

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAR
O POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR

SAULO DA SILVA BERILLI

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE

DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2017

DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAR
O POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR

SAULO DA SILVA BERILLI

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal”

Orientador: Prof. Elias Fernandes de Sousa

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCH / UENF**

065/2017

B511 Berilli, Saulo da Silva.

Desenvolvimento de instrumentação para monitorar o potencial hídrico foliar / Saulo da Silva Berilli – Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.

70 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2017.

Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

Bibliografia: f. 52 - 57.

1. Manejo de Irrigação. 2. Instrumentação Agrícola. 3. Câmara de Pressão. 4. Potencial Hídrico Foliar. 5. Bomba de Scholander. 6. Sensor de Fluxo de Seiva. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

631.587

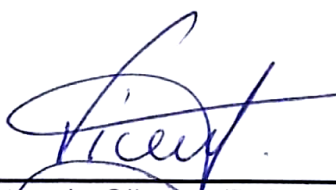
DESENVOLVIMENTO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAR O POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR

SAULO DA SILVA BERILLI

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal

Aprovada em 12 de abril de 2017

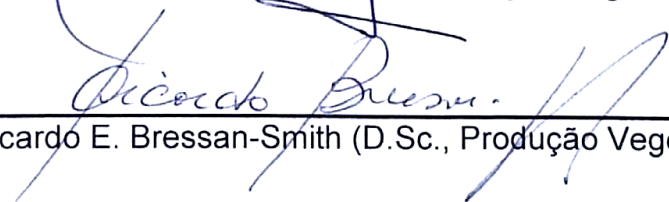
Comissão Examinadora



Prof. Vicente de Paulo Santos de Oliveira (D.Sc., Engenharia Agrícola) – IFF



Prof. Eliemar Campostrini (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF



Prof. Ricardo E. Bressan-Smith (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF



Prof. Elias Fernandes de Sousa (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF
(Orientador)

A Deus.

Aos meus pais...

À minha querida “Cidade Menina”, Muqui-ES.

AGRADECIMENTO

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darci Ribeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e ao Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) e ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), pela oportunidade de realização deste curso;

Agradeço a Deus, à minha família, em especial ao meu pai, prof Olinto Berilli, à minha mãe prof Gesy da Silva Berilli, à minha irmã Sonisa Berilli Batista, ao meu irmão Sávio da Silva Berilli e à minha cunhada Ana Paula Candido Gabriel Berilli;

À minha querida namorada, Luzamir de Oliveira Andrade e aos meus amigos prof. Carlos Cezar de Oliveira Bettero, prof Elias Dantas, prof Carlos Eduardo Gomes Ribeiro, Hudson Thiago da Silva, Diego Albani Furlan, José Altino Machado Filho, Karina de Jesus Soares, Rodolfo Arthur de Souza Lima, Tales Neri Borsoi, Bruna Corrêa da Silva de Jesus, Lídia dos Santos Pessanha, Weverton Pereira Rodrigues, Wallace Bernardo, Mário Sérgio Paiva de Araújo, e tantos outros que me apoiaram, colaboraram e que estiveram presentes, especialmente nos momentos mais decisivos. Sem dúvidas, a ajuda de vocês foi primordial e imprescindível para a realização desse projeto.

Meus sinceros agradecimentos aos empresários, Robson Jerônimo de Castro, Leonardo Lopes Armani e Sérgio Laquine, pelo pronto atendimento às minhas demandas técnicas extraordinárias;

Agradeço muito ao meu orientador, Prof. Elias Fernandes de Sousa, que me acolheu diante da proposta desafiadora de coordenar um projeto multidisciplinar e compartilhou parte do seu rico conhecimento e experiência;

De forma também especial, agradeço aos professores, Ricardo Henrique Bressan-Smith, Eliemar Campostrini e Vicente de Paulo Santos de Oliveira, por toda especial contribuição de cada um.

SUMÁRIO

Resumo	vii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Conceitos.....	3
2.2. Instrumentação baseada nas propriedades do solo.....	5
2.2.1 Sensores Volumétricos.....	6
2.2.2 Sensores Tensiométricos.....	7
2.2.2.1 Tensiômetro de punção com tensímetro.....	7
2.2.2.2 Sensores de dissipação do calor.....	8
2.2.2.3 Blocos de resistência elétrica.....	8
2.3 Sensores utilizados para determinação das propriedades da planta.....	9
2.3.1 Sensores de Fluxo de Seiva.....	9
2.3.2 Câmara de Scholander.....	10
2.3.3 Sensores de Temperatura da Folha.....	13
2.3.4 Sensor de Pressão de Turgescência Foliar (Sonda ZIM).....	14
2.3.5 Dendrômetro de precisão.....	15
2.3.6 Psicrômetro de Termopar.....	16
2.4 Sensores utilizados para determinação das propriedades do clima.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Estratégia Experimental.....	19

3.2 Medição do Potencial Hídrico Foliar – 1ª Etapa: folha destacada.....	22
3.2.1 Sensor de Fluxo de Seiva.....	22
3.2.2 Primeira etapa de medições do potencial hídrico foliar.....	26
3.3. Medição do Potencial Hídrico Foliar – 2ª Etapa: folha intacta.....	27
3.3.1 Câmara de Pressurização “ <i>in vivo</i> ” (CPIV) e sua fabricação.....	28
3.3.2 Segunda etapa de medições do potencial hídrico foliar.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 Medição do Potencial Hídrico Foliar – 1ª Etapa: folha destacada.....	33
4.2 Medição do Potencial Hídrico Foliar – 2ª Etapa: folha intacta e folha destacada	38
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	50
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

RESUMO

BERILLI, Saulo da Silva, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Abril de 2017. Desenvolvimento de instrumentação para monitorar o potencial hídrico foliar. Orientador: Prof. Elias Fernandes de Sousa.

Devido à escassez da água e à sua importância para proporcionar qualidade e produtividade na agricultura, as técnicas para o manejo de irrigação são fundamentais para garantir o uso racional e eficiente da água. O potencial hídrico foliar é um importante indicador da condição de estresse hídrico das plantas, sendo que o método mais difundido para obtenção dessa grandeza utiliza a câmara de pressão de Scholander, caracterizada por ser de monitoramento descontínuo (malha aberta), destrutivo, totalmente manual e muito trabalhoso para se executar. Este trabalho teve por objetivo construir uma câmara de pressão que associada a dispositivos e sensores eletrônicos monitorasse o potencial hídrico foliar, sem que houvesse a necessidade de se destacar folhas ou ramos da planta, denominada Câmara de Pressurização *In Vivo*, CPIV. A câmara foi construída em aço carbono, vedada com anéis de borracha, pressurizada por meio de cilindro de gás nitrogênio. Para a construção do sensor de fluxo de seiva utilizou-se termopares e resistores elétricos. Os sinais dos sensores foram registrados automaticamente por dispositivo eletrônico microprocessado. As avaliações foram realizadas em folhas de videiras da variedade Niágara Rosada (*Vitis labrusca* L.) enxertadas sobre porta-enxerto IAC 572 plantadas em abril de 2013 e das variedades Cabernet Sauvignon e Chardonnay, cultivadas em vasos com capacidade inicialmente de 16l transplantadas posteriormente para vasos de

25l de solo, conduzido no sistema de espaldeira e irrigado por gotejamento, em casa de vegetação. As medições foram comparadas com o método da câmara de Scholander para validação dos resultados e as avaliações foram divididas em duas etapas. A primeira etapa com a folha destacada e a segunda etapa, cujas medições foram feitas tanto com a folha destacada quanto com a folha intacta. Na primeira etapa, os resultados dos testes com a folha destacada não diferiram estatisticamente do método de referência. Tal resultado sugere que seja possível automatizar a medição do potencial hídrico foliar feito com câmaras de pressão pelo método de Scholander (folha destacada). Na segunda etapa, todos os resultados dos testes com a folha intacta feitos pelo método proposto, foram próximos de zero independentemente do potencial obtido pelo método de referência, revelando que a utilização da CPIV nessa condição não mediu o potencial hídrico foliar, mas sim a diferença entre os potenciais da folha e da planta, que foram próximos de zero.

Palavras-chave: manejo de irrigação, sensor de fluxo de seiva, câmara de pressão, bomba de Scholander.

ABSTRACT

BERILLI, Saulo da Silva, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. April, 2017. Development of instrumentation to monitor water leaf potential. Advisor: Prof. Elias Fernandes de Sousa.

Due to water scarcity and its importance to provide quality and productivity in agriculture, techniques for irrigation management are fundamental to efficient use of water. The Leaf water potential is an important indicator of the water stress condition of plants, being that usual method to obtain this variable Scholander pressure chamber, characterized by being discontinuous monitoring (open mesh), destructive, totally manual and difficult to execute. The objective of this work was to construct a pressure chamber that associated with electronic devices and sensors monitored the leaf water potential, without the need to stand out leaves or branches of the plant, In Vivo Pressurization Chamber (CPIV). The chamber was constructed of carbon steel, sealed with rubber rings, pressurized by means of nitrogen gas cylinder. For the construction of the sap flow sensor was used thermocouples and electrical resistors. The sensor signals were automatically recorded by microprocessed electronic device. The evaluations were carried out on leaves of grapevines of the variable 'Niagara Rosada' (*Vitis labrusca* L.), grafted on IAC 572 planted in April 2013 and of the varieties Cabernet Sauvignon and Chardonnay, cultivated in pots with initial capacity of 16l and later 25l of soil, conducted in the system of espaldeira and irrigated by drip, in greenhouse. Measurements were compared with the Scholander chamber method for validation of the results, and the evaluations were divided into two stages. The first stage

with the detached leaf and the second stage, which measurements were taken with both, the detached leaf and the intact leaf. In the first stage, the results from the detached leaf tests did not differ statistically from the reference method. This result suggests that it is possible to automate the measurement of leaf water potential made with pressure chambers by the Scholander method (detached leaf). In the second stage, all the results of the intact leaf tests performed by the proposed method were close to zero regardless of the potential obtained by the reference method, showing that the use of CPIV in this condition did not measure leaf water potential, but the difference between leaf and plant potentials, which was close to zero.

The first stage with the leaf disconnected, the results did not differ significantly from the reference method, this result suggests that it is possible to automate the measurement of leaf water potential made with chambers. In the second stage, the measurements were made with the leaf not disconnected and presented significant differences in comparison to the reference method, revealing that the use of CPIV when the leaf is connected measures the difference between the potentials of the leaf with the closed stomata and the plant, which is close to zero.

Key-word: irrigation management, sap flow sensor, pressure chamber, Scholander's bomb.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural renovável presente na constituição de todos os organismos vivos e amplamente utilizada na agricultura, proporcionando qualidade e produtividade à atividade. Diante da escassez e importância desse recurso, as técnicas para o manejo de irrigação, que consistem em determinar o momento e a quantidade de água adequada a ser aplicada artificialmente em uma determinada cultura são fundamentais para garantir o seu uso racional e eficiente. As plantas possuem demandas hídricas diferentes em função da espécie e do estágio de desenvolvimento e, quando submetidas a altos níveis de estresse hídrico podem sofrer danos irreversíveis, o que significa dizer que se uma cultura atingir níveis críticos de déficit hídrico, não adianta tentar compensar aumentando o volume de água irrigada posteriormente, pois a cultura não irá responder com aumento da produtividade havendo desperdício da água aplicada e da energia.

Atualmente, o manejo de irrigação pode ser baseado em informações obtidas da atmosfera, como é o método baseado na evapotranspiração de referência (ET_o) proposto pela FAO, da planta e do solo, ou uma combinação desses (Létourneau et al., 2015). Este trabalho vai tratar de métodos que levam em consideração o potencial hídrico foliar das plantas, que ainda encontra-se em fase de desenvolvimento e consolidação. Estudos indicam que tais métodos podem apresentar resultados positivos significantes se utilizados de forma complementar ao da FAO.

Este trabalho teve por objetivo construir uma câmara de pressão que associada a dispositivos e sensores eletrônicos monitorasse o potencial hídrico

foliar, sem que houvesse a necessidade de se destacar folhas ou ramos da planta. Para tanto, os objetivos específicos foram: a) construir uma câmara de pressão que permita aplicar até 4,0 MPa de pressão e a inserção de um pecíolo de folha intacta ou destacada de videira com diâmetro de cerca de 4,0mm com o mínimo de vazamento e mínimo de estrangulamento dos vasos xilemáticos; b) construir um sensor de fluxo de seiva adequado para esta aplicação; c) pressurizar uma folha destacada da planta e verificar o efluxo da seiva com um sensor de fluxo de seiva (medição destrutiva); d) pressurizar uma folha não destacada da planta e verificar o efluxo da seiva com um sensor de fluxo de seiva (medição não destrutiva); e) verificar se há detecção do fluxo da seiva nas duas formas de medição, avaliar se a pressão com que houver a detecção do efluxo de seiva da folha confere ou tem correlação com o potencial hídrico foliar, que será medido por meio do método da câmara de pressão de Scholander.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceitos

Antes de falar sobre a instrumentação aplicada ao manejo de irrigação, deve-se entender melhor os conceitos de instrumentação e de manejo de irrigação e potencial hídrico:

Instrumentação: Ciência que aplica e desenvolve técnicas de medição, indicação, registro e controle de processos de fabricação, visando à otimização na eficiência desses processos (Smar, 2011). A instrumentação é indispensável quando se deseja padronizar a qualidade dos produtos, aumentar a produtividade e o rendimento dos processos, bem como obter informações sobre a quantidade da matéria-prima utilizada e o total produzido (Smar, 2011). Historicamente as indústrias são as que mais aplicam a instrumentação (Smar, 2011). No entanto, a agricultura tem buscado usufruir dos benefícios dessa ciência, visto que atualmente diversos sensores e dispositivos foram criados e outros estão sendo desenvolvidos para se obter maiores produtividades agrícolas e a otimização de recursos como a água, os fertilizantes, os defensivos e a mão de obra (Naime et al., 2014). A instrumentação é implementada por meio de sensores, transmissores, conversores, controladores eletrônicos, atuadores eletromecânicos ou pneumáticos, válvulas dentre outros dispositivos, cuja instalação, operação e manutenção, na maioria das vezes, requerem a utilização de mão de obra qualificada (Smar, 2011).

Irrigação: é a aplicação artificial, uniforme e oportuna de água, distribuída pontualmente na zona efetiva das raízes ou na área total, visando repor a água consumida pelas plantas, a perda por evaporação, transpiração e por infiltração profunda de forma a garantir condições ideais ao bom desenvolvimento das plantas (Pereira, 2014).

Manejo de irrigação: em linhas gerais consiste em determinar a quantidade de água e o momento de aplicá-la nas plantações, que varia de acordo com as suas fases de desenvolvimento (estágios fenológicos) (Esteves, 2013, Pereira, 2014).

Portanto, a instrumentação aplicada ao manejo de irrigação está relacionada dentre outros elementos, com os sensores utilizados para medir as grandezas físicas que servirão como base para determinar a dinâmica do processo de irrigação. Ela pode ser baseada nas propriedades do solo, na planta e no clima (Létourneau et al., 2015). As técnicas envolvendo as propriedades do solo e do clima, já se encontram mais consolidadas e amplamente difundidas do que as técnicas baseadas nos sinais das plantas (Esteves 2013, Létourneau et al. 2015), tendo em vista que os sensores desta são muito recentes e estão em fase de desenvolvimento em vários centros de pesquisa em diversos países. Contudo, pesquisadores trabalham constantemente no aprimoramento e inovação dos sensores e técnicas de medição das três categorias de instrumentação (solo, planta e clima/atmosfera) (Létourneau et al. 2015, Jones 2004).

Potencial hídrico: Índice que mede a energia livre da água por unidade de volume e é igual ao potencial químico da água dividido pelo volume molal da água (equação 1), sendo que a energia livre representa o potencial da água para realizar o trabalho.

$$\text{Potencial hídrico} = \Psi_w = \frac{\Psi_{\text{químico}}}{V_{\text{molal da água}}} \quad \text{eq.1}$$

Unidade: Joule/mol = N/m² = Pascal [Pa]

Conforme já apresentado por Boyer, (1967) o potencial hídrico total em tecidos vegetais, Ψ_w , pode ser descrito pela equação 2:

$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_s + \Psi_m, \quad \text{eq.2}$$

Desde que o sistema esteja em equilíbrio e com temperatura constante, onde os termos p , g , s e m correspondem respectivamente aos efeitos da pressão, da gravidade, dos solutos e da matriz no potencial hídrico total (J. S. Boyer, 1967).

Outro ponto importante é que a água sempre flui do maior para o menor potencial hídrico **total** (Hsiao, 2004). Segundo Hsiao (2004), plantas terrestres normalmente apresentam potenciais hídricos negativos, como, por exemplo, o caso do potencial hídrico foliar que em muitas plantas durante o dia, pode ser em torno de -0,6MPa sob condições favoráveis e, sob condições de restrição hídrica severa (ponto de murcha), pode alcançar níveis de -1,8MPa. Os componentes do potencial hídrico que são relevantes em uma célula vegetal são os potenciais osmótico e de pressão e podem ser expressos pela equação 3 (Jones, 2013, Costa, 2001).

