Foi utilizada a equação de Van't Hoff para estimar a pressão osmótica gerada pelos solutos osmoticamente ativos (potássio, sacarose e cloro). Os valores resultantes foram utilizados para alimentar os dispositivos hídricos desenvolvidos no software *Quite Universal Circuits Simulation (QUCS)* e agregados para formarem o dispositivo pressão de turgescência do par de células guarda (Pg). Este último controlando o circuito estômato. Os resultados foram comparados com a literatura e foi elaborado um mapa conceitual utilizando o modelo com possibilidade de aplicação ao ensino de Física.

Palavras-chave: Estômato, solutos osmoticamente ativos, modelo, dispositivos hídricos, mapa conceitual.

ABSTRACT

PEREIRA, V.M.R.; **Electrical Analogue of Turgor Pressure in Vicia faba Guard Cells: Scientific and Conceptual Model**. Cuiabá. 2013. 66f. Dissertation (Master's in Environmental Physics), Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

This study aimed to develop an electrical analogue to simulate the turgor pressure of the pair of guard cells of *Vicia faba* stomatal and circuit stomata. To do this we used biophysical parameters of the stomata of *Vicia faba*. The model used the van't Hoff equation to estimate the osmotic pressure generated by the osmotically active solutes (potassium, sucrose and chlorine). The resulting values were used to feed the hydric devices developed in the software Quite Universal Circuit Simulation (QUCS) and aggregated to form the device turgor pressure of the pair of guard cells (P_g). This latter circuit controlling the stoma. Results were compared with literature and a conceptual map was developed utilizing the model with possible application to the teaching of physics.

Keywords: stomata, osmotically active solutes, model, hydric devices, conceptual map.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Vicia faba</i>	5
Figura 2 – Fluxo de energia biológica.....	6
Figura 3 – Osmose.....	9
Figura 4 – Estômato de <i>Vicia faba</i>	12
Figura 5 – Analogia entre células guarda e tubos de borracha.....	12
Figura 6 – Influência da Pressão de turgescência sobre a abertura estomática.....	13
Figura 7 – Abertura estomática e teor de solutos.....	14
Figura 8 – Influência da luz azul na abertura estomática.....	15
Figura 9 – Influência da luz vermelha na abertura estomática.....	16
Figura 10 – Circuito do estômato.....	18
Figura 11 – Fluxograma com as etapas de construção do análogo.....	21
Figura 12 – Relação linear entre abertura estomática e volume estomático.....	25
Figura 13 – Fonte de tensão baseada em arquivo.....	27
Figura 14 – Estimativa da variação do volume da célula guarda.....	28
Figura 15 – Pressão osmótica do teor de Potássio.....	29
Figura 16 – Pressão osmótica do teor de Sacarose.....	30
Figura 17 – Pressão osmótica do teor de Cloro.....	31
Figura 18 – Estimativa da pressão osmótica total do par de células guarda.....	32
Figura 19 – Circuito da pressão osmótica do potássio (K).....	33
Figura 20 – Símbolo do dispositivo hídrico potássio.....	33
Figura 21 – Simulação do dispositivo hídrico potássio.....	33
Figura 22 – Circuito da pressão osmótica da sacarose (Sac).....	34
Figura 23 – Símbolo do dispositivo hídrico sacarose.....	34
Figura 24 – Simulação do dispositivo hídrico sacarose.....	34
Figura 25 – Circuito da pressão osmótica do cloro (Cl).....	35
Figura 26 – Símbolo do dispositivo hídrico cloro.....	35
Figura 27 – Simulação do dispositivo hídrico cloro.....	35
Figura 28 – Simulação transiente da pressão de turgescência.....	36
Figura 29 – Dispositivo hídrico que representa a pressão de turgescência (Pg).....	37
Figura 30 – Simulação circuito estômato controlado pelo dispositivo hídrico Pg.....	38
Figura 31 – Mapa conceitual.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grandezas Análogas entre o fluxo elétrico e o fluxo hídrico.....	17
Tabela 2 – Parâmetros biofísicos do estômato da <i>Vicia faba</i>	22
Tabela 3 – Dados da abertura estomática e dos teores dos solutos.....	23
Tabela 4 – Comparação entre a pressão de turgescência máxima.....	37
Tabela 5 – Conteúdo básico e análogo elétrico.....	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_m	Volume Médio da Célula Guarda
a_{em}	Média da Abertura Estomática
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
μm	Micrometros (10^{-6} metros)
a_{em}	Abertura estomática média
Cg	Célula guarda
Cl	Circuito da pressão osmótica gerada pelo cloro
Cl^-	Íon Cloro
CO_2	Fórmula química do Dióxido de Carbono
Cs^+	Íon Césio
D	Coefficiente de Difusão ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)
EDD	Dispositivo definido por equação
H^+	Íon Próton
H^+ ATPase	Enzima da bomba iônica que atua no transporte de íons na membrana
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência
J_s	Densidade de Fluxo ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
K	Circuito da pressão osmótica gerada pelo potássio
K^+	Íon Potássio
Li^+	Íon Lítio
M	Massa molar da água ($M=18 \text{ g}$)

Malato ⁻²	Ânion orgânico malato ⁻²
Na ⁺	Íon Sódio
O ₂	Fórmula química do Oxigênio
Pa	Pascal
Pe	Dispositivo hídrico que representa a pressão de turgescência epidérmica
Pg	Dispositivo hídrico que representa a pressão de turgescência da célula guarda
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
R _{máx}	Resistência máxima estomática
R _{mín}	Resistência mínima estomática
Sac	Circuito da pressão osmótica gerada pela sacarose
SPA	Contínuo Solo-Planta-Atmosfera
Spice	Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis
T	Temperatura absoluta do sistema
V	Volume da Célula Guarda
V _e	Volume estimado do par de células guarda
V _M	Volume parcial molal da água pura
Z	Altura de medida
z ₀	Altura de referência
Δψ	Déficit do Potencial Hídrico
Δc _s	Concentração da Substância s (mol m ⁻³)
Δx	Distância (m)
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

1 SUMÁRIO

RESUMO	x
ABSTRACT	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Problemática	1
1.2 Justificativa	3
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 <i>Vicia faba</i>	5
2.2 Fluxo de Energia	6
2.3 Potencial Hídrico	6
2.3.1 Potencial hídrico osmótico ($\psi\pi$)	7
2.3.2 Pressão Hidrostática (ψp).....	8
2.3.3 Potencial Hídrico Gravitacional (ψg).....	8
2.4 Mecanismos de transporte de água e a diferença de potencial hídrico	
9	
2.4.1 Osmose	9
2.4.2 Fluxo de massa	10
2.5 Estômatos.....	11
2.5.1 Estrutura dos Estômatos	11
2.5.2 A Luz na Abertura Estomática	14
2.6 Leis de Kirchhoff Análogas	16
2.6.1 Dispositivo Definido por Equação (EDD)	17
2.7 A importância de Modelos Conceituais na Física	19

3 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1 Determinação da Parametrização Biofísica do Estômato da <i>Vicia faba</i>	22
3.2 Estimativa do Volume estomático e da Pressão Osmótica por meio da relação de Van 't Hoff	24
3.3 Simuladores de Circuito.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
4.1 Estimativa do Volume e da Pressão Osmótica da Célula Guarda ...	28
4.2 Dispositivos Hídricos.....	32
4.2.1 Dispositivo Hídrico Potássio.....	33
4.2.2 Dispositivo Hídrico Sacarose	34
4.2.3 Dispositivo Hídrico Cloro	35
4.3 Simulação da Pressão de Turgescência da célula guarda	36
4.4 Simulação do Estômato controlado por P_g	38
4.5 Mapa Conceitual - Possibilidades.....	39
5 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
APÊNDICE.....	48

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

Ao longo da evolução, os organismos fotossintetizantes foram os responsáveis pela mais importante mudança planetária, a atmosfera, que primitivamente era rica em dióxido de carbono, nitrogênio e vapor d'água, tornou-se adequada ao surgimento da vida aeróbica. A vida cobriu a Terra e, com o tempo, grande diversidade de fauna e flora desenvolveu-se em vastos ecossistemas, dos quais se destacam as florestas.

Apesar da importância para a vida humana, nem sempre as escolhas são boas quando se trata da exploração dos recursos florestais. Tanto que discute-se em que medida as mudanças climáticas globais podem ter sido geradas devido ao desmatamento causado pela ação antrópica.

No Brasil, com sua extensão territorial de aproximadamente 8.5 milhões de km², tem cerca de 63% desse território em florestas. A manutenção dessa área é importante para o equilíbrio ecológico nacional e global.

No território mato-grossense encontramos, além da floresta amazônica, biomas com predominância de regiões não florestais (savanas) como o Pantanal e o Cerrado Mato-Grossense. Em todos esses importantes biomas, predominam plantas vasculares que transportam a água do solo para a atmosfera através de tecido especializado: o xilema.

As plantas vasculares têm suas raízes mergulhadas no “reservatório” de água do solo e as folhas sujeitas à ação da radiação solar e do vento, obrigando-as a transpirar incessantemente. De maneira geral, elas absorvem aproximadamente 500 gramas de água para cada grama de CO₂ fixado pela fotossíntese. Nas folhas, encontram-se os estômatos, estruturas que, quando estão abertas permitem o fluxo de CO₂ para os cloroplastos e água para atmosfera. (REICHARDT & TIMM, 2004). Aproximadamente 99% da água absorvida pelas raízes são liberados para o ar através das folhas como vapor d'água pelo processo de transpiração (RAVEN, 2001).

Para manter o balanço entre a perda de água e suas necessidades gasosas, as plantas possuem um sofisticado sistema de controle estomático. Esses estômatos se abrem e se fecham em resposta a sinais ambientais ou fisiológicos (RAVEN, 2001). Atualmente, sabe-se que influenciam na abertura estomática, a radiação solar, a umidade do ar, a concentração de CO₂ ([CO₂]) na célula guarda, a temperatura, deficiência de água, o vento, os teores de potássio (K⁺), sacarose (sac) e cloro (Cl⁻), o estado hídrico do solo e da planta e a idade da folha. Como esses sinais se relacionam entre si no movimento estomático foi, até agora, só parcialmente respondido e ainda é objeto de intensas pesquisas (ROELFSELMA & HEDRIC, 2005), as quais utilizam técnicas experimentais como sonda de pressão e microscopia confocal, ao lado de virtuais, como modelagem computacional.

Nas células guarda, há variação dos teores dos solutos existentes, devido, entre outros fatores, à produção de açúcares no processo de fotossíntese e ao transporte de potássio através da membrana plasmática para dentro da célula. A diferença de concentração de solutos no interior e no exterior da célula acarreta perdas ou ganhos, por osmose, de água pela célula, alterando seu volume. A pressão de turgescência, proporcional à concentração desses solutos, da célula estomática regula a abertura estomática, controlando assim o fluxo de vapor d'água para o exterior da planta. O mecanismo que regula esse processo (osmorregulação) é, portanto, de extrema importância para se compreender a dinâmica hídrica das plantas vasculares.

Gaio (2011) desenvolveu uma modelagem do funcionamento do estômato em função da pressão de turgescência das células guarda com base no modelo fisiológico de Buckley (2005), sem introduzir, todavia, a modelagem da osmorregulação.

O desafio desta pesquisa foi desenvolver uma técnica de modelagem, em simuladores de circuito, para a pressão de turgescência das células guarda ao longo do dia, a partir do tratamento fisiológico da osmorregulação, utilizando, para tanto, os valores experimentais presentes na literatura para a folha intacta da *Vicia faba*.

As relações ambientais com a dinâmica estomática constituem um modelo científico já validado no escopo do trabalho dos grupos de pesquisa que as obtiveram. A analogia do comportamento hídrico dos vegetais com o comportamento

elétrico permite criar um modelo científico com base no dos fisiologistas, estruturado à luz das características de um modelo conceitual. O mapa conceitual, ao lado dos esquemas dos circuitos elaborados no QUCS (Quite Universal Circuits Simulation), complementam o modelo conceitual. Dessa forma, o modelo desenvolvido pode ser um facilitador para futuras transposições didáticas sobre os temas envolvidos no análogo.

1.2 JUSTIFICATIVA

LANG et al. (1969) e JOHANSSON & PRYTZ (2002) propuseram, separadamente, circuitos elétricos como analogia a uma planta. GAIO (2011), além de propor um circuito mais completo, simulou os diversos componentes do contínuo solo-planta-atmosfera (SPA) no software QUCS. Diferentemente dos anteriores, seu modelo não é uma analogia teórica, pois torna possíveis as fases de simulação, calibração e validação. Além disso, permite introduzir novas parametrizações. Desse modo, apesar da grande complexidade do funcionamento dos estômatos, é possível escolher as variáveis que mais influenciam em seu movimento e, por meio dessa modelagem, obter funções análogas fisiologicamente ao estômato.