$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s \quad \text{eq.3}$$

O potencial hídrico foliar é um importante indicador da condição de estresse hídrico das plantas e é amplamente utilizado em pesquisas voltadas para a melhor compreensão das relações hídricas das plantas (Ding et al., 2014), bem como no manejo de irrigação, onde existe uma tendência atual para a adoção da irrigação com déficit hídrico controlado. Muito importante e, frequentemente, ignorado, as leituras da câmara de pressão não produzem valores absolutos, mas sim relativos da pressão do xilema ou do potencial hídrico foliar (Rüger et al., 2010).

2.2 Instrumentação baseada nas propriedades do solo

Dos diversos fatores que influenciam a produção agrícola, a água é o mais importante. E, atualmente, as técnicas mais aplicadas para definir quando e o quanto irrigar utilizam instrumentação que monitoram as propriedades do solo que estão diretamente relacionadas com a quantidade de água contida nele ou com a energia necessária para extraí-la. As grandezas monitoradas no solo utilizadas para o manejo de irrigação podem ser o teor de água no solo, tensão

(pressão) de água no solo e/ou uma combinação dos dois, juntamente com a curva de retenção de água no solo (Marouelli et al., 2011).

A calibração é indispensável para todos os sensores de determinação indireta da umidade do solo, incluindo aqueles tecnologicamente mais sofisticados e de mais alto custo, o que aumenta a complexidade da sua aplicação.

Segundo Jones (2004), as principais dificuldades para utilização dos sensores de sinais no solo são: a) a heterogeneidade do solo, o que exige a amostragem ou instalação de sensores em vários locais da área; b) selecionar o local próximo da planta e a profundidade de instalação que represente a zona radicular de forma efetiva; c) a maioria dos sensores mede teor de água indiretamente e necessitam de calibração.

Os sensores que medem a quantidade de água por volume de solo são classificados como sensores volumétricos e os sensores que medem tensão de água no solo são chamados de sensores tensiométricos.

2.2.1 Sensores Volumétricos:

Existe uma grande variedade de sensores voltados para o manejo de irrigação. Dentre eles, podem ser citados os sensores dielétricos, que utilizam a tecnologia de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e de capacitância – também referenciados como reflectometria no domínio da frequência (FDR). Os sensores do tipo TDR estimam a umidade do solo a partir da medição direta da constante dielétrica do solo, que varia com a quantidade de água no solo. Os sensores capacitivos (ou FDR) usam diferentes tipos de osciladores eletrônicos, que produzem uma frequência de onda ressonante capaz de detectar variações nas propriedades dielétricas e, por conseguinte, no conteúdo de água no solo Andrade et al., 2008; Evett, 2007). TDR's são os mais precisos, porém de maior custo, o que tem inviabilizado seu uso para manejo em áreas de produção comercial, exceto para grandes áreas de produção de espécies de alto valor econômico. No caso dos sensores do tipo capacitivo ou FDR, a precisão e o custo de aquisição são menores aos do TDR, mas ainda fora da realidade econômica dos agricultores em geral, especialmente no Brasil (Marouelli et al., 2011).

A Sonda de Nêutrons, que aplica a técnica da moderação de nêutrons, pode ser utilizada para a determinação do teor de água no solo. Trata-se de uma

técnica com boa precisão e medidas rápidas e fácil manejo. Não é recomendado para solos com elevado teor de matéria orgânica e por ter alto custo e por se tratar de um equipamento radioativo, com risco para o ambiente e para a saúde do operador, é indicado apenas para fins de pesquisa (Marouelli et al., 2011, Bacchi et al., 2000)

A calibração é indispensável para todos os sensores de determinação indireta da umidade do solo, incluindo aqueles tecnologicamente mais sofisticados e de mais alto custo, o que aumenta a complexidade da aplicação desses tipos de sensores. (Marouelli et al., 2011).

2.2.2 Sensores Tensiométricos

Os tensiômetros e os blocos de resistência têm se destacado na medição da tensão de água no solo e sido utilizados para fins de manejo de água por agricultores em muitos países (Evelt, 2007; Heermann et al., 1990; Sanders, 1997). No Brasil, o sistema Irrigas® tem sido utilizado por vários produtores de hortaliças, flores e mudas de fruteiras e espécies florestais (Calb0 e Silva, 2006; Marouelli et al., 2011).

A importância do método tensiométrico é relatada por Allen et al. (1998) e Evelt (2007), que afirmam que a taxa de extração de água do solo pelas raízes da planta é influenciada mais diretamente pela tensão de água no solo e sua condutividade hidráulica associada do que pelo teor de água abaixo da superfície.

A seguir estão relacionados alguns dos sensores tensiométricos :

2.2.2.1 Tensiômetro de punção com tensímetro

Segundo Bassoi e Nascimento (2012), o tensiômetro é um equipamento cuja função é medir a força com que a água é retida no solo, caracterizada como potencial matricial da água no solo. O tensiômetro de punção é constituído por um tubo de PVC, cujo comprimento varia em função da profundidade do solo que se deseja instalá-lo, ao qual é conectada uma cápsula porosa em uma extremidade e um tubo de acrílico na outra extremidade. O tensímetro é resumidamente uma célula de carga com uma agulha e um mostrador para a leitura da medida realizada.

Basso e Nascimento (2012) afirmam também que é possível determinar a umidade do solo a partir da leitura do tensímetro juntamente com informações da curva de retenção de água no solo e que essa informação pode ser utilizada para o cálculo da lâmina e do tempo de irrigação.

2.2.2.2 Sensores de dissipação do calor

São sensores que possuem uma fonte de calor, normalmente uma resistência elétrica, bem como um sensor de temperatura afastado a uma determinada distância da fonte de calor ambos embutidos dentro de um meio poroso como uma cápsula de gesso, por exemplo. Os sensores de calor funcionam pelo princípio de que a condução de calor no meio poroso é fortemente influenciada pela presença de água nos poros desse meio e que a umidade do solo tende a um equilíbrio com o meio poroso depois de certo tempo. Dessa forma, é possível calibrar o sensor estabelecendo uma correlação entre a variação da temperatura lida e o potencial matricial da água do solo. Oliveira (1999) fez experimento com sensores de dissipação de calor de cápsulas de gesso e concluiu que os sensores estudados apresentaram modificações na sua porosidade e dimensões com o tempo de uso e que o tempo de resposta do sensor à secagem é um pouco superior a 24 horas.

2.2.2.3 Blocos de resistência elétrica

A tensão de água no solo também pode ser relacionada com a resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos em um sensor (bloco). Esses sensores são chamados de sensores do tipo bloco de resistência elétrica e podem ser encontrados em dois tipos básicos: dos blocos de gesso e os do tipo matricial granular. O primeiro tipo é feito com uma liga a base de gesso, enquanto o matricial, por camadas de materiais granulares, gesso, tecido e/ou tela metálica (Evet, 2007; Pereira et al., 2006). Os poros permitem que a água entre ou saia do sensor, à medida que o solo umedece ou seca, de acordo com a tensão de água no solo. Assim, quanto menor a tensão de água no solo, mais úmido estará o sensor e mais facilmente a corrente elétrica fluirá entre os eletrodos dentro do sensor.

As principais desvantagens dos blocos de resistência elétrica são: requerem calibração para cada tipo de solo; pode existir grande variabilidade entre sensores; podem ser afetados pela temperatura e concentração de sais na solução do solo; apresentam problema de histerese (variação de leitura durante os processos de umedecimento e secamento).

Outro aspecto importante é que os blocos de gesso geralmente atuam na faixa de tensão entre 150 kPa e 600 kPa, e do tipo matricial granular, na faixa de 10 kPa a 200 kPa (Evet, 2007; Marouelli et al. 2011).

2.3 Sensores utilizados para determinação das propriedades da planta

Os indicadores com base nos sinais da planta permitem apenas determinar o momento de irrigar, entretanto aqueles com base nos sinais da atmosfera possibilitam estimar somente a quantidade de água que deve ser aplicada em cada evento de irrigação (Marouelli et al., 2011).

Marouelli et al. (2011) também citam que a planta integra os efeitos das condições ambientais (solo e atmosfera) e, por isso seria apropriado avaliar a condição hídrica da própria planta para o manejo de irrigação.

As medições da água pelo *status* hídrico das plantas podem integrar a água disponível no solo e as condições climáticas e, por esse motivo, podem proporcionar uma melhor previsão das respostas das árvores ao estresse hídrico. Dentre os sensores que medem as condições hídricas da planta, os mais utilizados são os baseados: no fluxo de seiva, na variação do diâmetro do tronco (dendrômetros) e no potencial de turgescência da folha. Estes sensores permitem o monitoramento de forma contínua dos dados e em tempo real, bem como a automatização do manejo da irrigação (Esteves, 2013).

2.3.1 Sensores de Fluxo de Seiva

A maioria dos estudos sobre a transpiração das plantas utiliza metodologias de fornecimento de calor ao caule (Burgess e Dawson, 2008; Vellame, 2007; Cermárk et al., 2004), assumindo como premissa que o fluxo de seiva do xilema é capaz de transportar calor e que este fluxo está diretamente relacionado com as trocas gasosas que ocorrem nas folhas com a abertura dos

estômatos (Esteves, 2013). Os sensores para obtenção do fluxo de seiva podem ser separados em três grupos, sendo o primeiro grupo de pulso de calor, que rastreia o movimento de um curto pulso de calor no fluxo de seiva; o segundo grupo de balanço de calor, que mensura o movimento da seiva, pelo transporte de calor, para fora de uma fonte de calor controlada, e o terceiro grupo o de dissipação térmica, que relata a dissipação do calor pelo fluxo de seiva por meio de uma relação empírica (Esteves, 2013).

Pimentel et al. (2010), desenvolveram um sensor de fluxo de seiva adaptado de Granier (1985) para fazer a estimativa da transpiração de cafeeiros utilizando um sensor constituído por duas sondas no formato de agulha contendo um termopar e uma resistência em cada uma. O sinal desse sensor era obtido a partir da diferença de temperatura entre dois termopares, cuja variação era inversamente proporcional ao fluxo de seiva, ou seja, quanto maior o fluxo menor a diferença de temperatura e quanto menor o fluxo, maior a diferença de temperatura entre os termopares. E, na ausência de fluxo de seiva o sinal permanecia constante. Ren et al. (2017) desenvolveram e testaram em laboratório outro sensor de fluxo de seiva também provido de sondas térmicas no formato de agulhas com termopares capaz de fazer medições do fluxo de seiva com significativa redução de erros decorrentes do desalinhamento das sondas no momento da inserção no caule. Em maio de 2017 esse dispositivo teve sua patente concedida nos Estados Unidos com o registro US9638558B2.

Esteves (2013) relata que existem várias questões indefinidas para aplicação dos sensores de sinais das plantas, como, por exemplo: quais os critérios apropriados para escolher uma planta de referência? Quantas plantas podem ser monitoradas por área? Quais índices seriam propícios para a cultura de interesse? Quais os principais fatores responsáveis pelas variações das medidas? E ainda quais são os limites de estresse hídrico em que os valores gerados são confiáveis? Todas estas questões requerem ser observadas e respondidas de forma criteriosa pela pesquisa, a fim de que tais ferramentas promissoras possam ser utilizadas, não apenas em experimentações, mas também, em campo, para o monitoramento apropriado das lavouras comerciais.

2.3.2 Câmara de Scholander

A câmara de pressão de Scholander-Hammel, também chamada de bomba de Scholander, tornou-se amplamente aceita e reconhecida como um instrumento adequado para a medição do potencial hídrico foliar em uma grande variedade de espécies vegetais (Scholander et al., 1965) e atualmente é o instrumento mais utilizado para medição da condição hídrica das plantas (Yang et al., 2016, Ding et al., 2014, Bennett, 2000) e do potencial hídrico dos tecidos por meio da análise da curva de pressão versus volume (PV) (Ding et al., 2014, Bennett, 2000). Segundo Ding et al. (2014), a câmara de pressão tem sido amplamente utilizada em dezenas de milhares de artigos científicos por cientistas de culturas, fisiologistas de plantas e ecologistas.

Este método é consistente para estimar o potencial hídrico (Ψ_w) de tecidos, como folhas ou ramos inteiros, a câmara de Scholander (figura 1A) mede a pressão hidrostática negativa (tensão) que existe no xilema de muitas plantas. Neste caso é assumido que o Ψ_w do xilema é igual ao Ψ_w médio de todo o órgão. Isto é provavelmente válido, pois: 1- em muitos casos o potencial osmótico do xilema é desprezível, assim o principal componente do potencial hídrico no xilema é a pressão hidrostática negativa (tensão) na coluna do xilema; 2 – o xilema está em contato íntimo com a maioria das células do órgão e até mesmo de toda a planta (Adaptado da apostila da UFC, disponível em: http://www.fisiologiavegetal.ufc.br/APOSTILA/RELACOES_HIDRICAS.pdf).

Nesta técnica, o órgão a ser avaliado tem que ser destacado e colocado na câmara, como pode ser visto na figura 1B. Antes do corte, a coluna de água no xilema está sob tensão. Quando a coluna de água é cortada, a água é puxada para dentro dos capilares do xilema. Para fazer a medição, a câmara é pressurizada com gás nitrogênio comprimido até que a água saia pela superfície seccionada. O observador, quando notar o umedecimento da superfície do corte, deve parar a pressurização e anotar a pressão marcada no manômetro ou transdutor noutro transdutor digital de pressão. Este valor de pressão corresponde ao módulo do Ψ_w do órgão.

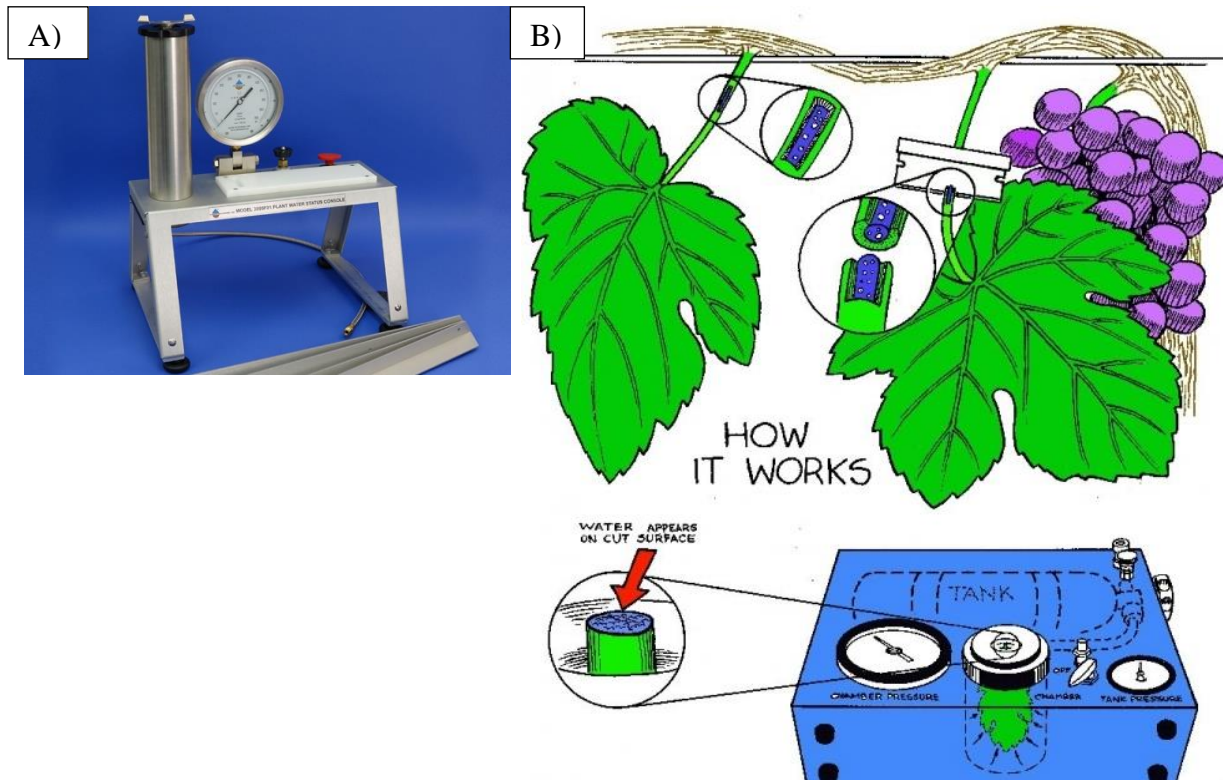


Figura 1: A) Câmara de pressão da Soilmoisture, série PWSC 3000, modelo 3000F01H12G2P40. Nela foram adaptadas a nova câmara CPIV e o transdutor de pressão digital para realizar a 2ª etapa de medições.
B) Esquema do funcionamento da câmara de Scholander para determinação do potencial hídrico foliar da videira.

Fonte: <http://www.pmsinstrument.com/resources/pms-meaning-and-importance>

Pavez et al. (2011) relatam que dentre os parâmetros fisiológicos vegetais pesquisados atualmente como indicadores da condição hídrica da planta, o potencial hídrico xilemático é o parâmetro de maior sensibilidade, o que justifica a importância de utilizar sua estimativa para aplicar no manejo da irrigação. (Naor, 1998; 2000; Choné et al., 2001; Sellés et al., 2002; Williams y Trout, 2005). Entretanto, Pavez et al. (2011) consideram que a câmara de Scholander tradicional é um instrumento difícil de manipular e transportar no campo além de ser perigoso por causa do cilindro de gás utilizado como fonte de pressão externa. Todavia, consideram prático outro modelo de câmara, confiável e menos custoso por ser menor, com sistema de pressurização manual e que dispensa o uso do cilindro de gás externo.

Conforme Hopkins (2000), a determinação do potencial hídrico xilemático por meio da avaliação do potencial hídrico foliar deve ser feita, preferencialmente, nas primeiras horas do dia. Normalmente as medições são feitas na antemã e ao meio-dia para avaliar o potencial hídrico do solo e a tolerância da planta ao estresse hídrico, respectivamente.

A determinação do ponto de equilíbrio, ou seja, quando a seiva é expelida do xilema é, algumas vezes, difícil de ser feita e depende do tipo de planta, o que pode induzir a erros (Bennett, 1990), tornando necessário o uso de lupa e de iluminação eficiente (J.I. Bergonci et al., 2000).

Este método é caracterizado por ser simples, destrutivo, totalmente manual e, por isso, muito dependente da habilidade e acuidade visual do operador do equipamento. Cada operador acaba inserindo um erro de medição próprio, que pode variar com o tempo e com o número de leituras.

Waring, R.H. e Cleary, B. D. 1967, consideram que os erros desse tipo de medição podem ser classificados em dois grupos: os que dependem do material vegetal e os que dependem do método em si. Por exemplo, quando o solo está na condição de alto estresse hídrico, plantas com alturas diferentes possuem sistema radicular com profundidades diferentes e conseqüentemente apresentarão tensões hídricas internas diferentes (plantas maiores apresentam menores tensões hídricas internas). Já as plantas expostas a pleno sol possuem tensões hídricas maiores do que as de mesmo porte em condição de sombra. Quando as condições do microclima são de estresse hídrico elevado e as do solo são de baixo estresse, prevalece a influência das condições do microclima e independente das suas alturas, as plantas de tamanhos diferentes apresentam pouca diferença entre as suas tensões hídricas internas. Em relação ao método, variações muito rápidas ou muito lentas da pressão aplicada podem resultar em leituras superestimadas.

Apesar das divergências em torno da praticidade e aplicação do método de medição do potencial hídrico foliar com a câmara de pressão, este método ainda é um dos mais difundidos para esta finalidade, o que torna viável implementá-lo com certo grau de inovação e automação.

2.3.3 Sensores de Temperatura da Folha

Medidas de temperatura, como a temperatura do ar e da folhagem podem ser feitas para estimar o estado hídrico da planta, utilizando-se um termômetro portátil de infravermelho.

A técnica se baseia no fato de que a temperatura da superfície de uma folha bem hidratada é menor do que a temperatura da superfície dessa folha quando ela está desidratada. Isso acontece em virtude do decréscimo da troca de calor latente que ocorre, por exemplo, quando o sistema radicular não é capaz de suprir a demanda de transpiração e os estômatos se fecham para reduzir a perda de água na forma gasosa da folha para a atmosfera, resultando em um aumento da temperatura da folha em relação ao ambiente quando o balanço de radiação incidente na folha (ou dossel) e a estrutura do vento se mantêm os mesmos.

Apesar de algumas limitações, o uso de termômetros de infravermelho, como um instrumento para manejo da água de irrigação, tem crescido principalmente em regiões áridas. Existe comercialmente um aparelho capaz de fornecer em tempo real tanto a temperatura da folhagem e do ar e da umidade relativa do ar, quanto o valor do índice de estresse hídrico da cultura (IEHC ou CWSI) no momento da medição e compará-lo com um valor crítico para definição do momento de irrigar”, (Marouelli et al., 2011).

A temperatura das folhas também pode ser monitorada através de imagens captadas por câmeras sensíveis à radiação infravermelha, chamadas também de câmeras térmicas. Essas câmeras vêm sendo utilizadas em veículos aéreos não tripulados (VANT's) para mapear a condição hídrica de grandes áreas cultivadas, vazamentos no sistema de distribuição de água de irrigação e estresses provocados por doenças e deficiências, Jorge & Inamasu (2015).

2.3.4 Sensor de Pressão de Turgescência Foliar (Sonda ZIM)

Um dispositivo mais moderno capaz de medir indiretamente o potencial hídrico foliar é a sonda de pressão de turgescência foliar, conhecida comercialmente como sonda Zim (Zim probe), que detecta mudanças na pressão de turgor foliar. Esta sonda funciona de forma não destrutiva e não invasiva, possibilita o monitoramento contínuo e em condições de campo podendo até ser utilizada na automatização de sistemas de manejo de irrigação. Seu

funcionamento consiste em monitorar as variações de pressão em determinada parte de uma folha delimitada por grampos imantados (ou de molas) que exercem uma pressão constante sobre a folha utilizando um chip sensor de pressão. Apesar do seu potencial revolucionário, a sonda de pressão de turgescência foliar (sonda Zim) apresenta limitações para certas faixas de estresse hídrico (Esteves, 2013).

Segundo Zimmermann et al. (2013), a pressão do xilema e a pressão de turgor celular podem ser medidas com muita precisão pelas técnicas de sondas microcapilares iniciadas por Zimmermann e colaboradores (Zimmermann et al. 1969, Balling and Zimmermann 1990). Apesar dessas sofisticadas técnicas serem minimamente invasivas e permitirem medições muito precisas em um único vaso xilemático ou no nível celular de plantas intactas, elas não são adequadas para aplicações externas de longa duração.

Muitos pesquisadores consideram a nova sonda uma ferramenta útil e de grande potencial para a evolução do manejo de irrigação, por conta da sua robustez, fácil manuseio, precocidade em identificar o estresse hídrico da planta e que a facilidade da transmissão de dados em tempo real permitirá determinar o momento e a quantidade de água a ser aplicada. Devido à sua recente invenção, as pesquisas ainda estão sendo feitas para definir as melhores aplicações desse sensor (Esteves, 2013).

2.3.5 Dendrômetro de precisão

Um dos parâmetros usados para indicar o estado hídrico da planta é a contração radial dos caules e ramos das plantas ao longo de um dia, cuja amplitude é relacionada com a condição hídrica da planta (Ginestar e Castel, 1998). Ginestar e Castel (1998) constataram em seus experimentos que o caule tem seu tamanho reduzido durante o dia (devido à transpiração das plantas) e aumentado durante a noite e que a planta submetida a um estado de estresse hídrico apresentou diminuição desta variação diária do caule.

Um dos indicadores de estado hídrico é a variação do diâmetro do caule, que pode ser medida por meio de sensores LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Os Sensores ou dendrômetros LVDT se caracterizam por um transdutor de posição de alta precisão.

Souza (2009) em pesquisa aplicando dendrômetro para o manejo de irrigação de plantas jovens de café concluiu que a amplitude diária máxima (ADM) - máxima variação diária do diâmetro do caule, estava relacionada com as condições climáticas e a transpiração da planta e refletiu satisfatoriamente a variação do potencial hídrico foliar. E, além disso, a ADM indicou precocemente o estresse hídrico em plantas jovens de café, quando comparada com as medições do potencial hídrico foliar. Citou também que este parâmetro ADM poderia ser utilizado na programação da irrigação, desde que se obtenham os valores de referência adequados para ADM.

2.3.6 Psicrômetro de Termopar

Psicrômetros de termopar vêm sendo amplamente utilizados para medir o potencial hídrico, tanto em solos como em plantas desde 1951 (Spanner, 1951), desde que o efeito Peltier foi utilizado para medir o potencial da água (Skierucha, 2005). Os termopares são sensores de temperatura constituídos de dois fios metálicos de materiais diferentes unidos em uma das suas extremidades, sendo esta conexão denominada junta quente. A outra extremidade do conjunto é aberta e é denominada junta fria. Quando ocorre uma diferença de temperatura entre as juntas quente e fria, surge uma tensão elétrica entre os terminais da junta fria, que é proporcional à diferença de temperatura entre as juntas quente e fria. Dessa forma, os termopares são capazes de converter um sinal de temperatura em um sinal de tensão elétrica. E por esse motivo, também podem ser classificados como transdutores de temperatura ou sensores termoelétricos.

Skierucha (2005) considera que um dos métodos mais consistentes para medição do potencial hídrico foliar talvez seja o da psicrometria com psicrômetro termopar. Este método é reconhecido como referencial e o mais completo para a medição do potencial hídrico foliar, pois suas leituras, além de contemplarem as componentes de pressão e matricial do potencial hídrico, elas também consideram o potencial osmótico da seiva. Mas, as medições com psicrômetro são mais complexas e mais demoradas do que as feitas com a câmara de pressão. Além disso, elas exigem condições ambientais bem controladas, o que praticamente inviabilizam sua utilização em condições de campo.

2.4 Sensores utilizados para determinação das propriedades do clima

No que diz respeito ao manejo de irrigação, o fundamento para se quantificar o montante de água a ser aplicado em uma determinada cultura está geralmente associado à capacidade da superfície do solo e da vegetação de perder água para a atmosfera. Segundo Silva & Rao (2006), a forma usual de se determinar a quantidade de água a ser aplicada ao longo do ciclo de uma cultura, é considerar os processos de evaporação do solo e de transpiração da planta conjuntamente, no que se denomina evapotranspiração.

De acordo com Marouelli (2011), quando não existe restrição de água para planta no solo, a necessidade hídrica da cultura dependerá das condições atmosféricas locais. A água liberada para a atmosfera na forma de vapor através das superfícies do solo, dos corpos d'água e da planta é chamada de evapotranspiração e é função da radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar.

Portanto, medidas diretas de algumas variáveis do clima são de crucial importância para o manejo da água de irrigação, pois permitem estimar, de forma indireta, a evapotranspiração da cultura (ET_c) e, conseqüentemente, o montante de água a ser repostado ao solo entre dois eventos de irrigação consecutivos, devendo ser descontada a precipitação efetiva dentro do intervalo de tempo considerado para os eventos de irrigação (Marouelli, 2011).

Em termos do manejo de irrigação com base na evapotranspiração (ET) Gowda et al. (2007) argumentam que a melhoria na eficiência do uso da água só pode ser alcançada por meio de estimativas confiáveis da ET, que deve conter a evaporação da água do solo e superfícies de água e a transpiração pela vegetação. A ET varia espacialmente e sazonalmente de acordo com o tempo e as condições de cobertura de vegetação.

Logo, a instrumentação exerce papel fundamental na coleta de dados e informações das condições atmosféricas, a fim de determinar com precisão a evapotranspiração, que é uma medida primordial para o manejo de irrigação.

Diversos dispositivos e equipamentos estão disponíveis no mercado para cumprir essa missão. Dentre eles pode-se citar: o tanque Classe A, indicado para estimativa de ETo (evapotranspiração de referência) para períodos acima de 5 dias, dada sua praticidade e baixo custo.

Para fins de manejo em tempo real, as estações agrometeorológicas automáticas de alta precisão vêm sendo aprimoradas ao longo dos anos para atender essa necessidade. Segundo Torres et al. (2015), o alto custo dessas estações tem dificultado a utilização destes equipamentos em diversas aplicações.

Novas alternativas estão surgindo para melhorar a relação custo x benefício das estações, como, por exemplo, a pesquisa de Torres et al. (2015), que desenvolveram uma estação meteorológica automática utilizando a plataforma eletrônica de tecnologia aberta, chamada Arduino, com a qual obtiveram resultados promissores em relação à estação automática convencional.

As estações meteorológicas automáticas apresentam conjuntos de sensores. Dentre eles, pode-se citar os sensores de temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, luminosidade, velocidade e direção do vento e de pluviosidade.

Seus recursos vão além das medições dos sinais dos sensores. Algumas estações possuem diversos alarmes programáveis em função dos sinais dos sensores. Outras possuem transmissão de dados via rádio e/ou telefonia celular.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1 Estratégia Experimental

Os experimentos foram realizados com videiras cultivadas em vasos com capacidade de 16l de solo, contendo como substrato uma mistura de latossolo vermelho-escuro (LVE), distrófico, textura argilosa, esterco de curral e areia, na proporção 1:1:1.

As plantas foram cultivadas em casa de vegetação, com estrutura telada, localizada no campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes, RJ. Até dezembro de 2016, os experimentos foram realizados com videiras cultivadas em vasos de capacidade para 16l de solo e a partir de janeiro, os vasos foram trocados por outros com capacidade de 25l.

As avaliações foram realizadas em folhas totalmente expandidas de videiras da variedade Niágara Rosada (*Vitis labrusca* L.) enxertadas sobre porta-enxerto IAC 572 plantadas em abril de 2013 e das variedades Cabernet Sauvignon e Chardonnay. Todas foram conduzidas no sistema de espaldeira com apenas um ou dois ramos. Foram irrigadas por gotejamento a cada 8 horas, até atingir a capacidade de campo.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram registrados por meio de uma estação de monitoramento automático Datalogger WatchDog® instalado na área experimental, programada para coletar dados em intervalos de 30 min, durante todo o período de avaliação.

Para a medição do potencial hídrico foliar utilizou-se um sistema constituído por um sensor de fluxo de seiva, uma câmara de pressão (bomba de Scholander) adaptada com um transdutor digital de pressão, um computador portátil e um registrador de dados eletrônico (figura 2).

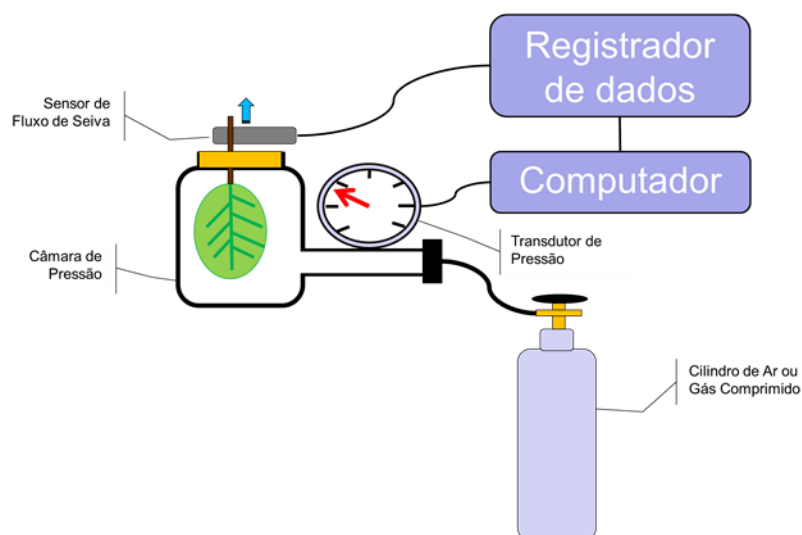


Figura 2: Diagrama esquemático do sistema de medição proposto.

Fonte: o autor (2017)

O sensor de fluxo de seiva desenvolvido especificamente para esta aplicação no Laboratório de Engenharia Agrícola da UENF (LEAG), foi instalado no pecíolo das folhas, o mais próximo possível da tampa da câmara, e juntamente com o registrador de dados eletrônico, devidamente sincronizado no tempo com o programa do transdutor de pressão, fizeram o registro das medições da variação do fluxo de seiva enquanto era aplicada pressão na câmara, que variou de 0 a 3,0 MPa. Para o acionamento do sensor de fluxo de seiva foi desenvolvida uma placa eletrônica alimentada com uma fonte de 5V DC-3A e os dados do sensor foram monitorados e armazenados em um registrador de dados (“datalogger”) modelo CR1000 da Campbell Scientific.

No dia 1 de dezembro foram feitos testes preliminares de bancada utilizando-se folhas entre a primeira e a terceira folha totalmente expandida das videiras. Após serem destacadas, algumas folhas tiveram os seus pecíolos acondicionados em um pote com água para minimizar a desidratação por

transpiração e outras foram simplesmente acondicionadas em um recipiente seco e aberto. Posteriormente todas as folhas foram transportadas para o laboratório (distante 100m) sob condições ambientais naturais em um intervalo de tempo inferior a trinta minutos e em seguida foram submetidas à medição do potencial hídrico foliar. Durante os testes, cada folha era inserida individualmente na câmara de pressão da bomba de Scholander. Este procedimento permitiu diferentes condições de hidratação das folhas e serviu para validar o funcionamento dos componentes do sistema proposto para as próximas medições. Cabe ressaltar que o término da medição do potencial hídrico de todas as folhas selecionadas ocorria em até 90 (noventa) minutos após as folhas terem sido destacadas das videiras.

Também foram anotados o valor da pressão indicada pelo manômetro analógico da bomba de Scholander quando observado o exsudado das folhas na ponta do pecíolo e a hora em que ocorreu o evento. Posteriormente os dados obtidos com os testes foram analisados e comparados a fim de validar a funcionalidade dos componentes e do sistema para a folha destacada.