A radiação solar é o principal sinal ambiental na osmorregulação da célula-guarda, que funciona como um motor que desencadeia o movimento estomático. Os diagramas esquemáticos para compreender a osmorregulação, ou seja, como os solutos se acumulam na célula-guarda e variam o seu volume em função da entrada ou saída de água, foram descritos por TALBOTT & ZEIGER (1998); VAVASSEUR & RAGHAVENDRA (2005); SHIMAZAKI et al. (2007) e LAWSON (2008). Porém, não foram esgotados os estudos nessa área, pois até hoje existem teorias que diferem entre si quando se trata do mecanismo de abertura estomática.

A modelagem também facilita a compreensão e o aprendizado, ao utilizá-la como instrumento de ensino, pois utilizando recursos gráficos gerados pelos simuladores torna-se mais fácil enxergar a forma como a natureza trabalha.

O desenvolvimento de estudos, pesquisas e experimentações, produção e divulgação de material educativo na área ambiental são itens que estão nas atividades vinculadas à Política Nacional de Educação Ambiental e devem ser desenvolvidas na educação em geral e na educação escolar (Lei nº 9.795/99 Art. 8º, incisos II e III).

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um análogo elétrico da pressão de turgescência estomática em função das concentrações de solutos nas células guarda em plantas da espécie *Vicia faba* com características de modelo conceitual.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

Estimar o volume e a pressão osmótica das células guarda do estômato da *Vicia faba*.

Desenvolver os circuitos análogos (dispositivos hídricos) no QUCS (Quite Universal Circuits Simulation).

Simular *in silico*¹ a pressão de turgescência das células guarda do estômato da *Vicia faba* e do circuito estômato controlado pelo dispositivo hídrico Pg.

Elaborar um mapa conceitual para facilitar a compreensão e o aprendizado do modelo científico e conceitual desenvolvido, com possível aplicação ao ensino médio.

¹In silico é uma expressão usada no âmbito da simulação computacional e áreas correlatas para indicar algo ocorrido "em ou através de uma simulação computacional". A expressão foi cunhada a partir das expressões latinas *in vivo* e *in vitro*, frequentemente usadas na Biologia. In silico é, originalmente, usada apenas para denotar simulações computacionais que modelam um processo natural ou de laboratório e não para cálculos computacionais genéricos. A expressão in silico parece ter sido usada publicamente pela primeira vez em 1989 no workshop "Autômatos Celulares: Teoria e Aplicações", em Los Alamos (EUA).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *VICIA FABIA*

A *Vicia faba*, também conhecida como fava feijão, **Figura 1**, vem sendo estudada pelos fisiologistas, tendo disponível uma boa quantidade de parâmetros a seu respeito.

“A fava (*Vicia faba*) é uma planta da família das leguminosas agora renomeada Fabaceae, não trepadeira, que produz vagens grandes, dentro das quais se formam as sementes. (Fabaceae, Papilionoideae). É um alimento de grande importância desde a Idade da Pedra. Povos antigos, tais como os Gregos, Egípcios e Romanos bem como em muitos países do Médio Oriente já a apreciavam bastante. É incerta sua origem, no entanto, admite-se que seja da região do Cáspio e do Norte da África. É uma planta perfeitamente adaptada a climas mediterrâneos, onde tem um papel preponderante na dieta, especialmente no início da Primavera, quando existe pouca diversidade nas hortas. É muito rica em proteínas e carboidratos, embora pobre em vitaminas. Alcança cerca de 1,20 m de altura e produz flores grandes, brancas ou róseas, às vezes arroxeadas, com mácula preta.” (Em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Fava>>. Acesso em 20 de fevereiro de 2013.)



Figura 1. *Vicia faba*. A *Vicia faba* ou fava-feijão é uma planta da família da Fabaceae, não trepadeira, que produz vagens grandes, dentro das quais se formam as sementes. É um alimento de grande importância desde a Idade da Pedra.

Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fava>

2.2 FLUXO DE ENERGIA

A vida na Terra depende do fluxo de energia vindo do Sol e as plantas requerem uma adição contínua dessa energia para manter e restaurar suas estruturas complexas e bem organizadas (TAIZ & ZEIGER, 1998). Assim, por meio da fotossíntese, as plantas transformam e armazenam a energia conforme ilustra a **Figura 2**.

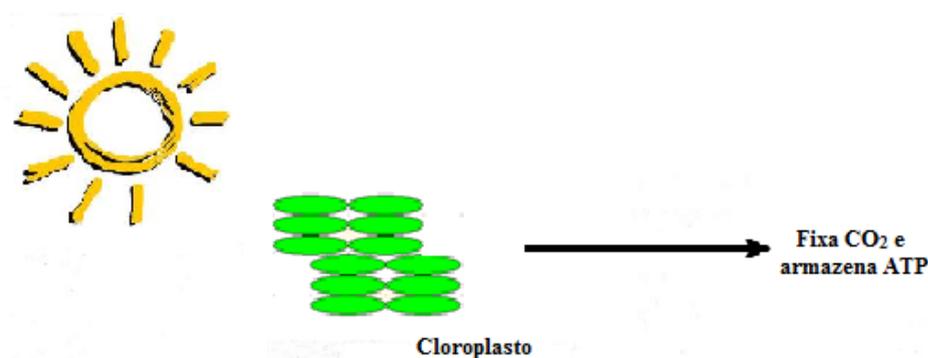


Figura 2 – Fluxo de energia biológica. Os cloroplastos, presentes em todas as células fotossintetizantes, captam a energia solar que é utilizada para realização de fotossíntese e armazenamento de ATP que pode ser utilizado para trabalho biológico.

A ascensão da água pelo xilema, no entanto, se faz a custo zero, isto é, a planta utiliza o poder evaporativo da atmosfera. Há necessidade apenas de dispêndio de energia para o controle desse fluxo. A radiação solar, desse modo, é a principal variável no controle do fluxo hídrico.

2.3 POTENCIAL HÍDRICO

Entre 90% e 95% de uma planta é composta de água que é uma das substâncias mais abundantes na Terra. O modo como as plantas obtêm, dada a sua imobilidade, transportam e armazenam a água 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 molar (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, enquanto que μ_0 é o potencial químico da água pura à altura de referência (z_0) e V_M é o volume parcial molar da água pura. Como consequência desta 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 influenciam o potencial hídrico (ψ) em plantas são potencial osmótico (ψ_π), pressão hidrostática (ψ_p) e potencial gravitacional (ψ_g). Assim, o potencial hídrico pode ser dividido em componentes individuais, conforme a equação 2:

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

2.3.1 Potencial hídrico osmótico (ψ_π)

Quando adiciona-se solutos na água, tem-se um processo irreversível que aumenta a desordem do sistema, aumentando a entropia e diminuindo o seu potencial hídrico. Isso significa que o potencial osmótico independe da natureza específica do soluto, mas depende do número de partículas do soluto.

Uma aproximação muito útil geralmente utilizada em soluções biológicas é a relação de van't Hoff:

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

Em que R é a constante dos gases e vale $8.314E-4$ MPa.pl.pmol⁻¹.K⁻¹, T é a temperatura absoluta do sistema (K) e c_s é a concentração de solutos (mol m⁻³). O sinal negativo indica que os solutos dissolvidos reduzem o potencial hídrico da solução em relação ao estado de referência da água pura.

A equação 3 é válida para soluções “ideais” a concentrações diluídas. Soluções reais frequentemente desviam-se das ideais. Já a pressão osmótica (Π) é a força (por unidade de área) exercida pela parede da célula impedindo a entrada de água na célula que ocorreria devido à diferença de potencial osmótico.

$$\Pi = -\psi_{\pi} = RTc_s \quad (4)$$

2.3.2 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.

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).

2.3.3 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 .

$$\psi_g = \frac{Mgz}{V_M} = \mu_w gz \quad (5)$$

Nessa expressão, M é a massa molar da água (18g), 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).

2.4 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE ÁGUA E A DIFERENÇA DE POTENCIAL HÍDRICO

2.4.1 Osmose

As moléculas de água em uma solução não são estáticas, elas trocam energia cinética com outras moléculas. As moléculas misturam-se aleatoriamente em um movimento chamado difusão. Ocorre de forma espontânea, individual e por acaso. É um movimento direcionado de uma região de alta concentração para uma de baixa concentração de solutos. Em 1885, Adolph Fick foi o primeiro a examinar a difusão quantitativamente. Ele verificou que a taxa de difusão é proporcional ao gradiente de concentração. Esta relação é conhecida como a 1ª Lei de Fick (TAIZ & ZEIGER, 1998):

$$J_s = -D_s \nabla c_s \quad (6)$$

Em que J_s é a densidade de fluxo ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e D_s é o coeficiente de difusão ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Utiliza-se a notação escalar dado que o fluxo e o gradiente possuem a mesma direção (no caso, expressão abaixo, o eixo x). O sinal negativo aparece porque o fluxo tem sentido contrário ao gradiente.

$$J_s = -D_s \frac{dc_s}{dx} \quad (7)$$

Considerando o gradiente constante na região de estudo tem-se:

$$J_s = -D_s \frac{\Delta c_s}{\Delta x} \quad (8)$$

Nessa expressão, Δc_s é a diferença de concentração das substâncias, em mol m^{-3} , entre os pontos considerados, os quais distam Δx (m).

Segundo Stein (1986), as membranas de células vegetais são semipermeáveis, ou seja, elas permitem o movimento de água e de outras pequenas substâncias, sem carga, através delas mais prontamente do que o movimento de

solutos maiores e de substâncias com cargas. Da mesma forma que a difusão (gradiente de concentração) e fluxo de massa (gradiente de pressão), a osmose ocorre espontaneamente em resposta a uma força impulsionadora contrária ao gradiente de potencial hídrico, ocorrendo sempre de um potencial hídrico maior para um potencial hídrico menor.

Uma célula pode estar: (a) em equilíbrio osmótico com seu meio circunvizinho (meio isotônico), sem movimento real de água; (b) em solução hipertônica, em que a água move-se para fora da célula e (c) em solução hipotônica em que a água move-se para seu interior criando uma pressão externa, podendo inclusive romper-se.

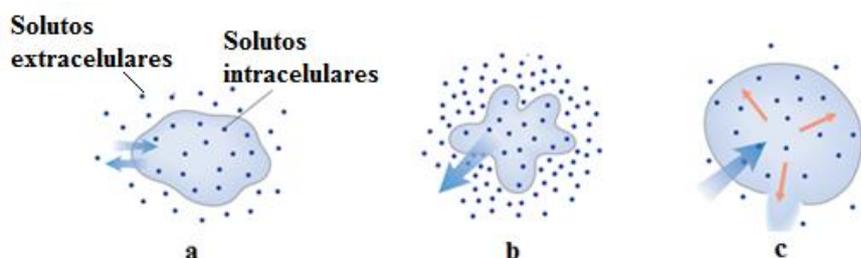


Figura 3 – Osmose. Efeito da osmolalidade extracelular no movimento de água através da membrana plasmática. A densidade de pontos representa a concentração de solutos. (a) célula em solução isotônica; (b) célula em solução hipertônica e (c) célula em solução hipotônica.

A osmose é de fundamental importância nos processos de absorção e perda de água entre células e entre célula e ambiente extracelular.

2.4.2 Fluxo de Massa

Conforme TALBOTT & ZEIGER (1998) “o fluxo de massa é o movimento de grupos de moléculas de água em resposta a uma aplicação de força externa”. Por exemplo, o fluxo de massa da célula para o exterior devido à pressão mecânica das paredes celulares sobre o citosol. O fluxo de massa é o responsável pelo transporte de água a longa distância nos vegetais.

2.5 ESTÔMATOS

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

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. Esse controle das trocas gasosas, através das superfícies foliares, é exercido por um par de células epidérmicas especializadas, as células guardas, ladeadas por células epidérmicas não especializadas. O movimento de abertura e de fechamento estomático depende das particularidades fisiológicas das células guarda e de fatores ambientais.

A densidade de estômatos nas folhas varia entre 1000 e 100000 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).

2.5.1 Estrutura dos Estômatos

Os estômatos estão localizados principalmente nas folhas, mas também podem estar presentes em frutos, caules jovens e flores. Eles são formados por duas células guarda, que contém cloroplastos para realizar fotossíntese, e uma fenda denominada ostíolo, entre as células guarda, por onde ocorre saída de água e entrada de CO_2 .