Nos dias 21 e 22 de dezembro foram feitas diversas medidas do potencial hídrico foliar com o sistema de instrumentação já validado pelas medições preliminares e comparadas com o sistema de medição convencional (bomba de Scholander).

Com base nos resultados obtidos na primeira etapa de medições, foi realizada a segunda etapa entre os dias 13 e 23 de março em que foram feitos testes comparativos em casa de vegetação, pressurizando-se folhas destacadas e não destacadas de videiras da variedade Chardonnay sob diferentes condições de estresse hídrico. Para tal, a irrigação foi interrompida no dia 12 de março à noite e reestabelecida no dia 22 de março à noite. Foi utilizada uma nova câmara de pressão desenvolvida para a medição do potencial hídrico tanto de folhas destacadas quanto de não destacadas (figura 3). Esta câmara de pressurização “in vivo” (CPIV) (figuras 7a e 7b) substituiu a câmara original da bomba de Scholander (figura 1a), que havia sido utilizada no sistema da primeira etapa de medições com a folha destacada e as medições feitas ao longo da segunda etapa pelo método proposto foram comparadas com as leituras do método visual de referência de Scholander.

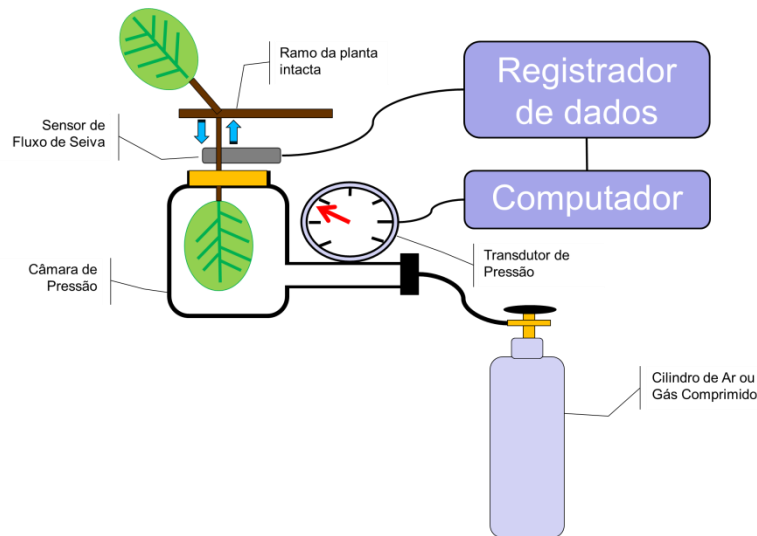


Figura 3 Diagrama esquemático do sistema de medição proposto para medição de potenciais com a folha não destacada da videira, utilizando a nova câmara de pressurização in vivo (CPIV).

Fonte: o autor (2017)

3.2 Medição do Potencial Hídrico Foliar – 1ª Etapa: folha destacada

A medição do potencial hídrico foliar na primeira etapa de medições foi feita utilizando a tecnologia do sensor fluxo e a câmara de pressão do tipo Scholander adaptada com um transdutor digital de pressão e essas medidas foram comparadas com o método de referência de Scholander. As características construtivas, o desenvolvimento do sensor, seu princípio de funcionamento, os testes preliminares e os procedimentos de medição do potencial hídrico serão abordados nos tópicos a seguir.

3.2.1 Sensor de Fluxo de Seiva

A finalidade deste dispositivo era detectar variações do fluxo de seiva no pecíolo da videira provocadas pelo aumento da pressão aplicada na folha alojada dentro da câmara pressurizadora. O princípio de funcionamento utilizado no sensor foi o da dissipação térmica com pulso intermitente de calor. O sensor de fluxo de seiva foi construído no laboratório de engenharia agrícola da UENF,

LEAG e os testes e as medições preliminares na casa de vegetação e no laboratório de melhoramento genético vegetal (LMGV) setor de fisiologia vegetal da UENF (figura 5).

O processo de concepção e construção do sensor consistiu na experimentação de vários modelos e técnicas de fabricação. Após os protótipos serem montados, eram feitos testes de continuidade e de leitura dos sinais no laboratório. Sendo aprovados nessa primeira fase de testes, em seguida eles eram fixados nas videiras da casa de vegetação durante um ou dois dias. Os dados dos sensores então eram armazenados no registrador de dados CR1000 da Campbell Cientific e posteriormente analisados no laboratório. O protótipo que foi capaz de emitir os sinais aparentemente mais representativos do fluxo de seiva e com menor nível de ruído foi utilizado para etapa de testes seguinte no LMGV.

Ele foi constituído por uma resistência elétrica (resistor) de filme de carbono 1/4W e 100 Ω (fonte de calor), dois termopares de cobre-constantan bitola 48AWG (sensores de temperatura termoeletrônicos), um grampo de madeira com 10mm de largura e uma capa isolante térmica (figuras 4A e 4B). Um dos termopares foi montado sobre o resistor e o outro termopar situado a 5,0mm de distância do conjunto resistor-termopar, sendo mantido o mesmo nível de altura entre os termopares. Os dois termopares foram conectados eletricamente em série e de forma subtrativa, gerando um sinal elétrico resultante da diferença entre a tensão do termopar aquecido (instalado sobre o resistor) e a tensão do outro termopar (afastado do resistor) que estava sob uma temperatura mais próxima da temperatura ambiente. A arquitetura e a conexão elétrica foram concebidas para que houvesse uma relação proporcional entre o fluxo de seiva e a diferença de temperatura dos termopares e para que fosse possível fazer a leitura do sinal elétrico do sensor utilizando apenas um canal de entrada analógico do registrador de dados eletrônico. Estudos preliminares utilizando a técnica da dissipação térmica com pulsos intermitentes de calor determinaram a escolha deste princípio de funcionamento no sensor a ser desenvolvido.

Uma placa de circuito eletrônico externa ao sensor e com alimentação de entrada de 9 a 12VDC e 5VDC de saída (corrente contínua) foi desenvolvida para gerar um pulso constante de calor no resistor e uma capa isolante térmica protegeu o sensor das influências do sol, do vento e das temperaturas externas ao sistema sensor-planta.

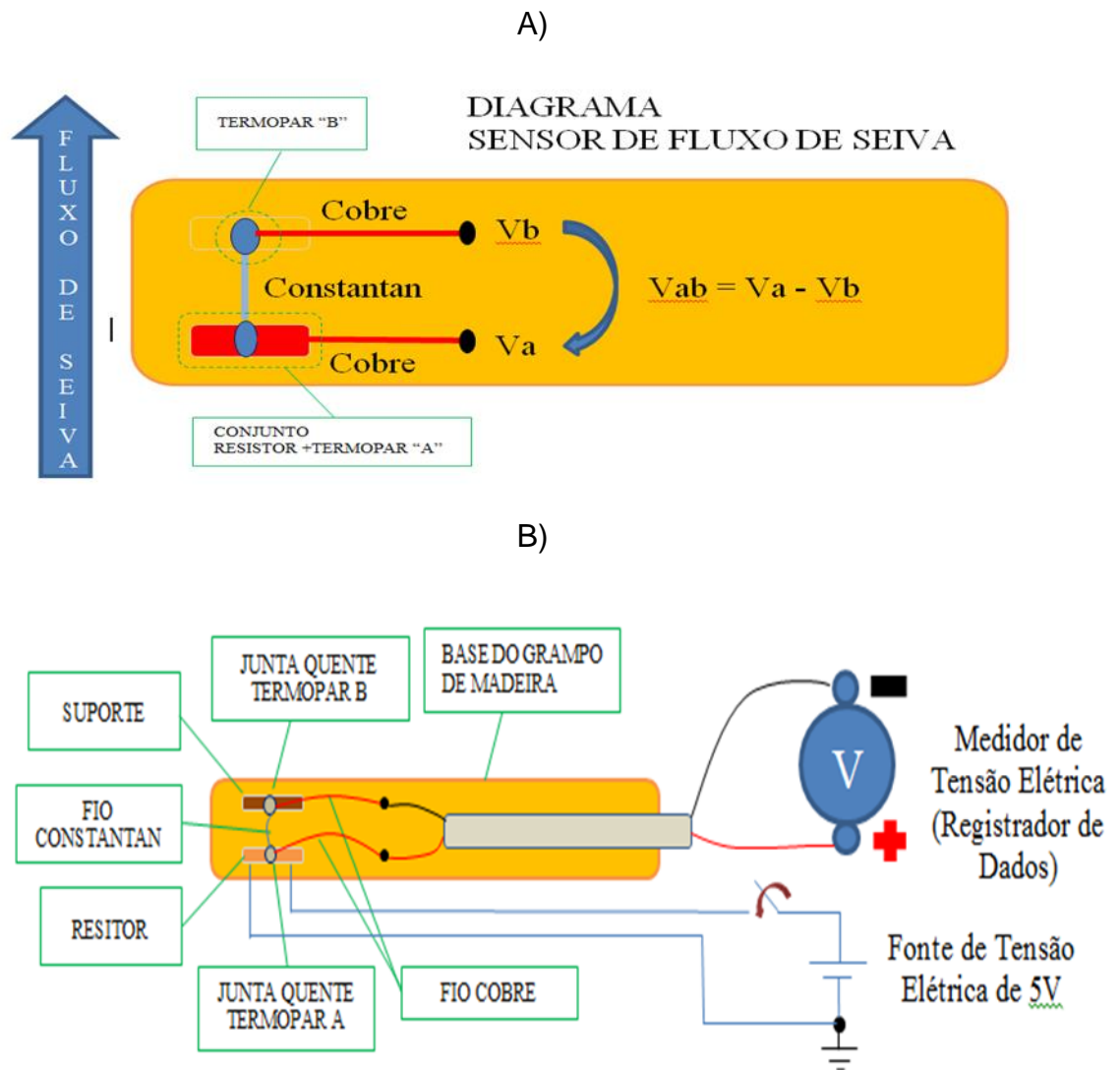


Figura 4: Diagrama esquemático do sensor de fluxo de seiva (A) e diagrama mais detalhado (B) com as conexões de alimentação e de leitura de sinal.

Fonte: o autor (2017)

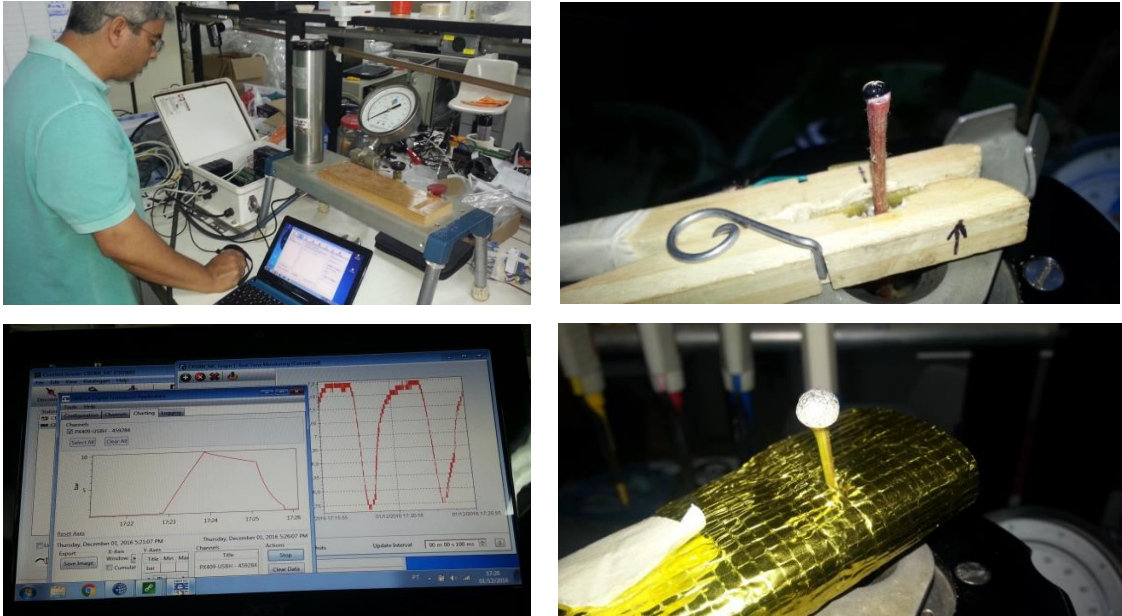


Figura 5: Testes preliminares para validação do sistema com sensor de fluxo de seiva; sensor de pressão digital e a câmara de pressão fab. SoilMoisture; o computador portátil com os dois gráficos apresentando a variação do sinal do sensor de fluxo de seiva (à direita) e; do sensor de pressão (à esquerda), durante a pressurização da folha da câmara.

Fonte: o autor (2017)

Devido à sua arquitetura, o sensor era capaz de detectar o fluxo de seiva especialmente no sentido do conjunto termopar-resistência para o outro termopar sem resistência (figura 4A). Por isso, era importante observar que, ao instalar o sensor de fluxo no pecíolo, o conjunto resistor-termopar tinha que ficar voltado para o lado da folha enquanto o segundo termopar, sem resistência, ficava mais próximo da extremidade do pecíolo/planta. Dessa forma, o sensor foi capaz de detectar melhor o fluxo de seiva no sentido folha-pecíolo (exsudado) ou folha-planta quando ele ocorreu.

O funcionamento detalhado do sensor ocorria da seguinte maneira: primeiramente o sensor era fixado no pecíolo da folha com o resistor de aquecimento voltado para o lado da câmara de pressão e os dois termopares devidamente alinhados sobre o pecíolo e a cada ciclo de leitura, um pulso de calor constante era gerado pela resistência. Os termopares indicavam um aumento de temperatura de forma diferente: o termopar que fora instalado sobre a resistência (fonte de calor) detectava maior temperatura do que o outro termopar

afastado 5,0mm da fonte de calor. Devido ao fluxo de seiva, que seguia do resistor para o termopar isolado, ocorria a redução da temperatura do conjunto resistor-termopar e o aumento de temperatura do outro termopar. Neste caso, a diferença da temperatura entre os termopares reduzia e essa redução era proporcional ao fluxo de seiva. Portanto, a amplitude da diferença entre as leituras dos dois termopares era máxima quando não havia fluxo de seiva e essa amplitude da diferença era mínima quando o fluxo era máximo. Assim, quanto maior o fluxo de seiva próximo ao resistor, mais rápido o calor gerado por ele era dissipado e a variação de sua temperatura podia ser detectada pelos termopares.

3.2.2 Primeira etapa de medições do potencial hídrico foliar

A medição do potencial hídrico foliar pelo método proposto foi feita com base em sinais de pressão e de fluxo de seiva. Os componentes do sistema responsáveis pelo sinal de pressão foram constituídos por uma bomba de Scholander série PWSC 3000, modelo 3000F01H12G2P40 da Soilmoisture, na qual foi adaptado um transdutor de pressão modelo PXM-409, fabricante Omega, e um computador portátil Netbook Dell com o programa do fabricante do sensor. Este programa permitiu monitorar a pressão, bem como gerar gráficos e registrar em tabela os dados das leituras do sensor durante as medições.

O sinal relacionado ao fluxo de seiva foi obtido com sensor do fluxo de seiva desenvolvido. Este foi conectado no registrador de dados modelo CR1000 do fabricante Campbell Scientific. Este, por sua vez, foi ligado ao computador portátil por meio da porta de comunicação RS232 para visualização e armazenamento dos dados da leitura deste sensor, por meio do programa do fabricante. A alimentação do sensor de fluxo de seiva foi feita por meio de uma placa de circuito impresso, especialmente desenvolvida para esta aplicação. Esta placa foi controlada pelo CR1000. O fluido pressurizante foi o nitrogênio armazenado em um cilindro de gás comprimido.

Os testes preliminares para validar o funcionamento de todo o sistema com os sensores e os outros dispositivos eletrônicos foram realizados no Laboratório de Fisiologia Vegetal da UENF. Foram destacados ramos das videiras na casa de vegetação, que logo após serem destacados, foram mantidos em recipiente com água para transporte e armazenamento durante os testes no

laboratório. Esse procedimento teve a finalidade de evitar o ressecamento das folhas a ponto de inviabilizar os testes. As folhas foram devidamente enxutas com papel toalha para evitar variações ou erros na leitura do sensor de fluxo de seiva.

As primeiras medições na casa de vegetação tiveram início no dia 20 de dezembro e foram concluídas no dia 21 do mesmo mês. Do total de cerca de 120 plantas da casa de vegetação, foram escolhidas 12 plantas, sendo 4 plantas de cada variedade para serem submetidas ao estresse hídrico, cortando a irrigação em data anterior ao dia 20. As medições foram feitas intercaladas entre plantas não irrigadas e plantas irrigadas. As plantas irrigadas foram escolhidas aleatoriamente dentro do conjunto de plantas disponíveis na casa de vegetação.