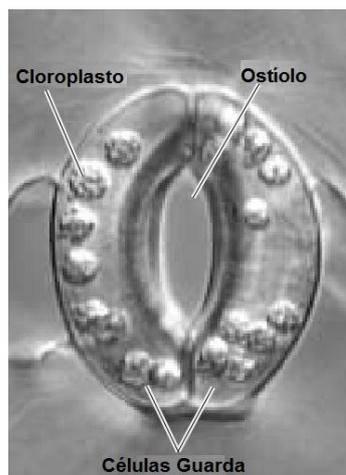


Figura 4 – Estômato de *Vicia faba*.
 Fonte: adaptado de Taiz & Zeiger (2004).

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

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. Uma analogia com tubos de borracha (FISIOLOGIA DOS ESTÔMATOS..., p.3) pode ser feita para entender como ocorre esse processo, conforme **Figura 5**.

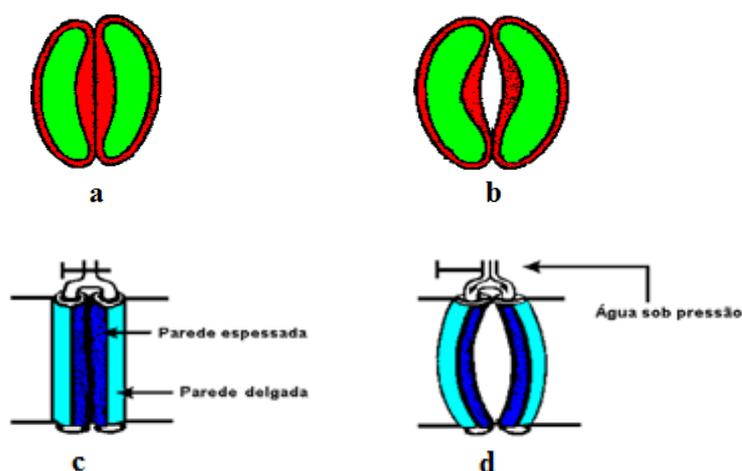


Figura 5 – Analogia entre células guarda e tubos de borracha. (a) Com pouca turgescência as células guardas estão fechadas. (b) Com a entrada de água, aumenta-se a pressão sobre toda a superfície interna das células guardas. Como a parede espessada é mais grossa, o movimento de abertura ocorre

na parede delgada (externa), fazendo com que o poro estomático se abra. (c) e (d) análogos de tubos de borracha referentes aos itens (a) e (b) respectivamente.

Fonte: <http://www.ciagri.usp.br/~lazaropp/FisioVegGrad/RelacoesHidricasII.html>

O acúmulo de sais de potássio (k^+) e açúcares nas células guarda resulta em uma diminuição no potencial hídrico e subsequente absorção de água. O aumento da pressão de turgescência, a partir de absorção de água, aumenta o volume das células guarda promovendo a abertura dos estômatos.

Segundo 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:

$$a_s = b_g(\Psi_{Pg} - m\Psi_{Pe}) \quad (9)$$

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 (tem sinal negativo).

Na **Figura 6**, tem-se a representação da equação (9). (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.

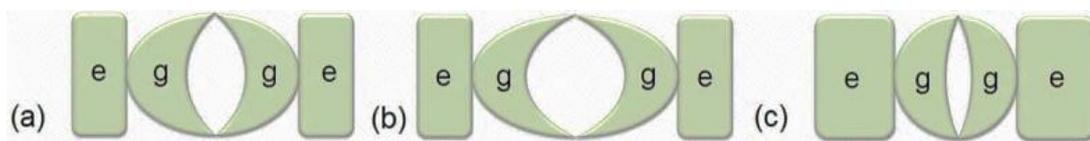


Figura 6 – Influência da Pressão de turgescência sobre a abertura estomática. Representação esquemática da equação 9. (a) Células guarda e epidérmicas em equilíbrio. (b) Pressão de turgescência da célula guarda maior que a epidérmica fazendo com que o estômato se abra. (c) Pressão de turgescência da célula epidérmica maior que a da célula guarda fazendo com que o estômato se feche.

Fonte: adaptado de Gaio (2011)

2.5.2 A Luz na Abertura Estomática

A abertura estomática é induzida pela luz, principalmente as faixas do azul e vermelho. A luz azul funciona essencialmente como um sinal e a vermelha tanto como sinal e fonte de energia.

A luz desencadeia os processos de captação de íons potássio (K^+) e produção de açúcares nas células guarda, no entanto, ainda existem dúvidas entre os pesquisadores sobre como a luz promove esse processo.

O teor de potássio tem um pico aproximadamente às 10 horas da manhã e declina a partir desse ponto quase linearmente até o final do ciclo de luz diária. A sacarose, produto da fotossíntese, tem seu pico de concentração aproximadamente às 17 horas (**Figura 7**)

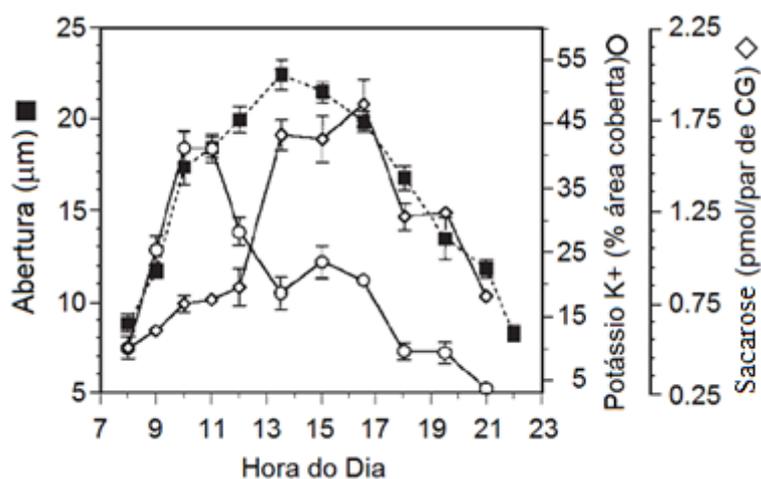


Figura 7 – Abertura estomática e teor de solutos. Teor de potássio e sacarose na célula guarda do estômato de *Vicia faba*. O teor de sacarose é expresso pela porcentagem da área da célula guarda coberta por mancha da substância. O teor de sacarose é expresso em pmol por par de células guarda. Fonte: adaptado de Talbott & Zeiger (1998).

Segundo Zeiger (2004), a luz azul é o principal sinal ambiental que controla a abertura 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 (INO, 1985).

Quando a luz 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, 1985; WU, 1995 e GOH, 2002). Para compensar a falta de H^+ , é aberto um canal para entrada de íons potássio, chamado bomba de potássio (SHIMAZAKI, 2007). Para contrabalancear a carga positiva devido ao acúmulo de potássio, ocorre a entrada de íons cloro (Cl^-) (ROELFSEMA & HEDRIC, 2005). Esses solutos elevam o potencial osmótico resultando em uma diminuição no potencial hídrico e subsequente absorção de água, aumentando, portanto a pressão osmótica do estômato. Com isso o volume das células guarda é aumentado, alargando a abertura do estômato (**Figura 8**).

A luz azul também causa a degradação do açúcar acumulado no cloroplasto da célula guarda que disponibiliza a sacarose e participa da síntese do malato⁻². Os íons potássio, cloro, malato⁻² e a sacarose são os principais solutos que alteram o potencial hídrico das células guarda.

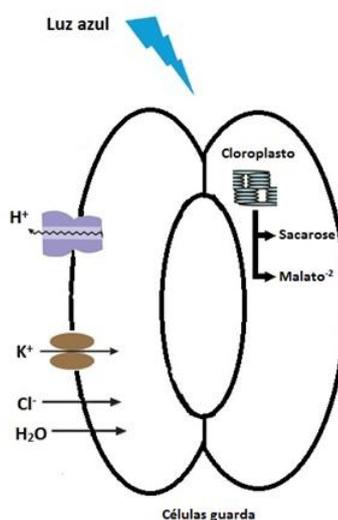


Figura 8 – Influência da luz azul na abertura estomática. A luz azul incide na membrana, ativando a bomba H^+ ATPase, que ativa a bomba de potássio e incita a entrada de íons cloro. Ocorre então a entrada de água nas células guarda, aumentando a pressão osmótica e abrindo o estômato. A luz azul também degrada açúcar (sacarose) e auxilia na síntese do malato⁻². A luz azul funciona como um sinal para o movimento estomático.

A luz vermelha é absorvida pelos cloroplastos da célula guarda e do mesófilo. 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, 2002). Já os cloroplastos do mesófilo fixam CO₂ (realizam fotossíntese) o que reduz a concentração do CO₂ (ROELFSEMA & HEDRIC, 2005). Essa redução ativa um processo que mantém a membrana hiperpolarizada, mantendo, portanto a bomba de potássio em funcionamento (**Figura 9**).

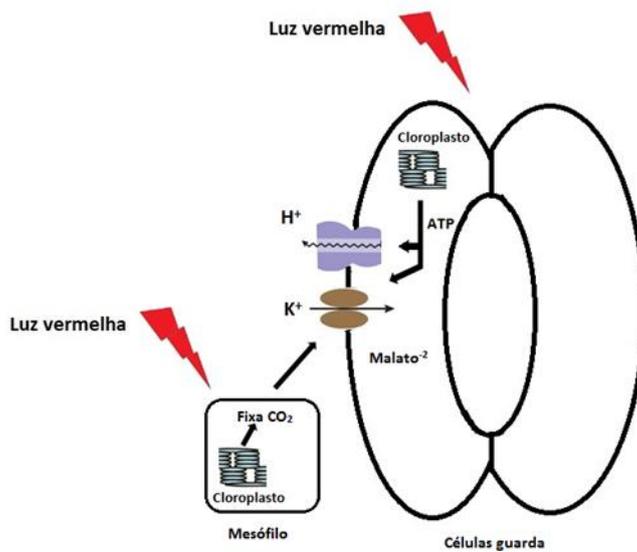


Figura 9 – Influência da luz vermelha na abertura estomática. Os cloroplastos da célula guarda fornecem ATP (energia) para a manutenção da bomba H⁺ ATPase e bomba de potássio além de auxiliar na síntese do malato⁻². A concentração de CO₂ no cloroplasto do mesófilo diminui, mantendo a membrana plasmática hiperpolarizada e a bomba de potássio em funcionamento. A luz vermelha funciona como mantenedora do movimento estomático.

2.6 LEIS DE KIRCHHOFF ANÁLOGAS

O circuito hídrico através da planta vem sendo estudado de maneira análoga aos circuitos elétricos. O fluxo hídrico (f) corresponde ao inverso da resistência (R_f) ao fluxo hídrico vezes o déficit do potencial hídrico ($\Delta\psi$).

$$f = \frac{\Delta\psi}{R_f} \quad (10)$$

Gaio (2011) estabeleceu 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: Gaio (2011)

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

Nesta modelagem, 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: Há conservação de volume de água em qualquer ponto do circuito (em unidades de precipitação).

2.6.1 Dispositivo Definido por Equação (EDD)

O circuito estômato (**Figura 10**), desenvolvido por Gaio (2011) em ambiente QUCS é um Dispositivo Definido por Equação (EDD). Trata-se de um resistor variável que controla o fluxo de entrada em função da pressão de turgescência da célula guarda (P_g) e da pressão de turgescência da célula epidérmica (P_e).

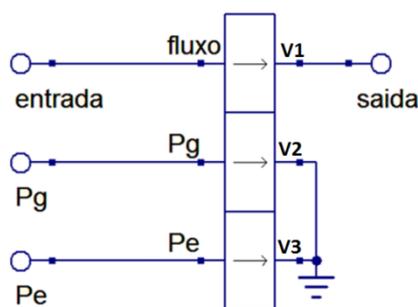


Figura 10 – Circuito do estômato. O circuito é composto por um único EDD com três ramos de potencial hídrico: entrada (V_1); P_g (V_2) e P_e (V_3). O dispositivo possui uma única saída, cuja corrente de saída obedece a equação (12).

Utilizando a equação 9, ao se tratar a_s como um índice (isto é, dividindo-se toda a equação 9 pelo valor máximo da abertura estomática), pode-se obter as resistências mínima, R_{\min} , e máxima, R_{\max} , com a seguinte expressão:

$$R = R_{\min} + (1 - a_s) \cdot (R_{\max} - R_{\min}) \quad (11)$$

O fluxo hídrico (f) que sai da folha e alimenta a entrada do circuito estômato é de $2.23E-7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ sob uma diferença de potencial hídrico ($\Delta\psi$) de 63.2 MPa, que representa a diferença entre o potencial hídrico da cavidade subestomática (-6.9 MPa) e o potencial hídrico da atmosfera a 60% de U.R. (-70.1 MPa) (Nobel, 2009). Assim, de acordo com a equação (10), a resistência mínima estomática $R_{\min} = 2.83E8 \text{ MPa s m}^{-3}$. Para R_{\max} Gaio (2011) estimou o valor de $1.44E9 \text{ MPa s m}^{-3}$.

Assim, a equação 10, em linguagem QUCS, transforma-se em um sistema de três equações que gera o fluxo de saída no dispositivo EDD:

$$\begin{aligned} i_1 &= V_1 / ((V_2 < m * V_3) ? R_{\max} : \\ & (V_2 > (1/b_g) + m * V_3) ? R_{\min} : \\ & R_{\min} + (1 - b_g * (V_2 - m * V_3)) * (R_{\max} - R_{\min})) \end{aligned} \quad (12)$$

Em que V_1 representa ($\Delta\psi$), V_2 representa P_g e V_3 representa P_e .

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

$$i_1 = V_1/R$$

Se ($V_2 < m * V_3$) então faça

$$R = R_{m\acute{a}x}$$

Ou Se ($V_2 > (1/b_g) + m * V_3$) então faça

$$R = R_{m\acute{i}n}$$

Se nenhuma anterior for satisfeita, faça

$$R = R_{m\acute{i}n} + \left(1 - b_g * (V_2 - m * V_3)\right) * (R_{m\acute{a}x} - R_{m\acute{i}n})$$

Fim

Caso o resultado da relação entre potencial da epiderme e da célula guarda resultasse em uma abertura estomática menor que zero ($V_2 < mV_3$), a resistência assume seu valor máximo, $R_{m\acute{a}x}$, e igual a resistência da epiderme (primeira linha da equação 12). Para valores em que o índice de abertura estomática seja maior que 1, a equação 12 retorna o valor de $R_{m\acute{i}n}$ (segunda linha). Para as outras condições, quando a abertura estomática está entre 0 e 1, a resistência estomática obedece a terceira linha da equação 12.

2.7 A IMPORTÂNCIA DE MODELOS CONCEITUAIS NA FÍSICA

Modelos científicos são historicamente importantes na construção do conhecimento científico. A ciência é construída e perpetuada a partir de modelos que são representações análogas ao objeto de estudo dos cientistas.

Já os modelos conceituais são aqueles desenvolvidos inclusive por professores, com o intuito de facilitar a compreensão dos fenômenos físicos. São projetados como ferramentas para o entendimento e o ensino de sistemas físicos (NORMAN, apud GENTHER & STEVENS, 1983).

Os modelos conceituais devem ser consistentes com o conhecimento científico e podem ser representados em formulações matemáticas ou analogias (GRECA & MOREIRA, 1997a). Por exemplo, um conjunto de equações

matemáticas e de leis empíricas, a analogia entre o átomo de Rutherford e o sistema solar e, no caso deste trabalho, a analogia entre potencial hídrico e potencial elétrico.

Os modelos conceituais auxiliam no processo de aprendizagem, pois o aluno não é apenas um mero receptor de informações, é um receptor e representador do mundo e daquilo que lhe é ensinado e o faz de forma única, de acordo com suas percepções prévias. De outro lado, o conhecimento científico se reflete no âmbito das definições, perguntas, metáforas e analogias, que são os elementos fundamentais na construção de uma visão de mundo. Perguntas são instrumentos de percepção, definições e metáforas são instrumentos para pensar e são válidos apenas dentro de um contexto.

Segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2002), a Física no ensino médio é um instrumento para compreensão do mundo e também uma ferramenta do pensar e do agir do aluno. Para que isso ocorra é necessário que o aluno adquira competências para lidar com as situações que vivencia ou venha a vivenciar no futuro.

Consta nos PCN+ (BRASIL, 2002): “Muitas dessas competências são objetivos comuns a todas as etapas do aprendizado, embora em diferentes níveis, sendo construídas ao longo do desenvolvimento dos alunos”.

Algumas das competências em Física propostas pelo PCN+ (BRASIL, 2002) se referem a modelos explicativos e representativos:

- Conhecer modelos físicos microscópicos para adquirir uma compreensão mais profunda dos fenômenos.
- Interpretar e fazer uso de modelos explicativos.
- Elaborar modelos simplificados de determinadas situações, a partir dos quais seja possível levantar hipóteses e fazer previsões.

Os modelos conceituais podem nos fornecer representações simplificadas e idealizadas de objetos, fenômenos ou situações reais, no entanto precisos, completos e consistentes com os padrões científicos (GRECA & MOREIRA, 1997a).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho proposto visa obter resultados próximos da realidade, para isso foram pesquisados na literatura os parâmetros necessários para os cálculos da Pressão Osmótica das células guarda de *Vicia faba*, visando obter a Pressão de Turgescência para então controlar o circuito estômato. As pesquisas desenvolvidas na área não oferecem todos os parâmetros quantitativos, de modo que houve necessidade de estimar valores plausíveis de acordo com a fisiologia.

De acordo com Buckley (2005), a modelagem integrada do movimento estomático está longe de ser conclusiva. Em modelagem, segundo Gomes e Varriale (2001), “um dos fatores fundamentais é a complexidade dos sistemas em questão, dados o número e a variedade de seus subsistemas em interação”.

Várias foram as etapas para o desenvolvimento deste trabalho, descritas sucintamente na **Figura 11**.

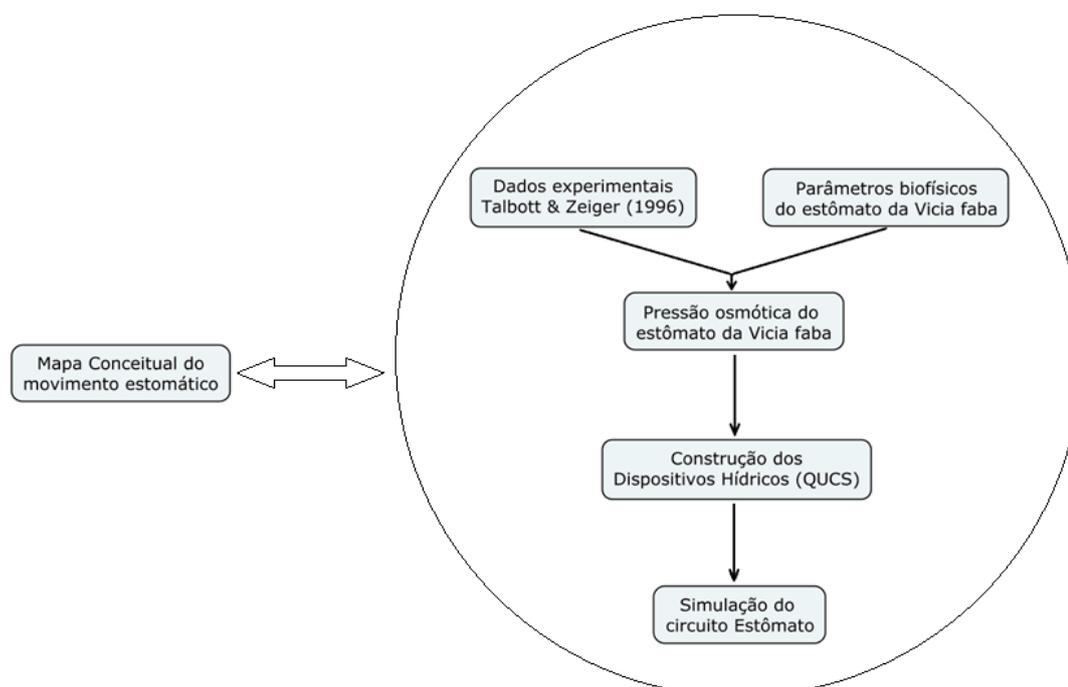


Figura 11. Fluxograma com as etapas de construção do análogo. Primeiramente foram digitalizados os dados experimentais de Talbott & Zeiger (1996). Foram encontrados na literatura sobre fisiologia os parâmetros biofísicos do estômato da planta *Vicia faba*. Foi então estimada a pressão osmótica, desenvolvidos e simulados os dispositivos hídricos e simulado o circuito estômato, em ambiente QUCS. Concomitante a esse processo foi elaborado um mapa conceitual com a representação dos processos bioquímicos e físicos envolvidos no movimento estomático com possibilidade de aplicação no ensino médio.

3.1 DETERMINAÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO BIOFÍSICA DO ESTÔMATO DA *VICIA FABA*

Neste modelo foram adotados parâmetros biofísicos, estimados com base na literatura, do estômato da *Vicia faba* resumido na **Tabela 2**.

Tabela 2 – Parâmetros biofísicos do estômato da *Vicia faba*.

	Estômato fechado	Estômato aberto
Ab. estomática	1.26 $\mu\text{m}^{(a)}$	12.89 $\mu\text{m}^{(a)}$
Volume	3.5 pl ^(b)	5 pl ^(b)
Turgescência	1 MPa ^(c)	4.5 MPa ^(c)
Teor de K ⁺	0.1 pmol ^(d)	2.1 pmol ^(d)
Teor de Sacarose	0.2 pmol ^(e)	1.55 pmol ^(e)
Teor de Cl ⁻	0.2 pmol ^(f)	1 pmol ^(f)

^(a) A abertura estomática média mínima é de 1.26 μm e a média máxima é de 12.58 μm , considerando dados do apêndice.

^(b) O volume do estômato fechado varia entre 3.5 e 4.5 pl e do estômato aberto varia entre 5 e 8 pl (Shope et al, 2003).

^(c) A pressão de turgescência da célula guarda varia entre 1.0 MPa e 4.5 MPa, considerando a pressão de turgescência da célula epidérmica constante a 0.62 MPa (Franks et al. 1998).

^(d) O teor de íons potássio mínimo varia entre 0.1 e 0.55 pmol por par de células guarda e o teor máximo varia entre 2.1 e 3 pmol (Fischer, 1972; Humble & Raschke, 1972; Allaway & Hsiao, 1973; Outlaw & Lowry, 1977; apud. Roelfsema & Hedric, 2005)

^(e) O teor de sacarose varia de 0.2 pmol a 1.55 pmol por par de células guarda quando o estômato fechado e aberto respectivamente (Talbot & Zeiger, 1996).

^(f) O teor de íons cloro varia de 0.2 pmol a 1 pmol por par de células guarda (Roelfsema & Hedric, 2005)

Talbot & Zeiger (1996) utilizaram imagens de vídeo para caracterizar o movimento dos estômatos ao longo do dia em plantas da espécie *Vicia faba* cultivadas em estufa, na cidade de Los Angeles, de setembro a maio. Técnicas como HPLC (Cromatografia Líquida de Alta Eficiência) e Histoquímica semiquantitativa foram utilizadas para encontrar a relação entre a abertura estomática e os teores de potássio, sacarose e cloro ao longo do dia.

A abertura estomática e os teores de potássio, de sacarose e de cloro ao longo do dia, encontrados por Talbot & Zeiger (1996), foram digitalizados e inseridos em uma planilha digital, resultando em séries históricas diárias com

intervalo de 15 minutos entre cada valor, conforme **Tabela 3**. O teor de potássio ao longo do dia, encontrado no experimento, está expresso em porcentagem em relação aos limites de fechamento e abertura do estômato. Neste trabalho foram convertidos, a partir dos dados da **Tabela 2, letra d**, em valores absolutos. Já o teor de cloro ao longo do dia está expresso em conteúdo de cloro em relação aos limites de fechamento e abertura do estômato. Neste trabalho foram convertidos, a partir dos dados da **Tabela 2, letra f**, em valores absolutos.

Tabela 3. Dados da abertura estomática referente a cada soluto e dos teores de cada soluto ao longo do dia. A abertura estomática e os teores dos solutos (potássio, sacarose e cloro) ao longo do dia foram digitalizados dos gráficos obtidos experimentalmente por Talbott & Zeiger (1996) e inseridos em uma planilha digital, baseando-se nos parâmetros da **Tabela 2**.