No dia 20 as medições foram feitas entre 9:00h da manhã e 19:00h, sendo que no dia 21, elas começaram às 5:40 da manhã e terminaram às 19:00h, sendo possível medir o potencial hídrico da antemanhã. Para cada leitura, foi utilizada uma única folha e no momento de acomodar a folha da videira na câmara de pressão, teve-se o cuidado para não danificá-la, tendo em vista que elas normalmente possuem seus tamanhos relativamente maiores do que o diâmetro da câmara de pressão. O sensor de fluxo de seiva foi instalado no pecíolo da folha da videira no ponto mais próximo possível da tampa da câmara de pressão e a seta indicativa do sentido de leitura de fluxo permaneceu apontando para cima, na direção da extremidade do pecíolo.

Depois de verificada a vedação da tampa da câmara de pressão e instalado corretamente o sensor de fluxo de seiva na folha, o equipamento de acionamento dos pulsos de calor do sensor, bem como o registrador de dados CR1000 da Campbell Scientific. O monitoramento da pressão no momento das medições foi feito visualmente utilizando o manômetro analógico da bomba de Scholander. Após a medição do potencial hídrico pelo método convencional de Scholander, também foram feitas análises dos gráficos e registros dos dados dos sensores de fluxo de seiva e pressão por meio dos seus respectivos programas. Os dados foram trabalhados em planilhas de Excel e posteriormente foram feitas as comparações entre os resultados obtidos com método convencional de Scholander e o do novo sistema proposto.

3.3 Medição do Potencial Hídrico Foliar – 2ª Etapa: folha intacta

Os preparativos para a etapa de medições dos potenciais hídricos foliares com a folha intacta (“in vivo”) foram iniciados após a constatação de que o sistema proposto, integrando as tecnologias da câmara de pressão e do sensor de fluxo de seiva, era capaz de detectar o fluxo através do pecíolo de uma única folha destacada e pressurizada. A construção da câmara de pressão que possibilitou a pressurização da folha intacta e os procedimentos detalhados para a medição do potencial hídrico na segunda etapa de medições estão descritos nos tópicos a seguir.

3.3.1 Câmara de Pressurização “in vivo” (CPIV) e sua fabricação

A CPIV foi constituída de uma tampa metálica com acessórios (de fixação e vedação) e com um furo central que permitia a passagem das folhas sem a necessidade de destacá-las. Além da tampa, também integravam a CPIV, um corpo cilíndrico construído em aço usinado em peça inteiriça, mangotes, conexões roscadas e de engate rápido, todos para alta pressão.

Os trabalhos de desenvolvimento da câmara com a construção dos primeiros protótipos no laboratório de Fabricação do IFES campus Cachoeiro de Itapemirim-ES. Os protótipos eram construídos e posteriormente submetidos ao teste hidrostático, feito por um engenheiro mecânico contratado especificamente para esse serviço, para atender os requisitos de uma pressão operacional de 4,0 MPa. Também foram contratadas empresas especializadas para desenhar o projeto detalhado da câmara em CAD 2D e 3D, para a usinagem de todas as peças em equipamento CNC e para a fabricação das borrachas de vedação e mangotes e conexões de alta pressão.

Diversos protótipos foram fabricados e testados até que fosse obtido um que atendesse os requisitos do teste hidrostático para pressões nominais de operação até 4,0MPa, realizado de acordo com a norma de segurança NR 13 e ASME UG-99 pelo engenheiro mecânico Hudson Thiago da Silva, CREA ES-024031/D. A figura 6 apresenta a evolução dessas diversas etapas do processo de construção da CPIV desde o desenvolvimento inicial com os primeiros protótipos, projeto consolidado detalhado até a apresentação final da CPIV construída. O protótipo aprovado nesse teste foi levado para o laboratório de Fisiologia da UENF para ser adaptado no console da câmara de pressão série

PWSC 3000, modelo 3000F01H12G2P40 da Soilmoisture. Em seguida foram feitas as primeiras pressurizações com folhas de videiras para observar a estanqueidade com espuma de sabão na borracha de vedação do pecíolo.

Posteriormente foram pressurizadas folhas intactas de videiras das variedades Niágara Rosada, Cabernet Sauvignon e Chardonnay cultivadas em casa de vegetação do Laboratório de Fisiologia no campus da UENF para validar a funcionalidade da câmara.

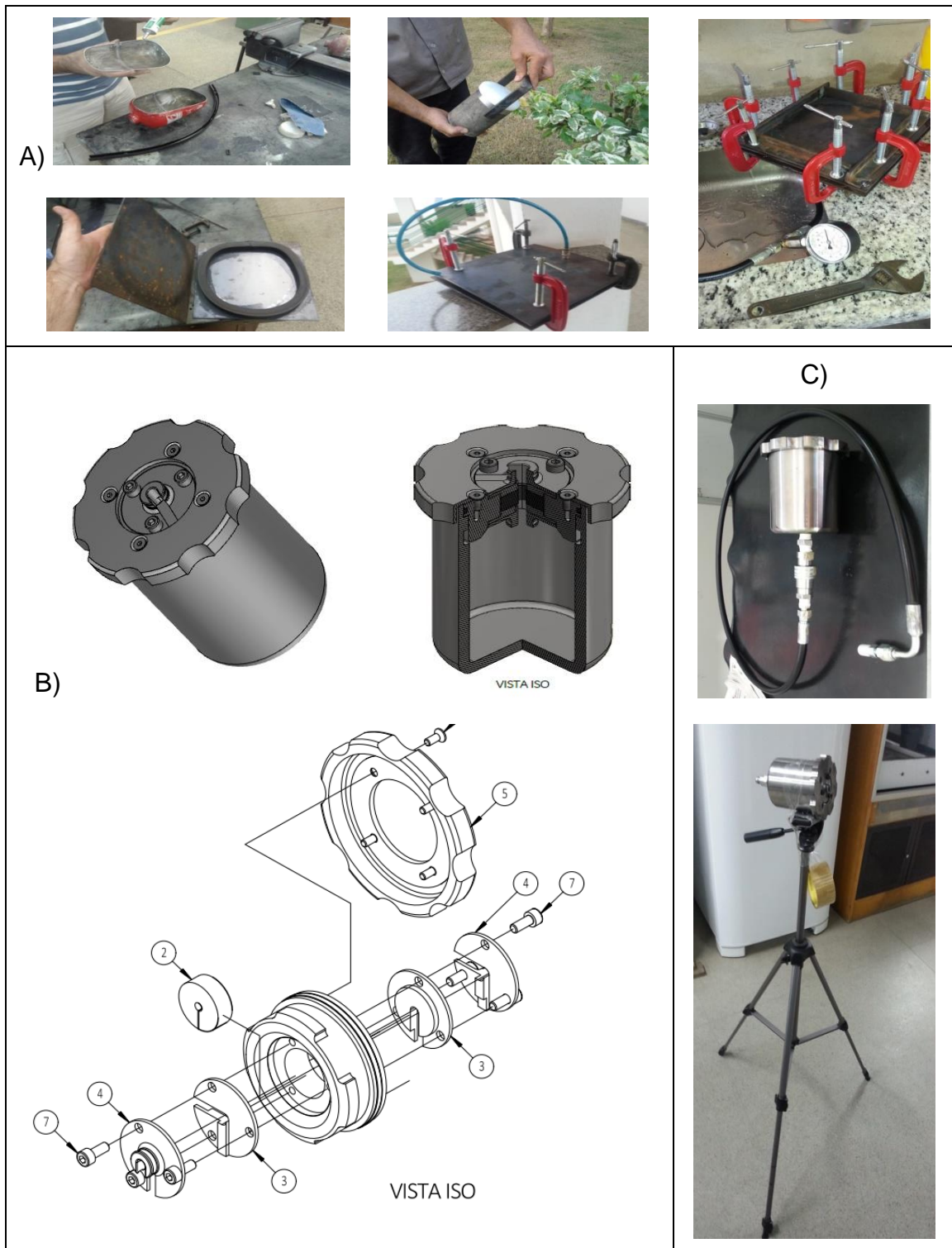


Figura 6: Etapas evolutivas do processo de desenvolvimento (A), projeto (B) e apresentação (C) da câmara de pressurização in vivo (CPIV).

Fonte: o autor (2017)

3.3.2 Segunda etapa de medições do potencial hídrico foliar

A segunda etapa de medições foi realizada entre os dias 13 e 23 de março de 2017 e durante sua execução foram feitos novos testes comparativos entre o método proposto e o método de Scholander pressurizando as folhas intactas da videira e também destacadas sob diferentes condições de estresse hídrico na casa de vegetação. Para tal, a irrigação foi interrompida no dia 12 de março à noite, no dia anterior ao início das medições, e reestabelecida no dia 22 de março à noite, um dia antes do fim das medições. Os testes foram feitos em diversos horários entre 4:40h e 18:50h. As medições foram feitas conforme ilustrado pela figura 3 (vide estratégia experimental).

Foram escolhidas para a medição da primeira até a terceira folha totalmente expandida contando a partir da folha mais jovem (ápice) para o vaso da planta. Após inserir a folha pela abertura central, a borracha de vedação era acomodada, os acessórios de sua fixação eram então encaixados e levemente apertados com os parafusos utilizando-se preferencialmente uma parafusadeira elétrica para reduzir o tempo de preparação do processo. Em seguida, a tampa, contendo a folha fixada nela, era encaixada no corpo cilíndrico da câmara e girada até encontrar o seu fim de curso para ficar travada. Antes de iniciar a pressurização e durante sua execução, os parafusos eram gradualmente apertados para estancar vazamentos. Todos esses procedimentos eram feitos cuidadosamente para não danificar o pecíolo e o limbo foliar.

Depois de verificado novamente se a tampa estava travada, instalava-se o sensor de fluxo de seiva no pecíolo o mais próximo possível da tampa e esperava-se um tempo para estabilização do sinal de temperatura antes do início da pressurização. Constatando o equilíbrio térmico pelo sensor de fluxo de seiva, a pressurização era inicializada respeitando uma variação de pressão de no máximo 0,2 MPa de pressão por segundo e a pressão aplicada era monitorada utilizando os programas referentes aos sensores de pressão e fluxo de seiva no computador portátil. A pressão era acrescida até que se verificasse uma variação no sinal do sensor de fluxo de seiva cerca de 20 vezes a variação média de pico a pico do sinal inicial desse sensor. Neste momento, a pressurização era interrompida fechando-se a válvula de alimentação de gás do sistema e a câmara

era despressurizada. Esse procedimento de leitura com pressurização era repetido três vezes para cada folha, sendo escolhida a mediana como valor representativo, a fim de evitar a influência de eventuais valores espúrios.

Logo em seguida, era feita a medição do potencial hídrico foliar pelo método tradicional de Scholander, destacando-se a folha anteriormente pressurizada e depois também uma outra folha anexa totalmente expandida. Da mesma forma que as medições com a folha intacta, as leituras com as folhas destacadas foram repetidas três vezes em cada folha e escolhido o valor da mediana das medições. Vide figura 7 a seguir:

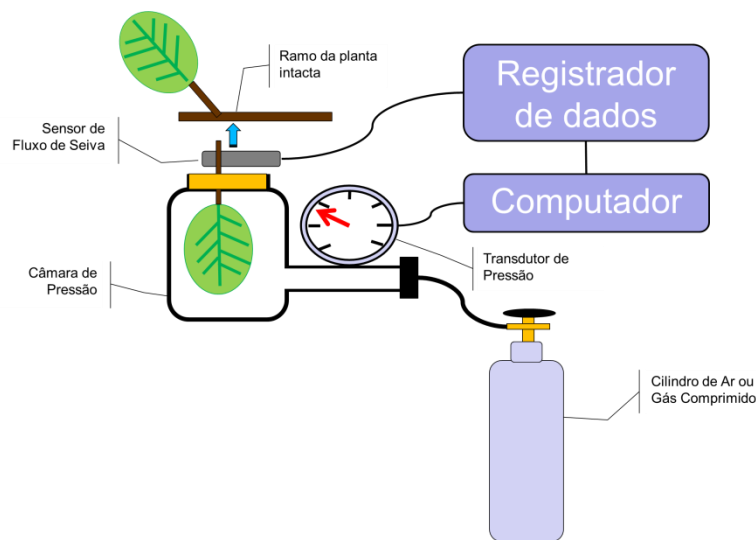


Figura 7: Esquema que ilustra as medições com a folha que foi destacada para a medição pelo método de Scholander e que anteriormente havia sido pressurizada conectada para medição pelo método proposto.

Fonte: o autor (2017)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo está subdividido em dois tópicos: o primeiro que trata dos testes da primeira etapa de medições feitas com folhas destacadas e pressurizadas na câmara de pressão da Soilmoisture série PWSC 3000, modelo 3000F01H12G2P40. Esses testes permitiram avaliar o desempenho do sensor de fluxo de seiva e a relação entre as medições do método proposto com o método de referência de Scholander. O segundo tópico é relativo à segunda etapa de medições em que foram feitos testes com folhas intactas e destacadas utilizando a câmara de pressurização *in vivo* (CPIV) e cujos resultados permitiram avaliar a correlação entre as medições do método proposto com o método de referência de Scholander.

4.1 Medição do Potencial Hídrico Foliar – 1ª Etapa: folha destacada

Durante todas as pressurizações com as folhas destacadas o sensor de fluxo de seiva foi capaz de detectar uma variação de temperatura entre os seus termopares no instante em que a extremidade do pecíolo começava a umedecer. Como a pressão necessária para promover o exsudado no pecíolo de uma folha pressurizada é representativa do potencial hídrico foliar (Scholander et al., 1965), pode-se afirmar que o sensor de fluxo de seiva foi capaz de detectar uma variação do fluxo através do pecíolo quando a pressão aplicada na câmara ultrapassou a pressão do potencial hídrico foliar. Para demonstrar o

comportamento dos sinais dos sensores durante as medições, é apresentada na figura 8 uma medição exemplar dos testes efetuados.

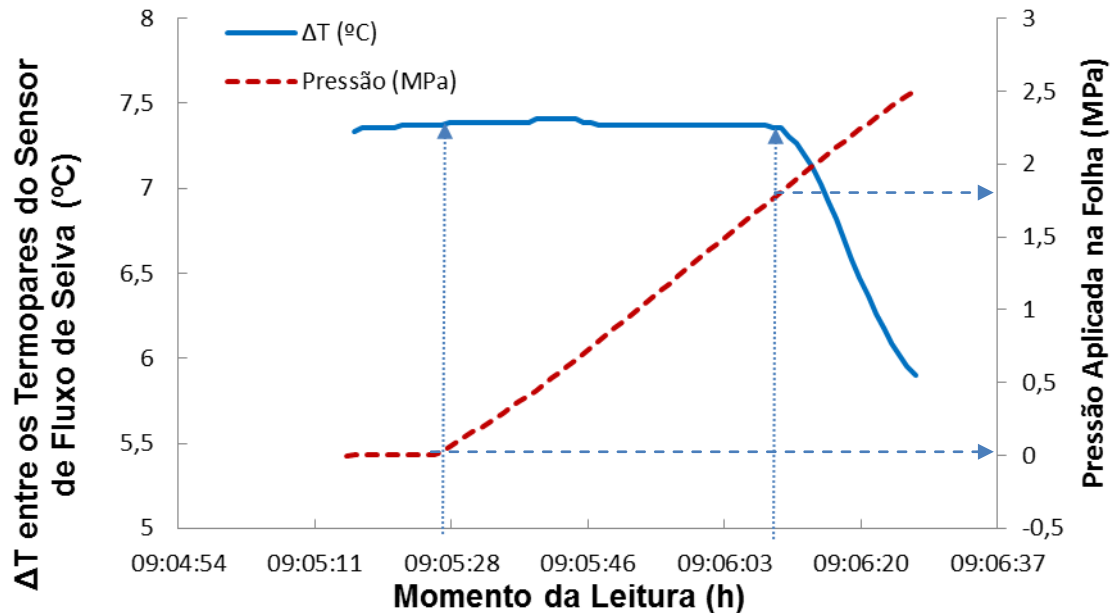


Figura 8: Gráfico da variação do sinal do sensor de fluxo de seiva e do sensor de pressão durante a pressurização da folha na câmara de pressão.

Fonte: o autor (2017)

A diferença de temperatura entre os termopares teve relação sensível com o fluxo de seiva. Essa diferença foi máxima na ausência de fluxo, pois sem fluxo o termopar aquecido ficou com temperatura maior do que a do outro termopar que não foi aquecido. No entanto, quando ocorreu fluxo de seiva, parte do calor do termopar aquecido foi transferida para o outro termopar, reduzindo assim a diferença de temperatura entre eles. Graficamente, a linha do sinal do sensor de fluxo de seiva teve um decaimento, uma redução do valor e atingiu o valor mínimo quando o fluxo foi máximo (fig. 8). Essa dinâmica da diferença de temperatura entre os dois termopares foi semelhante à que foi obtida por meio do sensor de fluxo de seiva com dois termopares para avaliar a transpiração de cafeeiros (Pimentel et al., 2010). Porém, o sensor fabricado para o trabalho da presente dissertação se destaca por não possuir agulhas e não ser usado para mensurar o

fluxo de seiva das plantas, apenas para monitorar as variações dele no pecíolo de uma única folha de videira durante as pressurizações.