Hora do Dia	ab. K (μm)	Teor K (μmol)	ab. Sac (μm)	Teor Sac (μmol)	ab. Cl (μm)	Teor Cl (μmol)
5	1.26	0.02	0	0	0	0
5.25	1.5	0.05	0	0	0	0
5.5	1.74	0.09	1.8	0.211	2.96	0.19
5.75	1.95	0.11	2.17	0.21	2.96	0.21
6	2.15	0.15	2.49	0.202	2.99	0.22
6.25	2.05	0.15	2.79	0.198	2.99	0.26
6.5	1.98	0.14	3	0.194	2.96	0.28
6.75	1.88	0.13	3.11	0.206	3.42	0.31
7	1.91	0.12	3.25	0.223	4.5	0.33
7.25	2.5	0.18	3.37	0.219	5.35	0.36
7.5	3.21	0.27	3.54	0.215	6.26	0.39
7.75	3.9	0.33	3.78	0.223	6.72	0.41
8	4.62	0.45	4.14	0.227	7.2	0.46
8.25	5.51	0.59	5.88	0.318	7.47	0.48
8.5	6.4	0.77	7.61	0.409	7.72	0.52
8.75	7.32	0.94	7.24	0.364	8.75	0.55
9	8.11	1.18	6.9	0.339	9.78	0.59
9.25	8.59	1.38	8.2	0.421	10.77	0.62
9.5	9	1.61	9.63	0.54	11.74	0.66
9.75	9.52	1.82	10.9	0.645	11.29	0.71
10	9.89	2.05	12.07	0.74	10.74	0.78
10.25	9.1	1.62	11.45	0.785	10.15	0.83
10.5	8.32	1.2	10.6	0.823	9.71	0.9
10.75	7.5	0.74	10.02	0.864	10.38	0.92
11	6.91	0.32	9.39	0.897	11.12	0.93
11.25	7.91	0.45	9.67	0.914	11.83	0.95
11.5	8.97	0.57	9.95	0.93	12.74	0.97
11.75	10	0.65	10.17	0.939	13.09	0.92

12	10.89	0.75	10.52	0.972	13.3	0.88
12.25	11.47	0.8	11.14	1.129	13.55	0.83
12.5	12.05	0.87	11.72	1.27	13.8	0.77
12.75	12.6	0.92	12.29	1.42	13.43	0.77
13	13.01	0.9	12.7	1.547	12.95	0.77
13.25	12.84	0.96	11.34	1.467	12.56	0.77
13.5	12.7	0.93	10	1.39	12.05	0.77
13.75	12.56	0.91	8.97	1.347	11.67	0.77
14	12.39	0.9	7.95	1.228	11.25	0.77
14.25	12.02	0.94	6.6	1.026	11.55	0.77
14.5	11.64	0.94	5.15	0.786	11.87	0.76
14.75	11.3	1.01	3.88	0.58	12.22	0.75
15	10.92	1.04	2.57	0.38	12.65	0.75
15.25	10.27	0.91	2.53	0.355	12.98	0.74
15.5	9.62	0.81	2.5	0.322	13.37	0.73
15.75	9	0.69	2.43	0.293	12.91	0.71
16	8.28	0.57	2.39	0.281	12.37	0.67
16.25	7.63	0.45	2.39	0.27	11.97	0.65
16.5	7.02	0.45	2.39	0.29	11.58	0.61
16.75	6.6	0.38	2.43	0.3	11.12	0.59
17	6.16	0.38	2.4	0.33	10.61	0.55
17.25	5.71	0.38	2.54	0.339	9.73	0.5
17.5	5.23	0.38	2.61	0.351	8.9	0.45
17.75	4.82	0.38	2.72	0.36	8.09	0.35
18	4.38	0.38	2.75	0.37	7.3	0.27
18.25	4.24	0.31	0	0	6.61	0.22
18.5	4.14	0.26	0	0	5.94	0.18
18.75	4	0.19	0	0	5.73	0.18
19	3.86	0.11	0	0	5.48	0.18
19.25	3.73	0.1	0	0	5.2	0.18
19.5	3.63	0.03	0	0	5	0.18

3.2 ESTIMATIVA DO VOLUME ESTOMÁTICO E DA PRESSÃO OSMÓTICA POR MEIO DA RELAÇÃO DE VAN'T HOFF

Considerando que a abertura estomática varia linearmente em função do volume das células guarda (Franks, 2003) foi desenvolvida a equação 14, baseando-se na relação linear entre os limites máximos e mínimos da abertura estomática (**Tabela 2, letra a**) e do volume estomático (**Tabela 2, letra b**) conforme **Figura 12**.

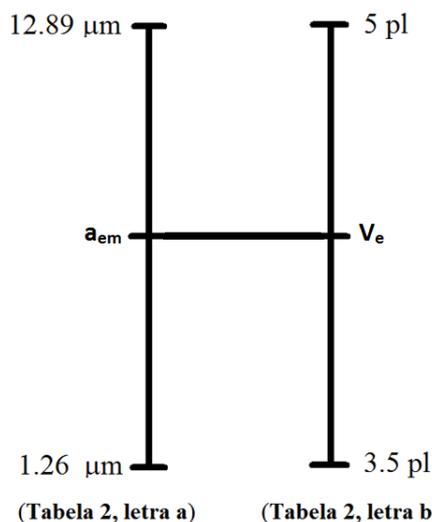


Figura 12. Relação linear entre abertura estomática (a_{em}) e volume estomático (V_e).

Da relação linear, tem-se:

$$\frac{V_e - 3.5}{5 - 3.5} = \frac{a_{em} - 1.26}{12.89 - 1.26} \quad (13)$$

Obtendo:

$$V_e = \frac{38.815 + (1.5a_{em})}{11.63} \quad (14)$$

Em que V_e é o volume estimado do par de células guarda (pl) e a_{em} é a abertura estomática média (μm)

Os cálculos referentes a abertura estomática média estão no apêndice.

Segundo a relação de Van't Hoff, a pressão osmótica depende da concentração dos solutos em questão, da constante dos gases perfeitos e da temperatura a qual se encontram.

$$\Pi_s = RT \sum_j c_j \quad (15)$$

Em que,

Π_s é a pressão osmótica da célula (MPa), R é a constante dos gases perfeitos ($8.314\text{E-}4 \text{ MPa.pl.pmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T é a temperatura absoluta da célula (K) e c_j é a concentração de cada soluto na mistura (pmol/pl)

$$c_j = \frac{n_j}{V} \quad (16)$$

Em que n_j é o teor de soluto de cada um dos componentes da mistura (pmol), V é o volume da célula-guarda (pl)

A equação (15) permite estimar a pressão osmótica em função apenas da variação dos teores de solutos e da variação do volume do estômato.

3.3 SIMULADORES DE CIRCUITO

O uso de simuladores de circuito para o cálculo do fluxo hídrico foi utilizado pela primeira vez por Gaio (2011):

A estratégia adotada para modelar foi a utilização de simuladores de circuitos. Há um grande número dessas ferramentas computacionais que, por meio de uma interface gráfica, permitem montar o circuito, impor condições de contorno e iniciais para a solução numérica do sistema de equações, resultando em uma simulação do comportamento dos circuitos. Desenvolvido em 1975, na Universidade de Berkeley, o Spice (*Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis*) foi o primeiro simulador de circuitos conhecido mundialmente. A maioria das ferramentas em uso atualmente tem o SPICE em seu núcleo. O QUCS (*Quite Universal Circuits Simulation* - Simulador de Circuitos Totalmente Universal), em desenvolvimento desde 2004 por um grupo de pesquisadores liderados por Michael Margraf e Stefan Jahn, é uma ferramenta baseada em software livre e aberto (licença GNU). Escrita em C e com interface gráfica Qt, utiliza por padrão o método trapezoidal para integração de funções lineares e de Newton-Rapson para não lineares. O usuário, no entanto, pode alterar os métodos de integração, segundo suas necessidades. Possui também uma grande biblioteca nativa de elementos de circuito (capacitores, resistores, fontes, diodos, transistores etc.).

O QUCS permite inserir fontes de potencial contínuas, periódicas (senoidal, por exemplo), ou baseadas em arquivos (**Figura 13**), o que é útil para

modelagem de variáveis estocásticas e introdução de dados experimentais, como foi o caso deste estudo.



Figura 13- Fonte de tensão baseada em arquivo. Possibilita criar uma fonte que gere uma tensão com valores determinadas pelo usuário. Essa fonte reconhece apenas arquivos no formato .CSV (dados separados por vírgula).

Por meio da equação 15 foi estimada a pressão osmótica ao longo do dia dos solutos, potássio, sacarose e cloro. Esses dados foram inseridos em uma planilha eletrônica no formato .CSV e inseridas em fontes de tensão baseadas em arquivos (**Figura 13**), que serão denominados dispositivos hídricos. Esses dispositivos hídricos foram agregados em série para formarem a pressão de turgescência da célula guarda (P_g) que foi utilizada para controlar o circuito estômato.

O circuito estômato foi o mesmo utilizado por Gaio (2011), **Figura 10**, em ambiente QUCS. Os dispositivos desenvolvidos neste trabalho foram inseridos na porta P_g do circuito estômato. Na porta P_e foi inserida uma fonte de tensão constante. O valor do fluxo hídrico de entrada, da diferença de potencial hídrico entre atmosfera e cavidade subestomática e da resistência estomática mínima e máxima são os mesmos citados no referencial bibliográfico, além das equações que regem o fluxo hídrico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTIMATIVA DO VOLUME E DA PRESSÃO OSMÓTICA DA CÉLULA GUARDA

O volume estimado, por meio da equação 14, do par de células guarda da *Vicia faba* variando entre 3.5 e 5 picolitros (pl) ao longo do dia está representado na **Figura 14**.

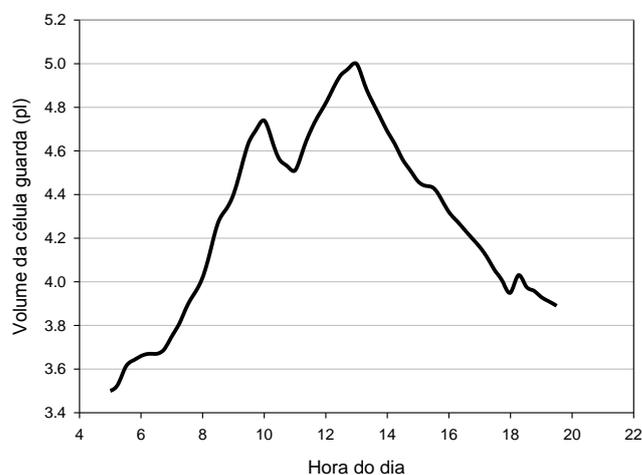


Figura 14 – Estimativa da variação do volume da célula guarda da *Vicia faba* ao longo do dia, obtida por meio da equação 15.

A estimativa da pressão osmótica, devida ao teor de potássio, no par de células guarda da *Vicia faba* ao longo do dia (**Figura 15**), foi obtida a partir da equação 15, considerando os teores de potássio fornecidos pela **Tabela 3** e o volume médio da célula guarda dado pela **Figura 14**.

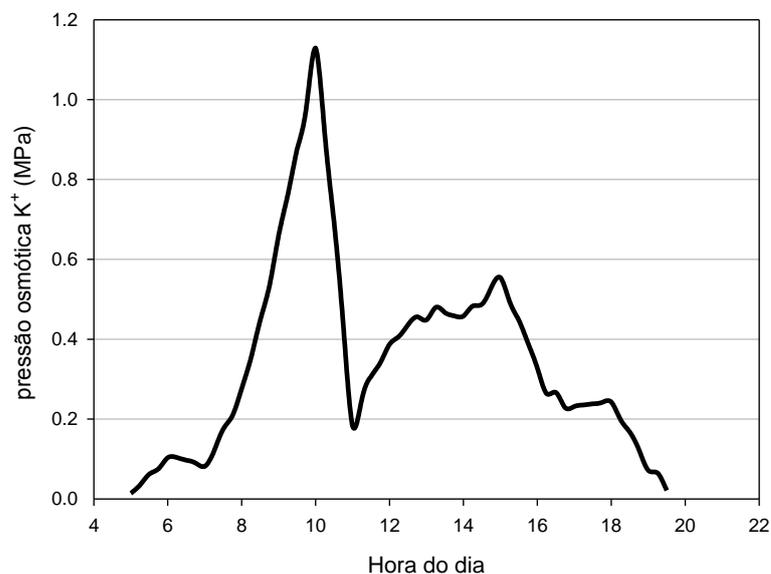


Figura 15 – Pressão osmótica do teor de Potássio. Estimativa da pressão osmótica no par de células guarda da *Vicia faba*, gerada pelo soluto potássio utilizando a equação 15 considerando os dados da **Tabela 3** e **Figura 14**.

Na **Figura 15**, a pressão osmótica estimada no par de células guarda da *Vicia faba* teve valor mínimo de 0 MPa às 05:00 e 19:30 h. A partir das 07:00 h houve um rápido aumento na pressão osmótica, que pode ser explicado pelo fato do estômato começar a receber radiação solar e ser ativado o processo de extrusão de H^+ e entrada de íons potássio. O pico de 1.2 MPa ocorreu aproximadamente às 10:00 h coincidindo com o primeiro pico de volume da **Figura 14**. Um segundo pico ocorreu às 15:00 h com 0.55 MPa. Foi perceptível como o rápido aumento da pressão osmótica produzida pelo soluto potássio influenciou o aumento do volume estomático no período matutino.