Analisando o gráfico da figura 8, pode-se verificar que antes da pressurização começar ($P \approx 0$ MPa), os sinais dos dois sensores permaneceram estabilizados ($\Delta T \approx 7,4^\circ\text{C}$ e $P \approx 0$ MPa), indicando ausência tanto de pressão quanto de fluxo de seiva. Em seguida, quando a válvula reguladora de pressão da câmara foi acionada, a pressão começou a aumentar gradativamente com o tempo e o sinal do sensor de fluxo de seiva ainda permaneceu estável ($\Delta T \approx 7,4^\circ\text{C}$), indicando ausência de fluxo de seiva até certo momento. É possível constatar que o sinal do sensor de fluxo de seiva se manteve praticamente constante em torno de $7,4^\circ\text{C}$ até o momento em que a pressão aplicada estava em torno de 1,8 MPa e logo após decaiu acentuadamente indicando a ocorrência de fluxo de seiva para valores de pressão aplicada maiores do que 1,8 MPa. O potencial hídrico foliar da folha avaliada neste gráfico e medido pelo método de Scholander foi de -1,9 MPa.

No gráfico da figura 9 a seguir, foram apresentados os dados do mesmo teste citado no gráfico da figura 8. Agora, porém, este gráfico apresentou a relação do sinal do sensor de fluxo de seiva com o sinal do sensor de pressão, ou seja, a variação da diferença de temperatura entre os termopares do sensor de fluxo de seiva em função da pressão aplicada. Neste caso é possível verificar de maneira mais direta e clara que a partir da pressão de 1,8 MPa o sinal do sensor de fluxo de seiva reduziu acentuadamente indicando a existência de fluxo de seiva.

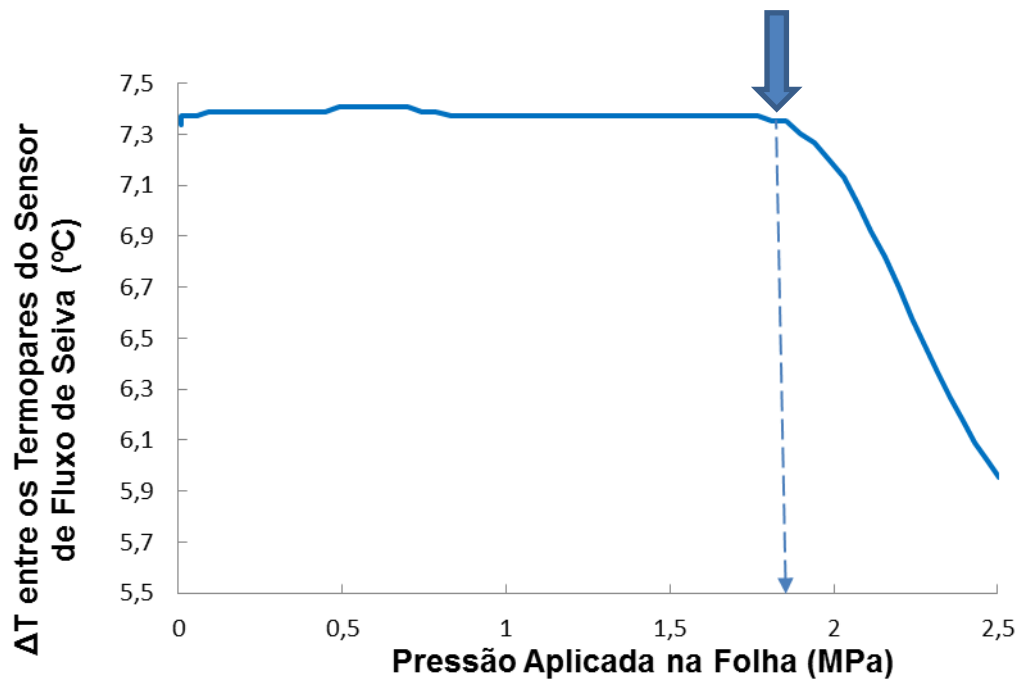


Figura 9: Gráfico da relação do sinal do sensor de fluxo de seiva em função do sinal de pressão durante a pressurização da folha na câmara de pressão.

Fonte: o autor (2017)

Pela figura 9 é possível constatar que o sinal do sensor de fluxo de seiva permaneceu estável até o momento em que a pressão aplicada estava em torno de 1,8 MPa e logo após decaiu acentuadamente indicando a ocorrência de fluxo de seiva para valores de pressão maiores do que 1,8 MPa. O potencial hídrico determinado pelo método proposto neste caso foi de -1,8MPa, obtido adotando a pressão que causou o início do fluxo de seiva (1,8 MPa) com o sinal negativo. Como esta folha apresentou o potencial hídrico foliar de -1,9 MPa medido pelo método de Scholander, a diferença percentual entre as medidas foi de 5,26%. Valor que pode ser considerado satisfatório, pois não compromete a avaliação do estado hídrico da planta e estatisticamente não é significativo como será mostrado a seguir.

A forma construtiva de grampo provido de termopares nivelados para um contato apenas superficial com o pecíolo dispensou a necessidade de sondas para serem inseridas e facilitou a instalação na planta conferindo maior agilidade e praticidade em relação a outros tipos de sensores com sondas tipo agulha. As medições foram feitas sempre com o mesmo sensor de fluxo de seiva que, apesar

da grande quantidade de vezes que foi utilizado (mais de 200 vezes), chegou ao final dos trabalhos funcionando perfeitamente. Este desempenho indicou que o protótipo desenvolvido possuía a robustez necessária para o desenvolvimento dos trabalhos.

Apesar da existência de vários tipos de sensores de fluxo de seiva (Granier, 1985, Sousa et al., 2009, Rene et al. 2017) e de muitos trabalhos e dispositivos capazes de fazer medições relacionadas às propriedades fisiológicas das folhas como a sonda Zim (Zimmermann et al., 1969, Balling and Zimmermann, 1990, Zimmermann et al., 2013), o psicrômetro de termopar (Dixon & Tyree, 1984) e a própria câmara de pressão (Scholander et al., 1965), a detecção do fluxo de seiva no pecíolo de uma folha de videira durante a pressurização da mesma em uma câmara é uma experiência inovadora e sem precedentes na literatura científica. Dixon & Tyree (1984) desenvolveram uma câmara contendo termopares, mas tratava-se de um psicrômetro que media o potencial hídrico da folha e do caule e cujas medidas foram comparadas com o método da câmara de pressão. Pavez et al. (2011) compararam as medições do potencial hídrico foliar de variedades de uvas de mesa feitas com dois tipos de câmara de pressão de Scholander, mas não utilizaram sensores de fluxo de seiva em nenhuma delas.

O calor gerado pela resistência foi capaz de aumentar em até 15 graus Celsius a temperatura do pecíolo da folha, sendo essa variação suficiente para a detecção do fluxo de seiva e insuficiente para causar danos visuais ao tecido da planta e as capas isolantes térmicas utilizadas no revestimento do sensor de fluxo de seiva proporcionaram uma condição primordial para que o sensor funcionasse corretamente, garantindo que as trocas de calor do sensor com o meio ambiente fossem contidas em um nível em que os ruídos dessa interferência fossem desprezíveis. Essa boa contenção e o funcionamento do resistor como uma fonte de calor constante podem explicar, em parte, o fato da diferença de temperatura entre os termopares ter permanecido praticamente constante quando não havia fluxo de seiva (temperatura relativa às pressões inferiores a 1,8 MPa nas fig. 8 e 9).

Em todas as medidas com a folha destacada o sensor de fluxo de seiva detectou variações no fluxo do pecíolo no momento em que o exsudado começava a sair na sua extremidade. Na figura 10 é possível verificar que a

relação obtida entre as medidas de potencial hídrico foliar feitas pelo método proposto e o método de referência de Scholander não diferiu estatisticamente da relação de 1:1 (representada no gráfico pela linha pontilhada).

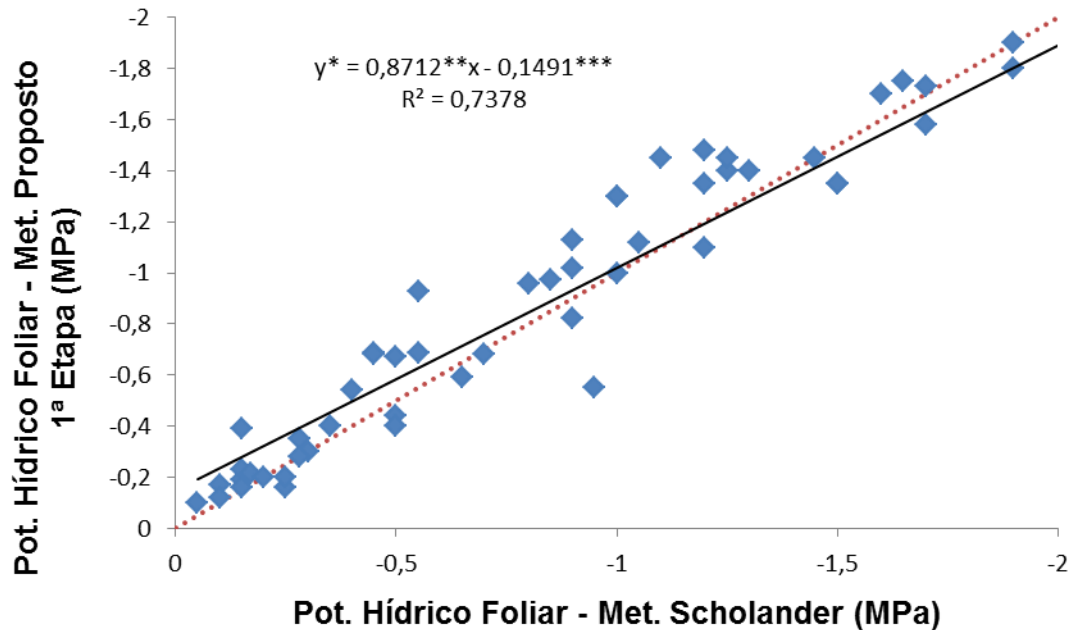


Figura 10: Gráfico de correlação entre as medidas de potencial hídrico foliar feitas pelo método proposto e as medidas obtidas pelo método de referência de Scholander. * - Modelo estatístico significativo em 1% de probabilidade pelo teste F. ** - Não difere de 1 pelo intervalo de confiança de 95% pelo teste t de Student. *** - Não difere de 0 pelo intervalo de confiança de 95% pelo teste t de Student.

Fonte: o autor (2017)

Esse resultado satisfatório fundamentou o depósito do pedido de patente de inovação tecnológica para o sistema proposto diante da possibilidade de se implementar uma automação nas medições de potencial hídrico foliar feitas com câmaras de pressão.

4.2 Medição do Potencial Hídrico Foliar – 2ª Etapa: folha intacta e folha destacada

A câmara de pressurização *in vivo* (CPIV) funcionou adequadamente durante as pressurizações de folhas intactas e também destacadas. Juntamente com o sensor de fluxo de seiva ela possibilitou avaliar o fluxo de seiva nas folhas intactas e nas folhas destacadas, bem como realizar a medição do potencial hídrico foliar das folhas destacadas pelo método de Scholander (figura 11).

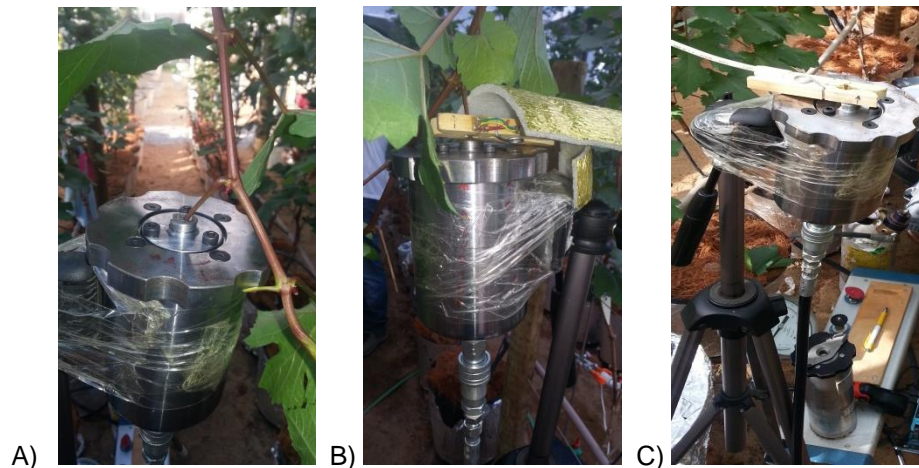


Figura 11: A) Detalhe da CPIV contendo a folha intacta. B) Câmara CPIV e sensor de fluxo de seiva com a folha intacta. C) CPIV e sensor de fluxo de seiva com a folha destacada.

Fonte: o autor (2017)

No teste hidrostático a CPIV não apresentou sinais de vazamento mesmo sob a pressão máxima aplicada que foi de 5,2 MPa. Durante a fase de testes preliminares na casa de vegetação, a nova câmara permitiu a inserção e pressurização de folhas intactas de videiras. No entanto, a temperatura do ambiente em torno de 35°C e a permanência da folha dentro da câmara por cerca de oito horas, fizeram com que a ela apresentasse alterações morfológicas que comprometeram sua estrutura natural (fig. 12A).

Em virtude desse fato, a temperatura da câmara teve que ser observada antes das medições seguintes e o tempo de permanência das folhas dentro da câmara teve que ser limitado a menos de uma hora. Após a adoção desses procedimentos, as folhas pressurizadas não apresentaram mais danos visíveis no limbo foliar após a sua retirada da câmara (fig. 12B). Sinais de estrangulamento

do pecíolo também não foram notados, pois o furo da borracha de vedação utilizada estava compatível com o diâmetro dos pecíolos avaliados.

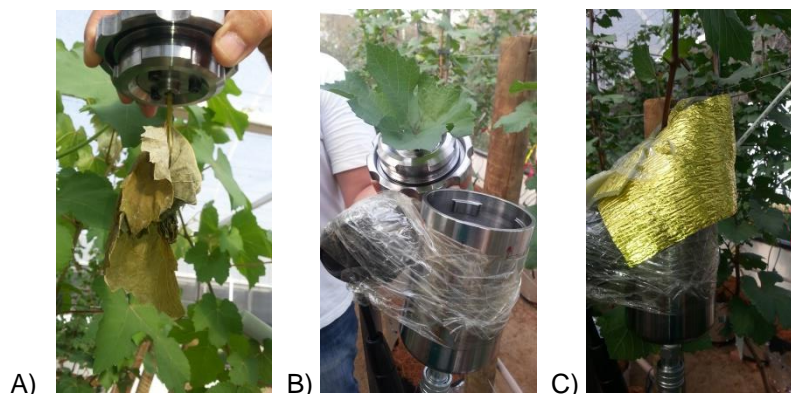


Figura 12: A). Detalhe da condição da folha após o primeiro teste de pressurização com a CPIV. B) Detalhe da condição da folha após as pressurizações com a CPIV durante a segunda etapa de medições do potencial hídrico foliar. C) Detalhe da capa protetora do sensor de fluxo de seiva com a conexão de engate rápido abaixo da câmara.

Fonte: o autor (2017)

O posicionamento vertical da câmara foi o que apresentou a menor perda de folhas no momento de inseri-las na câmara. Depois de adquirida prática com as primeiras medições na posição vertical, nenhuma folha foi descartada desnecessariamente no processo de inserção na câmara. O melhor desempenho foi obtido em função da maior agilidade e facilidade de manuseio dos parafusos e dos demais acessórios de vedação da tampa, bem como para a acomodação e posicionamento dos ramos das videiras (fig. 11A) e das capas isolantes térmicas (fig. 12C). A conexão de engate rápido também contribuiu no transporte e instalação dos equipamentos durante as medições (fig. 12C).

Os resultados dos testes feitos com a folha *in vivo* foram bem diferentes dos resultados obtidos nos testes com a folha destacada. As figuras 13 e 14 ilustram um exemplo da diferença entre os resultados obtidos pelo método proposto feito com uma folha intacta e posteriormente com a mesma folha destacada. Os dados do teste com a folha intacta foram apresentados no gráfico da figura 13, onde se pode observar que a temperatura entre os termopares

permaneceu estável em torno de 6,6 °C enquanto as pressões variaram de 0,0 MPa até um valor próximo de 0,06 MPa. Essa estabilidade na diferença de temperatura entre os termopares indicou que não estava ocorrendo fluxo de seiva dentro deste intervalo de pressão. Para valores de pressão acima de 0,06 MPa, iniciou-se uma redução acentuada na diferença de temperatura entre os termopares, indicando que estava ocorrendo um fluxo de seiva a partir dessa pressão.

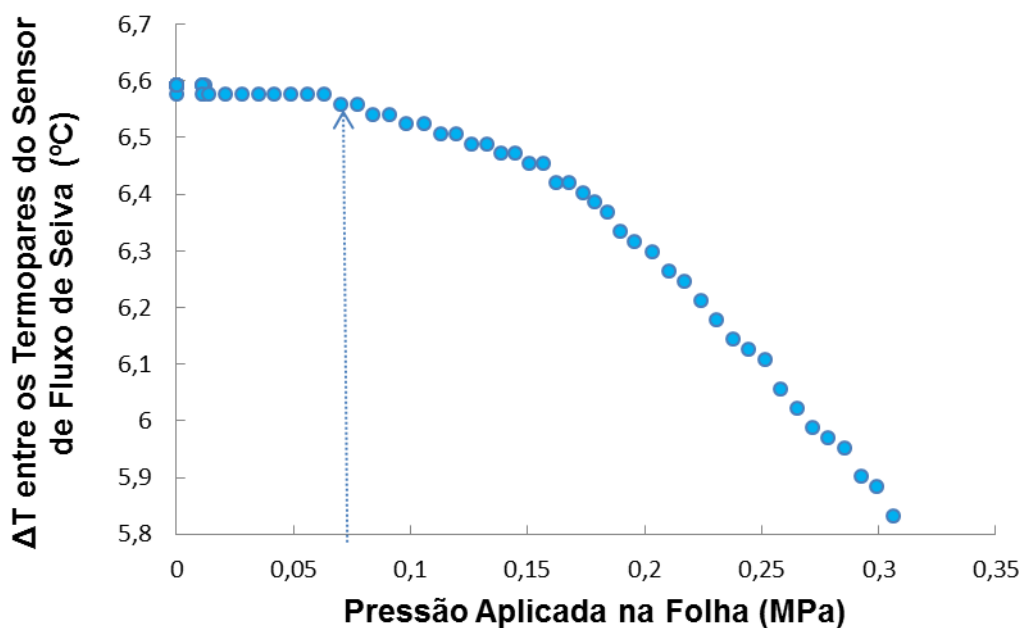


Figura 13: Gráfico da diferença de temperatura entre os termopares do sensor de fluxo de seiva em função da variação da pressão aplicada na câmara durante o teste com a folha intacta.

Fonte: o autor (2017)

Pelos critérios adotados no sistema proposto, o valor obtido para o potencial hídrico foliar na medição da figura 13 seria igual a -0,07 MPa, pois 0,07 MPa é a pressão medida imediatamente superior à pressão que deu início ao fluxo de seiva. No entanto, verificando o gráfico da figura 14, que apresenta a medição do potencial hídrico foliar feito com a mesma folha do teste da figura 13, porém com a folha destacada da videira, pode-se constatar que a variação da

temperatura entre os termopares ocorreu para pressões maiores do que 1,4 MPa, sendo -1,46 MPa um valor mais próximo do potencial hídrico foliar desta videira determinado com base na análise dos dados do sensor de fluxo de seiva e do transdutor de pressão. Além disso, a medição pelo método convencional de Scholander em uma folha anexa a esta, resultou no valor de -1,8 MPa. Esses resultados sugerem que o fluxo de seiva, que foi obtido com a pressurização da folha intacta, ocorreu em função de um gradiente de pressão cuja amplitude não corresponde ao potencial hídrico foliar desta folha.

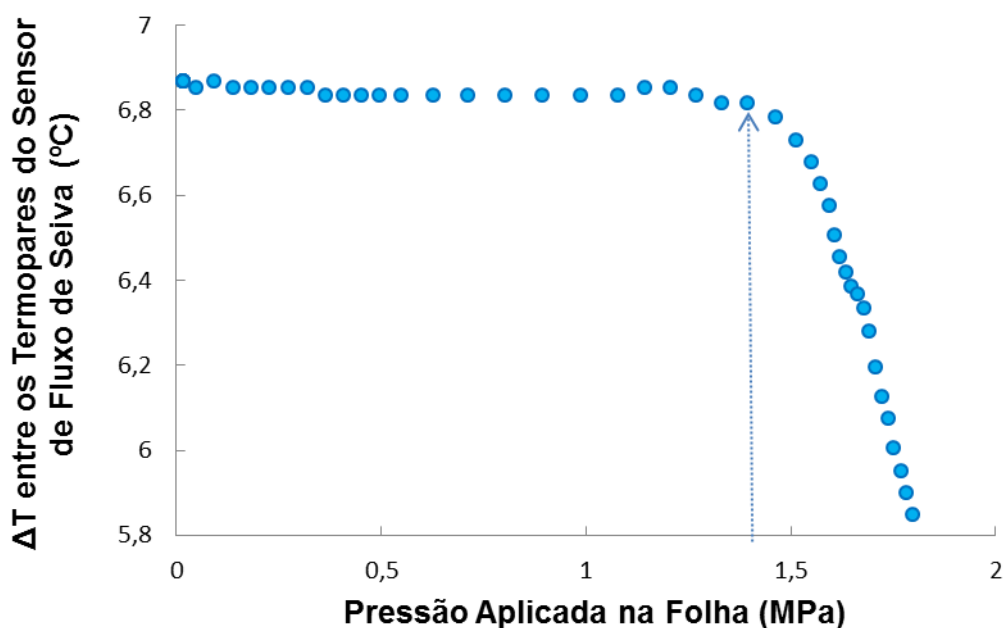


Figura 14: Gráfico da diferença de temperatura entre os termopares do sensor de fluxo de seiva em função da variação da pressão aplicada na câmara com a folha pré-testada destacada.

Fonte: o autor (2017)

Nessa segunda fase do projeto, todas as medições feitas pelo método proposto com a folha intacta tiveram comportamentos semelhantes aos observados na figura 13. O potencial obtido com a folha intacta se manteve sempre entre os patamares de pressão de -0,01 MPa a -0,1 MPa enquanto pelo método de referência de Scholander os valores variaram de -0,08 MPa até -1,8 MPa. A relação entre as medições feitas pelo método proposto com as folhas intactas e as que foram feitas pelo método de Scholander pode ser vista nos gráficos das figuras 15 e 16.

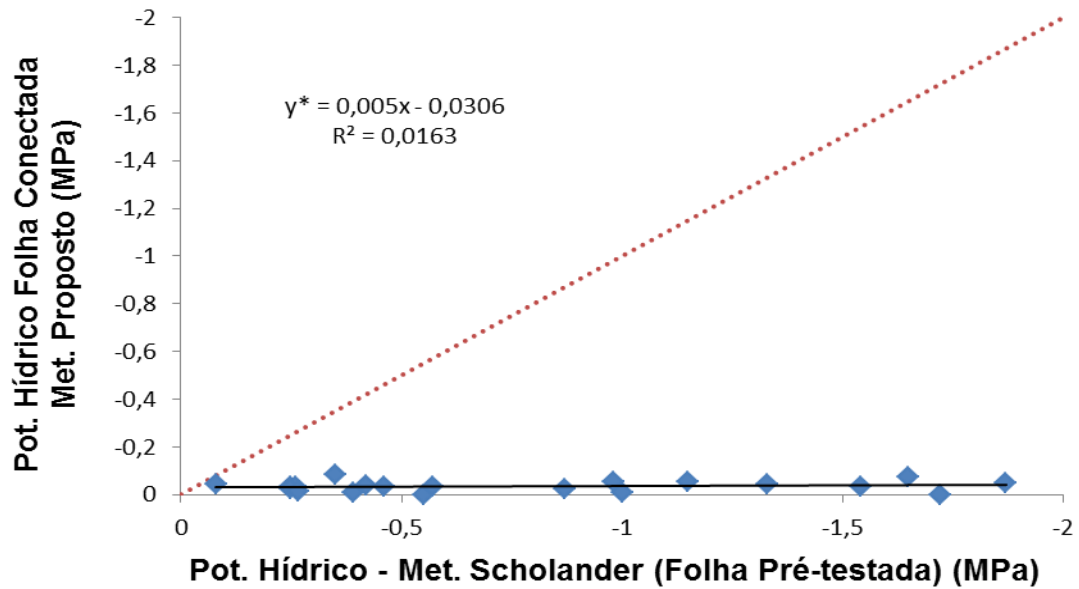


Figura 15: Gráfico da relação entre as leituras feitas com a folha intacta em função das leituras feitas pelo método de referência da Bomba de Scholander. * - Modelo estatístico não significativo em 5% de probabilidade.

Fonte: o autor (2017)

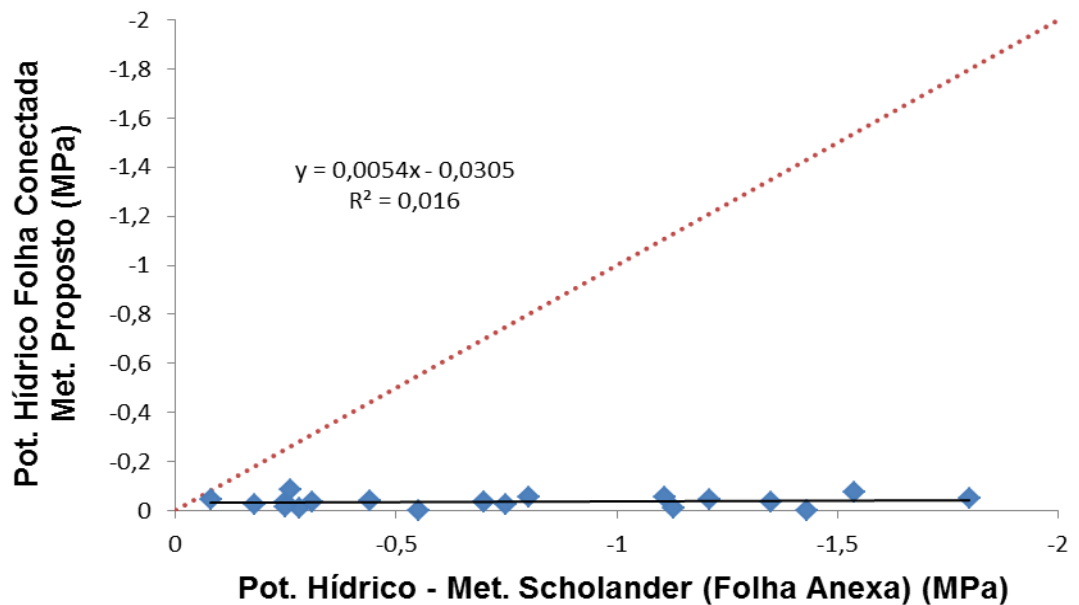


Figura 16: Gráfico da relação entre as leituras feitas com a folha intacta pelo método proposto e as leituras feitas pelo método de referência da Bomba de Scholander. * - Modelo estatístico não significativo em 5% de probabilidade.

Fonte: o autor (2017)

Como pode ser visto nas figuras 15 e 16, não foi possível identificar a correlação entre as medidas feitas pelo método proposto com os potenciais hídricos foliares quando a folha estava intacta. Não está totalmente descartada a possibilidade de que haja uma correlação da pressão capaz de promover o fluxo de seiva na folha intacta e o potencial hídrico da folha, porém os equipamentos utilizados no projeto apresentaram limitações para determinação de potenciais próximos de 0 MPa, o que inviabilizou a obtenção de dados mais precisos para uma análise mais completa dessa relação. Novas pesquisas, com equipamentos mais adequados para medições de potenciais próximos de 0,0 MPa, talvez possam detectar alguma correlação.

A interpretação destes resultados parte da compreensão de que as medições feitas com a pressurização de folhas indicam na verdade, a diferença de potencial (gradiente) entre o potencial da água retida na folha (Ψ_F) e o potencial na extremidade do pecíolo mais distante da folha, que no caso da folha destacada corresponde à pressão da atmosfera (0,0 MPa de pressão manométrica) e na folha intacta corresponde ao potencial do xilema (Ψ_X). O gradiente do potencial é que determina o movimento de um fluido e naturalmente um líquido sempre flui na direção do maior potencial para o menor potencial químico (Hsiao, 2004).

Quando a folha está destacada, a extremidade seccionada do pecíolo está submetida à pressão da atmosfera ambiente (em torno de +0,1MPa de pressão absoluta ou 0,0MPa de pressão manométrica), enquanto a água está retida na folha com uma tensão correspondente ao potencial hídrico foliar Ψ_F , cujo valor é negativo. Para que haja um fluxo de seiva do interior da folha para a extremidade seccionada do pecíolo, é necessário que seja aplicada uma pressão manométrica positiva na folha ligeiramente maior do que o Ψ_F , e com isso, as leituras da pressão na câmara com a folha destacada correspondem de fato ao módulo do potencial hídrico foliar Ψ_F , como observado, por exemplo, nas medições apresentadas nas figuras 10, 14 e 17.

A hipótese para a explicação dos resultados obtidos com a folha intacta é de que quando a folha está nessa condição, a extremidade do pecíolo está conectada ao xilema, que possui um potencial hídrico xilemático Ψ_X , cujo valor também é negativo. Neste caso, para que haja fluxo de seiva, a pressão aplicada à folha somada com o Ψ_F deve ser ligeiramente maior do que o Ψ_X . Como o

sensor de fluxo de seiva detectou movimento de fluido mediante pressões muito pequenas na câmara, em torno de 0,4 a 1,0 MPa, o que sugere que a diferença entre o Ψ_F e o Ψ_X neste caso também era muito pequena e correspondia aos valores -0,4 a -1,0 MPa, que são os mesmos obtidos porém com o sinal negativo, como observado nas medições apresentadas nas figuras 13, 15 e 16.

O resultado descrito acima é coerente, pois segundo estudos feitos por diversos pesquisadores, quando a folha encontra-se durante certo tempo em ambiente escuro, com umidade relativa do ar alta (como é o caso da folha na câmara durante os testes), os estômatos se fecham e permitem que haja uma equalização dos potenciais hídricos da folha e do xilema na planta (Ψ_X) (Choné et al., 2001). Logo, quando a folha estava intacta e o método proposto mediu a diferença entre os potenciais da folha e do xilema ($\Psi_F - \Psi_X$), é razoável que tenham sido encontrados valores próximos de zero, pois os potenciais da folha e do xilema deveriam estar aproximadamente iguais.

As medições com as folhas destacadas nessa etapa foram feitas exclusivamente com a CPIV e foram semelhantes às obtidas na primeira etapa de medições, em que foi utilizada a câmara da Soilmoisture. No gráfico da figura 17 pode-se verificar que houve uma boa correlação entre os potenciais das folhas pré-testadas e os potenciais das folhas anexas. O termo “folhas pré-testadas” foi utilizado para identificar as folhas que já haviam sido submetidas à pressurização quando estas ainda estavam intactas nas videiras. A relação próxima da reta de 1:1 (linha pontilhada) e os dados estatísticos (fig.17) demonstra que a CPIV é adequada para medições de potencial hídrico pelo método de Scholander.

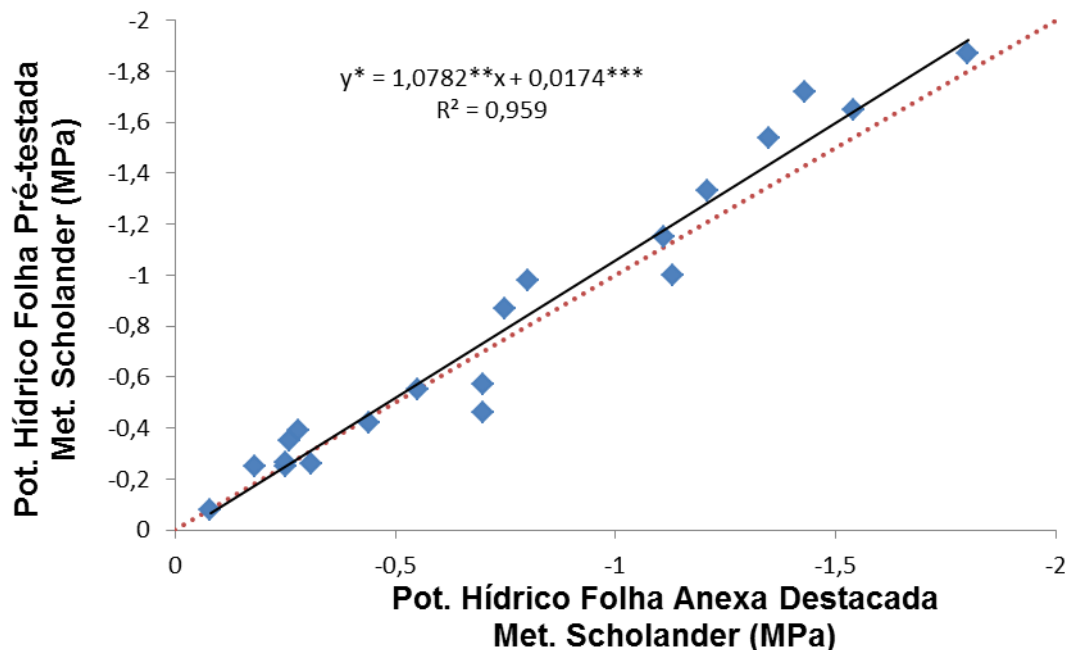


Figura 17: Gráfico da correlação entre os potenciais hídricos das folhas pré-testadas e das suas folhas anexas mais próximas da base. * - Modelo estatístico significativo em 1% de probabilidade pelo teste F. ** - Não difere de 1 pelo intervalo de confiança de 95% pelo teste t de Student.*** - Não difere de 0 pelo intervalo de confiança de 95% pelo teste t de Student.