Uma estimativa da pressão osmótica, devida ao teor de sacarose, no par de células guarda da *Vicia faba* ao longo do dia (**Figura 16**), foi obtida a partir da equação 15, considerando os teores de sacarose fornecidos pela **Tabela 3** e o volume médio da célula guarda dado pela **Figura 14**.

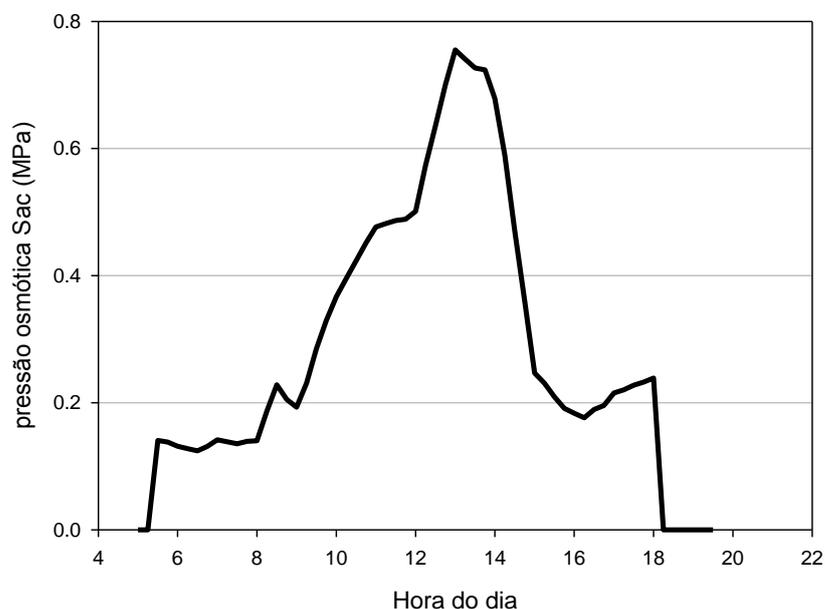


Figura 16 – Pressão osmótica do teor de Sacarose. Estimativa da pressão osmótica no par de células guarda da *Vicia faba*, gerada pelo soluto sacarose utilizando a equação 15 considerando os dados da Tabela 3 e Figura 14.

Na **Figura 16**, a pressão osmótica gerada pelo soluto sacarose no par de células guarda da *Vicia faba* teve valor mínimo de 0 MPa às 05:00 e 18:15 h em diante. A partir das 09:00 h houve um aumento na pressão osmótica, que culminou às 13:00 h com valor de 0,75 MPa e após esse horário começou a diminuir. A sacarose tem principal atuação no período vespertino devido à alta produção pela fotossíntese e degradação de açúcar.

Uma estimativa da pressão osmótica, devida ao teor de cloro, no par de células guarda da *Vicia faba* ao longo do dia (**Figura 17**), foi obtida a partir da equação 15, considerando os teores de cloro fornecidos pela Tabela 3 e o volume médio da célula guarda dado pela **Figura 14**.

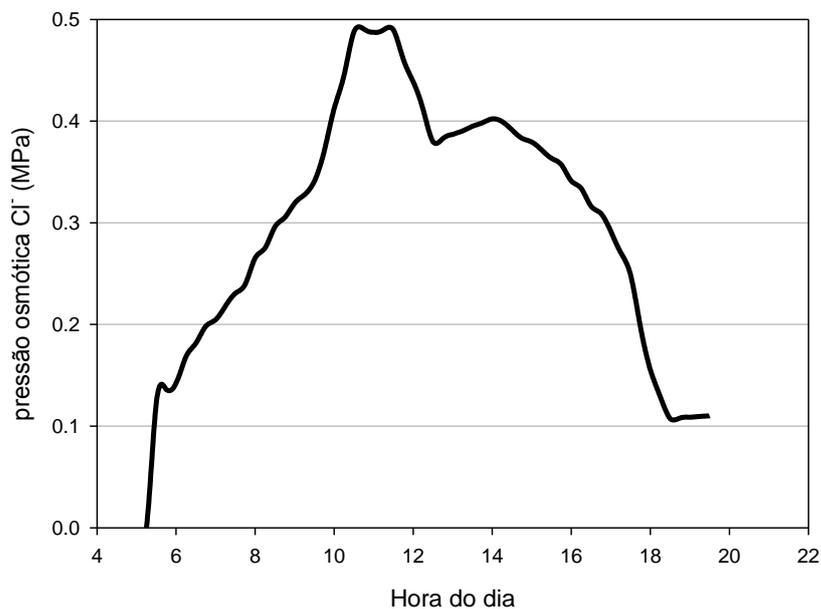


Figura 17 – Pressão osmótica do teor de cloro. Estimativa da pressão osmótica no par de células guarda da *Vicia faba*, gerada pelo soluto cloro utilizando a equação 15 considerando os dados da Tabela 3 e Figura 14.

Na **Figura 17**, a pressão osmótica gerada pelo soluto cloro da célula guarda da *Vicia faba* teve valor mínimo de 0 MPa às 05:00 h. O soluto cloro é transportado da vizinhança da célula guarda com o objetivo de contrabalancear a carga negativa causada pelo acúmulo do soluto potássio. Outros solutos também acompanham o cloro, porém não foram estudados neste trabalho.

Uma estimativa da pressão osmótica total foi obtida por meio da soma dos teores dos três solutos estudados, no par de células guarda da *Vicia faba*, ao longo do dia, conforme **Figura 18**.

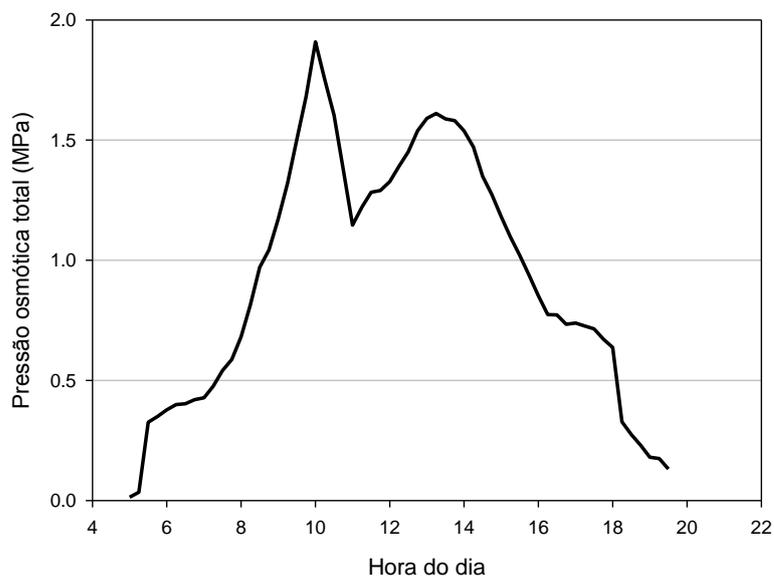


Figura 18- Estimativa da pressão osmótica total do par de células guarda do estômato da *Vicia faba* ao longo do dia, resultante da soma das curvas das figuras 15, 16 e 17.

Nota-se a forte semelhança entre o gráfico da pressão osmótica total da célula guarda ao longo do dia (**Figura 18**) e do volume da célula guarda ao longo do dia (**Figura 14**). Na **Figura 14**, existem dois picos referentes ao máximo volume da célula guarda, semelhante ao da **Figura 18**. Os dois picos podem ser explicados pelas duas fases distintas da osmoregulação que ocorrem no movimento estomático. Segundo Talbott & Zeiger (1996), durante a primeira fase (matutino) a abertura estomática está relacionada à absorção de íons potássio e em menor escala ao acúmulo de sacarose. Na segunda fase (vespertino) a absorção de íons potássio diminui e o acúmulo de sacarose se acentua.

4.2 DISPOSITIVOS HÍDRICOS

A pressão de turgescência da célula guarda foi estudada a partir de um arranjo de dispositivos hídricos que variam a Pressão Osmótica da célula guarda ao longo do dia. Foram desenvolvidos 3 dispositivos referentes aos componentes: Potássio (K^+), Sacarose (Sac) e Cloro (Cl^-).

4.2.1 Dispositivo Hídrico Potássio

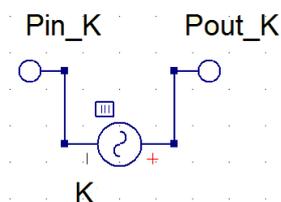


Figura 19 – Circuito da pressão osmótica do potássio (K). O circuito é uma fonte de tensão baseada em arquivo. Esse arquivo contém os valores da pressão osmótica referentes ao soluto potássio ao longo do dia utilizando a equação 15. Possui porta de entrada (Pin) e saída (Pout). Essas portas também são sondas que nos permitem inferir os valores da pressão osmótica por meio da medida de sua tensão elétrica.

O circuito foi simbolizado e denominado dispositivo hídrico potássio.

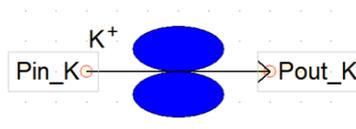
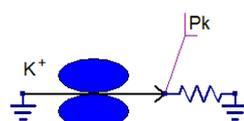


Figura 20 – Símbolo do dispositivo hídrico potássio.

Foi simulado em ambiente QUCS o dispositivo hídrico potássio conforme **Figura 21**, fornecendo, como esperado, a mesma curva de potencial da **Figura 15**.



(a)



(b)

Figura 21 – Simulação do dispositivo hídrico potássio. (a) dispositivo hídrico potássio durante a simulação. (b) gráfico resultante da simulação.

4.2.2 Dispositivo Hídrico Sacarose

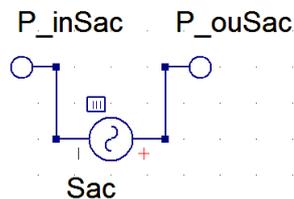


Figura 22 – Circuito da pressão osmótica da sacarose (Sac). O circuito é uma fonte de tensão baseada em arquivo. Esse arquivo contém os valores da pressão osmótica referentes ao soluto sacarose ao longo do dia utilizando a equação 15. Possui porta de entrada (Pin) e saída (Pout). Essas portas também são sondas que nos permitem inferir os valores da pressão osmótica por meio da medida de sua tensão elétrica.

O circuito foi simbolizado e denominado dispositivo hídrico sacarose.

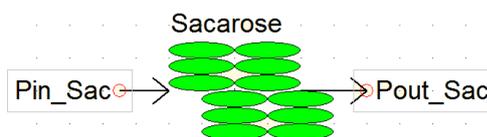


Figura 23 – Símbolo do dispositivo hídrico sacarose.

Novamente, a consistência do método pode ser observada: em ambiente QUCS, o dispositivo hídrico sacarose (**Figura 24**) fornece, como esperado, a mesma curva de potencial da **Figura 16**.

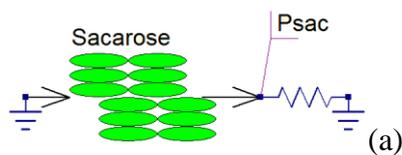


Figura 24 – Simulação do dispositivo hídrico sacarose. (a) dispositivo hídrico sacarose durante a simulação. (b) gráfico resultante da simulação.

4.2.3 Dispositivo Hídrico Cloro

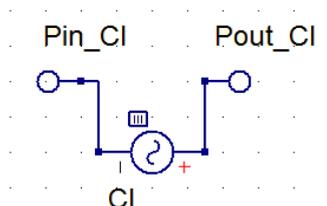


Figura 25 – Circuito da pressão osmótica do cloro (Cl). Cada circuito é uma fonte de tensão baseada em arquivo. Esse arquivo contém os valores da pressão osmótica referentes ao soluto cloro ao longo do dia utilizando a equação 15. Possui porta de entrada (Pin) e saída (Pout). Essas portas também são sondas que nos permitem inferir os valores da pressão osmótica por meio da medida de sua tensão elétrica.

O circuito foi simbolizado e denominado dispositivo hídrico cloro.

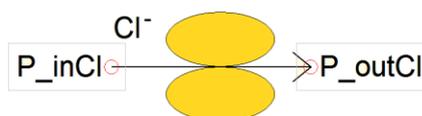
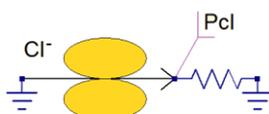


Figura 26 – Símbolo do dispositivo hídrico cloro.

Aqui também, em uma simulação no QUCS, observa-se a consistência entre a **Figura 27** e a **Figura 17**.



(a)



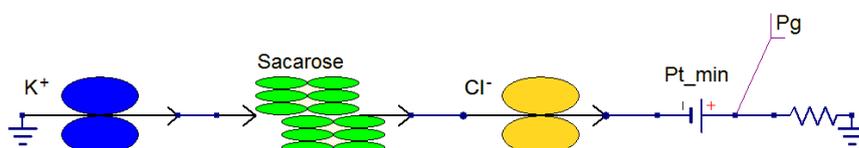
(b)

Figura 27 – Simulação do dispositivo hídrico cloro. (a) dispositivo hídrico cloro durante a simulação. (b) gráfico resultante da simulação.

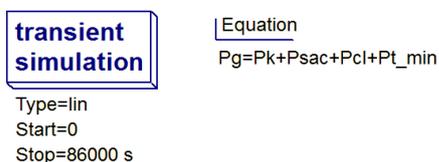
4.3 SIMULAÇÃO DA PRESSÃO DE TURGESCÊNCIA DA CÉLULA GUARDA

Os dispositivos hídricos foram conectados em série, pois a pressão de turgescência da célula guarda corresponde à soma da pressão osmótica referente aos solutos potássio, sacarose e cloro. No entanto, mesmo com o estômato fechado, a célula guarda possui uma pressão de turgescência mínima de 1 MPa que deve ser considerada ao se conectar em série os dispositivos. Por isso foi inserida uma fonte de tensão contínua com valor de 1 Volt, conforme **Figura 28**.

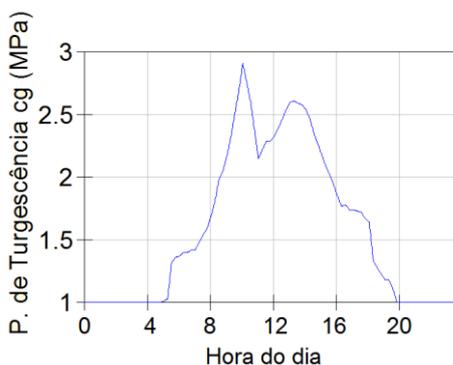
A Simulação em ambiente QUCS do circuito em série fornece a soma dos potenciais conforme **Figura 28**.



(a)



(b)



(c)

Figura 28 – Simulação transiente da pressão de turgescência do estômato da *Vicia faba*. (a) Dispositivos hídricos conectados; (b) Equações para aferição da pressão osmótica gerada pelos solutos individualmente. (c) Gráficos da variação do volume da célula guarda e da pressão de turgescência respectivamente.

A pressão de turgescência máxima do par de células guarda obtida na simulação (**Figura 28c**) foi 2.91 MPa. Roelfsema & Hedric (2005) considerando que o par de células guarda do estômato da *Vicia faba* teriam um volume de 4 μl e acumulariam cerca de 2 pmol de íons potássio, 1 pmol de Cl^- e 1 pmol de malato⁻², estimaram a pressão de turgescência máxima por meio da equação (15) em aproximadamente 3.4 MPa.

Em ambos os estudos citados anteriormente a pressão de turgescência foi menor que o valor experimental (4.5 MPa) obtido por Franks et al. (1998). Isso pode ter ocorrido por uma subestimativa da concentração de solutos. Segundo Humble & Hsiao (1969), a abertura estomática pode ser sustentada também por outros cátions monovalentes como Rb^+ , Li^+ , Cs^+ e Na^+ e malato⁻².

Tabela 4 – Comparação entre a pressão de turgescência máxima do estômato da *Vicia faba* em condição experimental, estimado e simulado em ambiente QUCS.

	Franks et al. (1998)	Roelfsema & Hedric (2005)	Análogo Pg Talbot & Zeiger (1996)
Condições	Experimental	Estimativa	Simulação
Pg máxima	4.5 MPa	3.4 MPa	2.9 MPa
Solutos envolvidos		K^+ , Cl^- e malato ⁻²	K^+ , Cl^- e Sacarose

Os dispositivos hídricos (**Figura 28 a**), que representam a pressão de turgescência no par de células guarda do estômato da *Vicia faba* foram simbolizados novamente, conforme **Figura 29**.

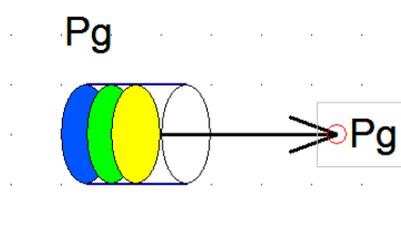


Figura 29 – Dispositivo hídrico que representa a pressão de turgescência (P_g) do par de células guarda do estômato da *Vicia faba*. O encapsulamento contém os dispositivos hídricos da **Figura 28a**.

4.4 SIMULAÇÃO DO ESTÔMATO CONTROLADO POR PG

Foi simulado (**Figura 30**) o circuito estômato (**Figura 10**) sendo controlado pelo dispositivo hídrico Pg (**Figura 29**) e por uma fonte de tensão contínua que representa a pressão de turgescência da célula epidérmica constante (Pe), conforme (**Tabela 2 c**).

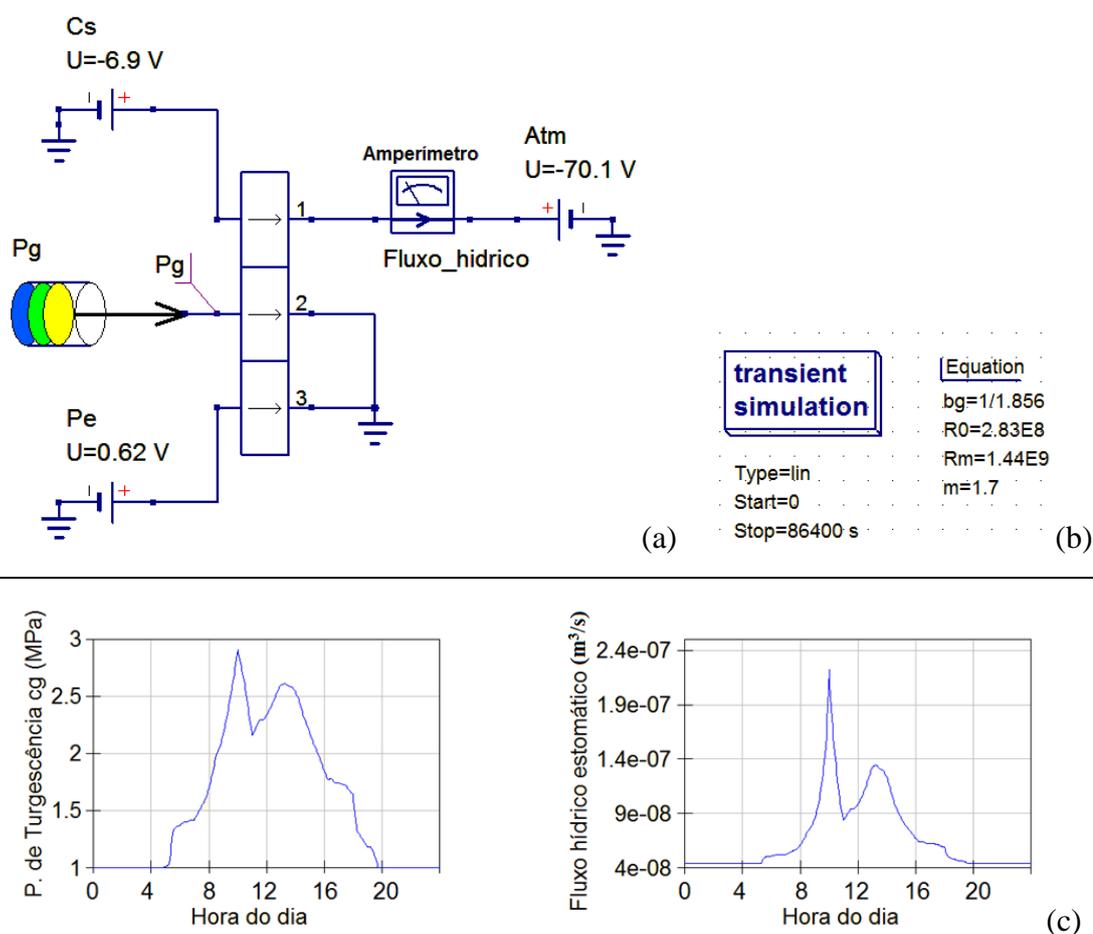


Figura 30 – Simulação circuito estômato + dispositivo Pg. (a) Simulação do circuito estômato controlado pelo dispositivo hídrico Pg e Pe. (b) Constantes utilizadas na equação (14) que regem a abertura estomática do circuito estômato. (c) Gráficos da pressão de turgescência e do fluxo hídrico estomático ao longo do dia.

A fonte Atm que representa o poder evaporativo da atmosfera e a fonte Cs que representa o potencial hídrico da câmara subestomática tem valores pré-fixados de tal forma que quem controla o fluxo hídrico é o circuito estômato por meio do dispositivo hídrico Pg, conforme **Figura 30 a**.

A **Figura 30 c** evidencia a dependência do fluxo hídrico em função da pressão de turgescência gerada pelo dispositivo hídrico Pg. Assim, quanto maior a pressão de turgescência da célula guarda, maior a abertura estomática e maior o fluxo hídrico e vice-e-versa, conforme Franks et al. (1995, 1998, 2001) e Buckley (2005).

4.5 MAPA CONCEITUAL - POSSIBILIDADES

Na perspectiva da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), em geral a aprendizagem se dá a partir dos conceitos, ideias e proposições mais gerais para os mais específicos (Paulo et al., 2007). Segundo essa teoria, são considerados 3 princípios facilitadores para que a aprendizagem ocorra de maneira significativa: o professor deve partir daquilo que o aluno já sabe, ou seja, considera-se que o aluno tem conhecimentos prévios, que são acionados servindo de âncora para a assimilação, compreensão e aprendizagem de novos conceitos ou ideias, o que ocorre inevitavelmente como se a estrutura cognitiva fosse acionada no sentido de fornecer conceitos já construídos a respeito da temática em questão. Assim, torna-se mister que o professor parta daquilo que o aluno já sabe (subsunçor) e ensine de acordo. O segundo princípio facilitador diz respeito ao material didático que deve ser potencialmente significativo, isso quer dizer que deve apresentar um sentido lógico de conteúdos, adequados ao estágio de aprendizagem do aluno de maneira tal que o aluno possa atribuir um sentido psicológico compreendendo a abordagem do material. Finalmente, o aluno deve desejar aprender de maneira não literal e arbitrária. O que quer dizer que ele não deve primar pela memorização literal do tema em estudo, o oposto disso, que é o desejável, é que o aluno perceba como relevante os novos conceitos e ideias que lhes são apresentados e aprenda de forma significativa.

Ainda outros aspectos não menos importantes no processo de ensino e aprendizagem da perspectiva da TAS, que a sua dinamicidade processual, ou seja, a aprendizagem significativa requer diferenciação progressiva dos conceitos partindo-se de uma abordagem mais geral para abordagens mais específicas, ou seja, o 1º conceito a ser apresentado ao aprendiz deve ser o mais abarcador possível, a partir

daí devem ser introduzidos os conceitos intermediários até os mais específicos. Contudo, na medida em que as especificidades vão sendo introduzidas faz-se necessário o retorno constante aos conceitos mais gerais (reconciliação integrativa) como que para situar as partes dentro do todo e a influência do todo nas partes.

Um recurso de grande auxílio na perspectiva da TAS é o mapa conceitual. Podendo ser utilizado pelo professor para dar uma visão geral de uma aula, no início ou no final, ou para ajudar o aluno a fazer a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa (Moreira, 2006). Assim, foi elaborado um mapa conceitual contendo todo o processo envolvendo o movimento estomático conforme **Figura 31**.

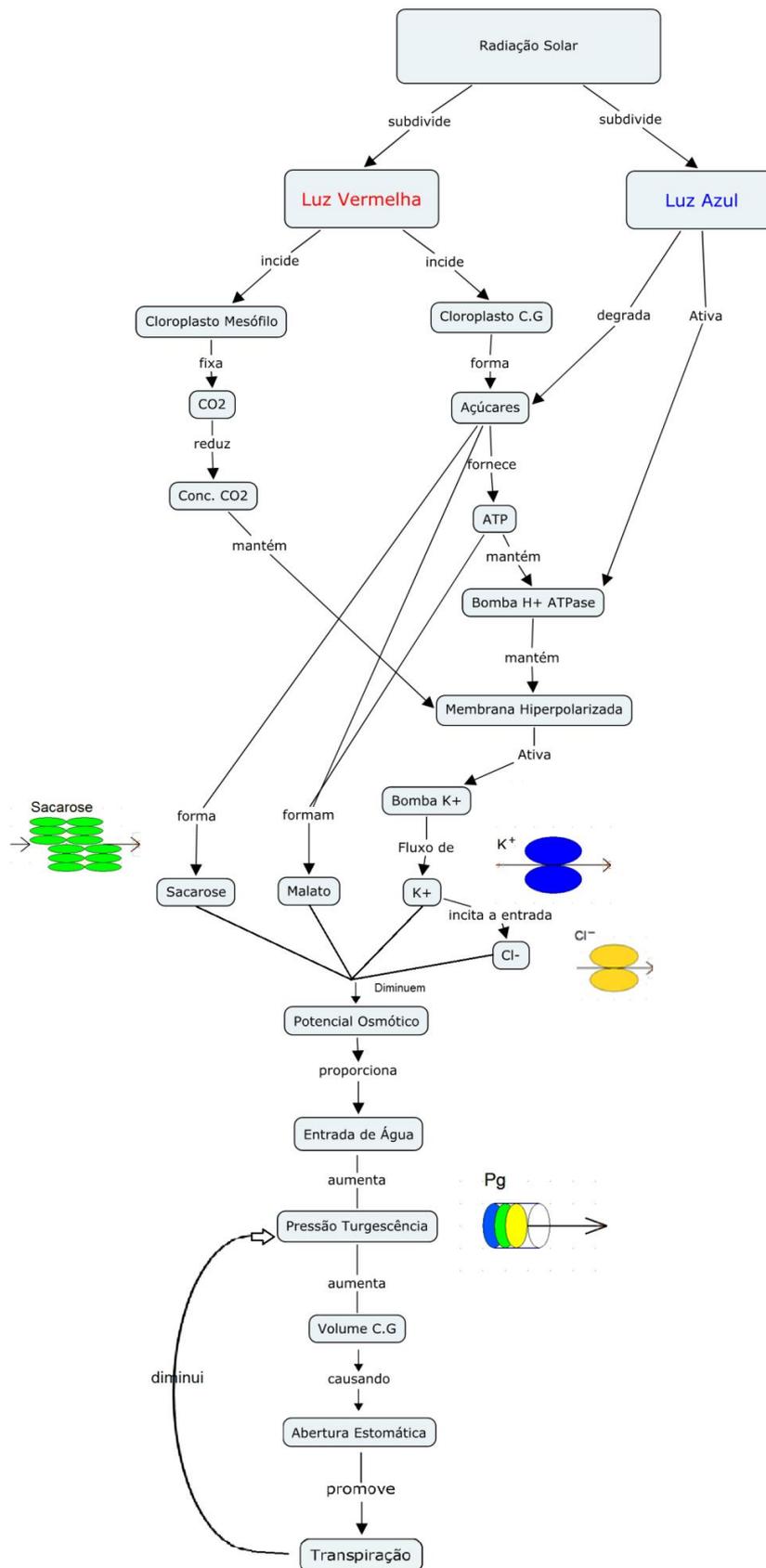


Figura 31 – Mapa conceitual da representação esquemática hierárquica do movimento estomático, baseado-se nos modelos científicos da fisiologia. Elaborado no software cmapstools.

Há temas abordados ao longo do ensino médio que quase como uma obrigatoriedade são recorrentes em livros didáticos utilizados nas escolas, tais como: Ordem de Grandeza e Potência de Base 10, Equação de Estado de um Gás Ideal, conceito de Quantum e Efeito Fotoelétrico. Os conceitos e fenômenos tratados nessa pesquisa emergem da base conceitual acima citada podendo se transformar em tema facilitador para inserção desses conceitos físicos. Assim, o análogo elétrico desenvolvido neste trabalho se encaixa em parte da estrutura do movimento estomático, podendo ser oferecido como parte da ementa das três séries do ensino médio, conforme **Tabela 5**.

Tabela 5 – Conteúdo básico e análogo elétrico. O análogo elétrico desenvolvido neste trabalho pode ser oferecido concomitantemente com os tópicos básicos da Física abrangendo as três séries do ensino médio.

Série	Conteúdo básico	Análogo Elétrico
1º Ano E.M.	Ordem de Grandeza, Pot. de base 10	Ab. estomática e volume da célula guarda
2º Ano E.M.	Equação de Estado de um Gás Ideal	Potencial osmótico e pressão de turgesc.
3º Ano E.M.	Espectro Eletromagnético Efeito Fotoelétrico	Hiperpolarização da membrana plasmática

Portanto, é possível que o modelo científico e conceitual do análogo elétrico da pressão de turgescência seja oferecido ao longo das séries do ensino médio, pois segundo Chevallard (1991), um saber científico pode sofrer transformações que o simplifiquem a fim de convertê-lo em objeto de estudo escolar, sem perder o foco do conteúdo.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho avançou-se na modelagem dos estômatos com a introdução de séries históricas de parâmetros fisiológicos.

Os dispositivos hídricos, em ambiente QUCS, foram implementados com sucesso e permitiram a simulação da pressão de turgescência estomática e do circuito estômato.

No atual estágio do desenvolvimento do modelo, encontrou-se limitações para sua parametrização, em função do uso de estimativas das variáveis, a partir de dados da literatura. Observa-se, no entanto, que os resultados das simulações estão em concordância com a literatura sobre fisiologia.

A modelagem integrada do movimento estomático está longe de ser conclusiva. Como perspectiva de trabalho futuro, a complexa dinâmica estomática impõe o desenvolvimento de análogo elétrico da osmorregulação em células epidérmicas de modo a se tratar adequadamente o que os fisiologistas chamam de vantagem mecânica da epiderme.

Outra simulação importante (em andamento) se dá com a introdução do dispositivo hídrico P_g no circuito com todos os módulos do SPA desenvolvidos por Gaio (2011), de modo a se observar como as variações do fluxo hídrico no estômato serão “transmitidas” para o restante da planta.

Deseja-se também, em um trabalho futuro, substituir os arquivos baseados em equações, das concentrações de solutos, por células fotoelétricas que permitam “injetar” a radiação solar responsável pela osmorregulação.

Sob o ponto de vista da utilização deste modelo como tema facilitador de um estudo científico no ensino médio, está em planejamento a aplicação na Escola Estadual Dr. Estevão Alves Corrêa, para os próximos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSMANN, S.M. et al. Blue light activates electrogenic ion pumping in guard cell protoplasts of *Vicia faba*. **Nature**, vol. 318, pp 285 – 287, 1985.

BRASIL. Lei N° 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília - Seção 1 - 28/4/1999, Página 1.

BRASIL. MEC. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN +). Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acessado em 03/05/2012.

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

CHEVALLARD, Y. La Transposition Didactique. Grenoble: La Pensée sauvage, 1991.

DA COSTA, A. R. As Relações Hídricas das Plantas Vasculares. Disponível em <http://www.angelfire.com/ar3/alexcosta0/RelHid/RhwIndice.htm>. Acessado em 15/02/2011.

FISIOLOGIA DOS ESTÔMATOS..., p.3. Disponível em <http://www.ciagri.usp.br/~lazaropp/FisioVegGrad/RelacoesHidricasII.html>. Acessado em 05/12/2011

FRANKS, P.J. et al. Guard cell pressure/aperture characteristics measured with the pressure probe. **Plant, Cell and Environment**, vol. 18, pp 795–800, 1995.

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

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

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.

GOH, C.H., et al., Parallel recordings of photosynthetic electron transport and K⁺-channel activity in single guard cells. **Plant Journal**, vol. 32, pp 623 – 630, 2002.

GOMES, A. G.; VARRIALE, M. C., **Modelagem de Ecosystemas: Uma Introdução**.RS. Santa Maria: Ed da UFSM. 2001. 503pp.

IINO, M. et al., Kinetic properties of the blue-light response of stomata. **Botany**, vol. 82, pp 8019-8023, 1985.

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

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.

MOREIRA, M. A. **A Teoria da Aprendizagem Significativa e sua implementação em sala de aula**. Brasília, Editora da UNB, 2006, 186p.

MOREIRA, M.A. **Modelos Mentais**. Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, 1997, pp 193 – 206.

NELSON, D. L. & COX, M. M. **Lehninger, Princípios de Bioquímica**. 3ª edição, São Paulo, Artmed, 2002.

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

NORMAN, D.A. **Some observations on mental models**. In Gentner, D. & Stevens, A.L. *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1983.

OLSEN, R.L et al. 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.

PAULO, I. J. C. ; MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa crítica como um caminho para desenvolver valores no aprendiz. *Indivisa, Boletín de Estudios e Investigación*, v. 8, p. 227-238, 2007

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.

SHIMAZAKI, K. et al. Light Regulation of Stomatal Movement. **Plant Biology**, vol. 58, pp. 219 – 247, 2007.

SHOPE, J. C. et al. Changes in Surface Area of Intact Guard Cells Are Correlated with Membrane Internalization. **Plant Physiology**, vol. 133, pp 1314 – 1321, 2003.

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

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

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

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

VIEIRA, E.L. et al. **Manual de Fisiologia Vegetal**. 2010. São Luís: EDUFMA, 2010. 230p.

WEYERS, J.D.B. e H. MEIDNER “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.

APÊNDICE

Para estimar o volume médio (equação 14) do estômato da *Vicia faba* (V_e) variando ao longo do dia, foi necessário estimar a média da abertura estomática ao longo do dia referentes aos três solutos (potássio, sacarose e cloro). Foi feita média aritmética entre abertura (K^+ , Sac e Cl^-). Valores iguais a zero para abertura foram desconsiderados na média.

Hora do dia	Abertura (K^+)	Abertura (Sac)	Abertura (Cl^-)	média Abertura	Vol. médio
5	1.26	0	0	1.26	3.5
5.25	1.5	0	0	1.5	3.53
5.5	1.74	1.8	2.96	2.17	3.61
5.75	1.95	2.17	2.96	2.36	3.64
6	2.15	2.49	2.99	2.54	3.66
6.25	2.05	2.79	2.99	2.61	3.67
6.5	1.98	3	2.96	2.65	3.67
6.75	1.88	3.11	3.42	2.8	3.69
7	1.91	3.25	4.5	3.22	3.75
7.25	2.5	3.37	5.35	3.74	3.81
7.5	3.21	3.54	6.26	4.34	3.89
7.75	3.9	3.78	6.72	4.8	3.95
8	4.62	4.14	7.2	5.32	4.02
8.25	5.51	5.88	7.47	6.29	4.14
8.5	6.4	7.61	7.72	7.24	4.27
8.75	7.32	7.24	8.75	7.77	4.33
9	8.11	6.9	9.78	8.26	4.4
9.25	8.59	8.2	10.77	9.19	4.52
9.5	9	9.63	11.74	10.12	4.64
9.75	9.52	10.9	11.29	10.57	4.7
10	9.89	12.07	10.74	10.9	4.74
10.25	9.1	11.45	10.15	10.23	4.65
10.5	8.32	10.6	9.71	9.54	4.56
10.75	7.5	10.02	10.38	9.3	4.53
11	6.91	9.39	11.12	9.14	4.51
11.25	7.91	9.67	11.83	9.8	4.6
11.5	8.97	9.95	12.74	10.55	4.69
11.75	10	10.17	13.09	11.09	4.76
12	10.89	10.52	13.3	11.57	4.82
12.25	11.47	11.14	13.55	12.05	4.89
12.5	12.05	11.72	13.8	12.52	4.95
12.75	12.6	12.29	13.43	12.77	4.98

13	13.01	12.7	12.95	12.89	5
13.25	12.84	11.34	12.56	12.25	4.91
13.5	12.7	10	12.05	11.58	4.83
13.75	12.56	8.97	11.67	11.07	4.76
14	12.39	7.95	11.25	10.53	4.69
14.25	12.02	6.6	11.55	10.06	4.63
14.5	11.64	5.15	11.87	9.55	4.56
14.75	11.3	3.88	12.22	9.13	4.51
15	10.92	2.57	12.65	8.71	4.46
15.25	10.27	2.53	12.98	8.59	4.44
15.5	9.62	2.5	13.37	8.5	4.43
15.75	9	2.43	12.91	8.11	4.38
16	8.28	2.39	12.37	7.68	4.32
16.25	7.63	2.39	11.97	7.33	4.28
16.5	7.02	2.39	11.58	7	4.24
16.75	6.6	2.43	11.12	6.72	4.2
17	6.16	2.4	10.61	6.39	4.16
17.25	5.71	2.54	9.73	5.99	4.11
17.5	5.23	2.61	8.9	5.58	4.05
17.75	4.82	2.72	8.09	5.21	4
18	4.38	2.75	7.3	4.81	3.95
18.25	4.24	0	6.61	5.43	4.03
18.5	4.14	0	5.94	5.04	3.98
18.75	4	0	5.73	4.87	3.96
19	3.86	0	5.48	4.67	3.93
19.25	3.73	0	5.2	4.47	3.91
19.5	3.63	0	5	4.31	3.89