Fonte: o autor (2017)

Os resultados obtidos pelo método proposto para a determinação do potencial hídrico foliar da folha destacada utilizando a nova câmara de pressão CPIV apresentaram correlação diferente a que foi obtida na primeira etapa de medições. Enquanto na primeira etapa pode-se considerar que estatisticamente a relação entre as medidas do método proposto e o de Scholander não difere da relação de 1:1 (fig. 10), nos gráficos das figuras 18 e 19 pode-se verificar que as relações obtidas diferem estatisticamente da relação de 1:1, pois nos dois gráficos os coeficientes angulares das retas de regressão linear são menores do que 1.

A redução do coeficiente angular nas figuras 18 e 19 pode ter ocorrido principalmente por conta do vazamento de gás no momento das pressurizações devido à falta de um ajuste mais preciso no aperto da borracha de vedação central, no entanto outros fatores ambientais como temperatura e vento também podem ter influenciado as medições. A suspeita da influência do vazamento de gás nas leituras está fundamentada no fato de que a maioria das leituras feitas

com o sensor de fluxo de seiva nestes casos encontrava-se abaixo da reta de relação 1:1, indicando que essas medidas foram inferiores às constatadas pelo método de Scholander.

A hipótese é de que como os termopares são sensores de temperatura muito sensíveis, um fluxo de ar frio, por menor que seja, pode ter induzido leituras de temperatura reduzidas enquanto eles estavam em contato com o pecíolo da folha pressurizada, gerando medidas subestimadas. Por outro lado, o método de Scholander, por ser visual, é imune à influência de correntes de ar e, por isso não teve suas leituras afetadas pelos vazamentos. Esses dois fatores combinados explicam o valor do coeficiente angular dos gráficos 18 e 19 inferior a 1.

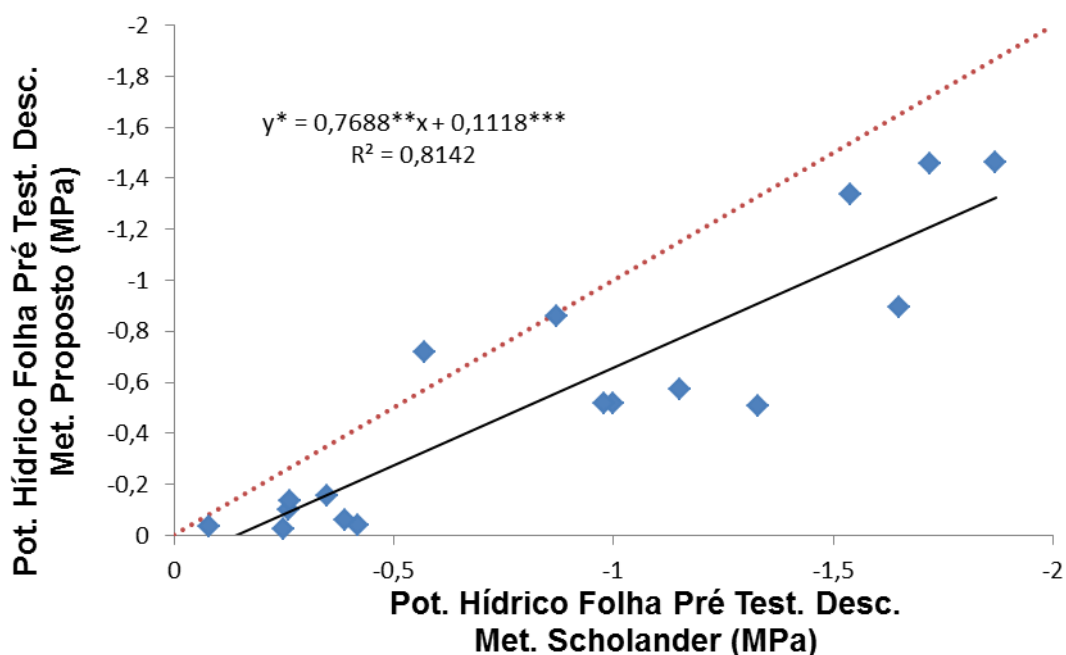


Figura 18: Gráfico da relação entre os potenciais hídricos foliares medidos pelo método proposto e os potenciais obtidos pelo método de referência de Scholander. *Modelo estatístico significativo em 1% de probabilidade pelo teste F. **Difere de 1 pelo intervalo de confiança de 95% pelo teste t de Student. ***Não difere de 0 pelo intervalo de confiança de 95% pelo teste t de Student.

Fonte: o autor (2017)

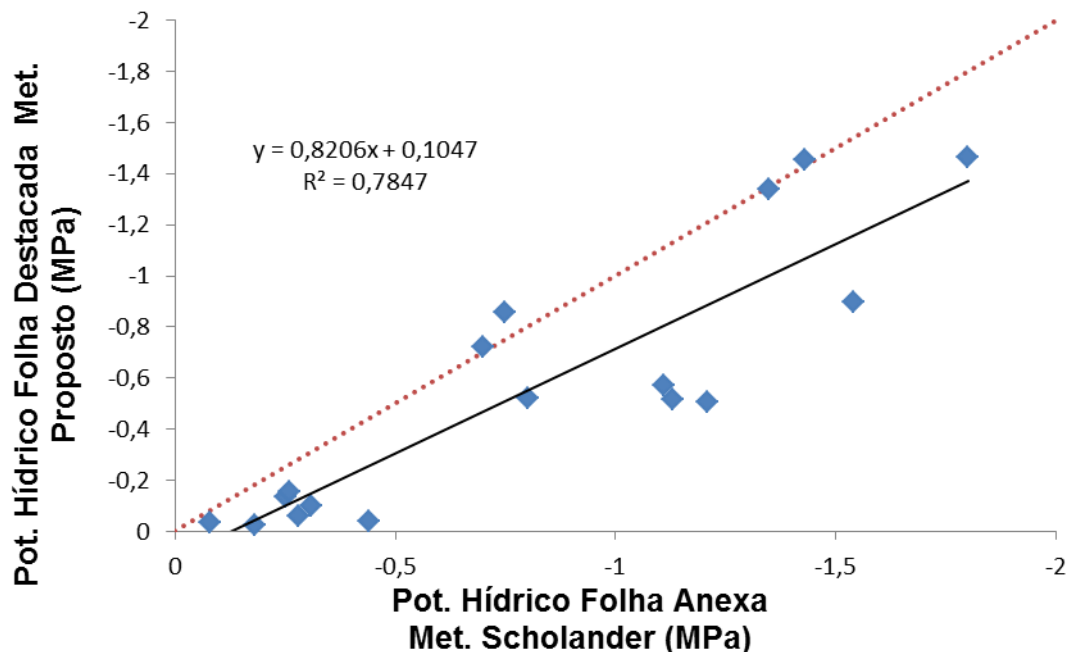


Figura 19: Gráfico da relação entre os potenciais hídricos foliares obtidos com o método proposto e os potenciais obtidos utilizando o método de referência de Scholander (aplicado nas folhas anexas). * - Modelo estatístico significativo em 1% de probabilidade pelo teste F. ** - Difere de 1 pelo intervalo de confiança de 95% pelo teste t de Student. *** - Não difere de 0 pelo intervalo de confiança de 95% pelo teste t de Student.

Fonte: o autor (2017)

Como o modelo estatístico da relação entre o método proposto e o de Scholander apresentado nas figuras 18 e 19 foi significativo estatisticamente em 1% pelo teste F, pode-se considerar que o método proposto é válido para a medição do potencial hídrico foliar com a folha destacada.

Por meio das experiências desenvolvidas na primeira e segunda etapa de medições dessa dissertação, cabe ressaltar que o sistema proposto para medição de potencial hídrico foliar, utilizando a tecnologia do sensor de fluxo de seiva em conjunto com a tecnologia da câmara de pressão apresentou resultados consistentes e promissores na determinação do potencial hídrico de folhas destacadas de videiras. E mediante os resultados obtidos com a folha intacta na segunda etapa de medições, o sistema desenvolvido foi capaz de constatar na prática, que o potencial hídrico na folha da videira é, de fato, muito semelhante ao do xilema quando a folha permaneceu mais de cinco minutos na ausência de luz

e sob alta umidade relativa do ar. Em todas as etapas, foi verificado que os termopares são extremamente sensíveis a influências ambientais, o que torna primordial a utilização de uma capa isolante térmica.

Atualmente o custo de uma câmara de pressão do tipo Scholander semelhante à do fabricante Soilmoisture que foi utilizada neste projeto pode chegar a valores próximos de R\$ 50.000,00 para o usuário final no Brasil. É um custo relativamente alto para entidades de pesquisa nacionais e muito elevado para os produtores rurais utilizarem para manejo de irrigação. O sistema proposto, considerando o sensor desenvolvido, a CPIV, o registrador de dados e demais acessórios teve um custo de fabricação inferior a 40% do valor de uma câmara nova no mercado e poderia ser menor do que 20%, caso tivesse desenvolvido um controlador e registrador de dados específico para essa finalidade, ao invés de utilizar o registrador CR1000, que por si só representa um custo em torno de R\$ 10.000,00.

Nesse processo também foi importante a identificação e o desenvolvimento de fornecedores na indústria do setor metal mecânico regional com capacidade de suprirem as demandas fabris da tecnologia do sensor de fluxo de seiva e da tecnologia da câmara de pressão, agregando como ganho indireto da dissertação, a oportunidade de nacionalização de tecnologia e produção de inovação tecnológica decorrente da incorporação do sensor de fluxo de seiva com a nova câmara de pressurização *in vivo*, CPIV.

O sensor de fluxo de seiva desenvolvido é diferenciado dos demais sensores existentes pela sua alta capacidade de detectar o exsudado no pecíolo de uma folha, por funcionar apenas com o contato superficial, sem a necessidade de inserções no tecido vegetal e pela praticidade de instalação. Já a CPIV se difere das demais câmaras de pressão existentes no mercado porque essas permitem apenas medições com as folhas destacadas, enquanto a CPIV pode pressurizar folhas intactas e as folhas destacadas. Além disso, a CPIV também poderá ser utilizada para avaliações em outras culturas, desde que sejam confeccionados acessórios adequados para tampa como, por exemplo, a borracha de vedação central com furos para pecíolos mais finos ou mais grossos, permitindo inclusive a pressurização de ramos quando o comprimento do pecíolo for muito curto, como é o caso das folhas do cafeeiro, por exemplo.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo desenvolver uma instrumentação e uma metodologia capazes de medir e monitorar o potencial hídrico foliar de videiras integrando as tecnologias já consolidadas de câmara de pressão e metodologia de Scholander com a tecnologia do sensor de fluxo de seiva desenvolvido na UENF, fundamentado na necessidade de ampliar os recursos de instrumentação disponíveis para realizar o manejo de irrigação a fim de aumentar a eficiência do uso da água.

O sistema desenvolvido foi capaz de detectar o efluxo da seiva de uma folha, estando ela destacada ou não, em diferentes níveis de estresse hídrico da videira. Houve correlação próxima da relação 1:1 entre as medidas do potencial hídrico foliar feitas a partir da instrumentação desenvolvida e o método de Scholander com a folha na condição destacada. Não foi possível determinar a correlação entre as medidas do potencial hídrico foliar feitas a partir da instrumentação desenvolvida e o método de Scholander com a folha intacta.

O método proposto mediu a diferença entre os potenciais da folha e da planta quando a folha estava intacta e foi constatado que essa diferença é próxima de zero, o que sugere que os potenciais da folha e da planta devem estar aproximadamente iguais ou pouco diferentes. Também foi constatado que o equipamento desenvolvido é muito sensível às variáveis climáticas e novas pesquisas devem ser feitas com o objetivo de aprimorar o equipamento e torná-lo mais robusto e confiável.

Os trabalhos de pesquisas para desenvolvimento de uma instrumentação capaz de medir o potencial hídrico foliar *in vivo* são de fundamental importância para aumentar o uso eficiente da água, pois se espera que essas medições sejam mais precisas do que os métodos com a folha destacada.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Rome*: FAO. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Andrade, C., Borges Junior, J. C. F., Couto, L. (2008) Características físico-hídricas e dinâmica de água no solo. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O.M. (Ed.). *Uso e manejo de irrigação*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 71-149.
- Apostila Relações Hídricas, Universidade Federal do Ceará (UFC). Disponível em: http://www.fisiologiavegetal.ufc.br/APOSTILA/RELACOES_HIDRICAS.pdf. Acesso em: 10/03/2017
- Bacchi, O. O. S., Reichardt, K., Calvache, M. (2000) Sonda de neutrones y gamma: sus aplicaciones em Agronomia. *Viena*: OIEA, 97p.
- Balling A., Zimmermann U. (1990) Comparative measurements of the xylem pressure of *Nicotiana* plants by means of the pressure bomb and pressure probe. *Planta* 182:325-338.
- Bassoi, L. H., Nascimento, P. S., (2012) Uso do tensiômetro de punção e do tensiômetro digital. *Instruções Técnicas da Embrapa Semiárido Petrolina*.
- Bennett, J. M. (1990) Problems Associated with Measuring Plant Water Status. *Hortscience*. Vol. 25(12).

- Blum, A. (2011) Plant Water Relations, Plant Stress and Plant Production Plant Breeding for Water-Limited Environments, Chapter 2, DOI 10.1007/978-1-4419-7491-4_2, © Springer Science+Business Media, LLC.
- Boyer, J. S. (1967) Matric Potentials of Leaves. *Plant Physiol.* 42, 213-217.
- Burgess, S.S.O. e Dawson, T.E. (2008) Using branch and basal trunk sapflow measurements to estimate whole-plant water capacitance: a caution. *Plant and Soil*, v.305, p.5-13.
- Calbo, A. G., Silva, W. L. C. (2006) Gaseous irrigation control system: descriptions and physical tests for performance assessment. *Bragantia*, Campinas, v. 65, n. 3, p. 501-510.
- Cermák, J., Kuèera, J., Nadezhdina, N. (2004) Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*, v.18, p.529-546.
- Choné X., Leeuwen, C. V., Dubourdieu, D. and Gaudilleáre, J. P. (2001) Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. *Annals of Botany Company Annals of Botany* 87: 477±483, doi:10.1006/anbo.2000.1361, available online at <http://www.idealibrary.com> on.
- Costa, A. R (2001) As Relações Hídricas das Plantas Vasculares (2ª Parte), Departamento de Biologia Universidade de Évora Portugal. Disponível em: <http://www.angelfire.com/ar3/alexcosta0/RelHid/Rhw2.htm>. Acessado em 08/04/2017.
- Ding, Y., Zhang, Y., Zheng, Q., Tyree, M. T, (2014) Pressure–volume curves: revisiting the impact of negative turgor during cell collapse by literature review and simulations of cell micromechanics. *New Phytologist*, Vol.203(2), pp.378-387.
- Dixon, M. A., Tyree, M. T. (1984) A new stem hygrometer, corrected for temperature gradients and calibrated against the pressure bomb. *Plant, Cell and Enviromnent* 7, 693-697.
- Esteves, B. S., Mendonça, J. C., Sousa, E. F., Bernardo, S. (2010) Avaliação do Kt para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.14, n.3, p.274–278.

- Esteves, B. S. (2013) Manejo de Irrigação: Técnicas Avançadas Utilizando a Planta como Indicadora do Momento de Aplicar Água na Cultura - *exame de qualificação no curso de pós-graduação em Produção vegetal da Universidade Estadual Darcy Ribeiro*.
- Evet, S.R., (2007) Soil water and monitoring technology. Irrigation of Agricultural Crops, 2nd ed., *Agronomy Monograph No. 30*.
- Granier A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières* 42:193-200.
- Ginestar, C., Castel, J.R. (1998) Use of stem dendrometers as indicators of water stress in drip-irrigated citrus trees. *Acta Horticulturae*, v.421, p.209-216.
- Gowda, P. H., Chávez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., Tolk, J. A. (2007) Remote Sensing Based Energy Balance Algorithms for Mapping Et: Current Status and Future Challenges. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50(5): 1639-1644.
- Haise, H. R.; Hagan, R. M. (1967) Soil, plant, and evaporative measurements as criteria of scheduling irrigation. Em: Hagan, R. M.; Haise, H. R.; Edminster, T. W. (Ed.). Irrigation of agricultural lands. Madison: *American Society of Agronomy*, p. 577-604. (Agronomy Series, 11).
- Heermann, D. F., Martin, D. L., Jackson, R. D., Stegman, E. C. (1990) Irrigation scheduling controls and techniques. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). Irrigation of agricultural crops. Madison: ASA: CSSA: SSSA. p. 509-535. (Agronomy, 30).
- Hsiao, T. C. (2004) Plant-Water-Soil Relationships, *Apostila do Curso Ciência da Hidrologia* (HYD 124), UC Davis California-US.
- Hopkins, W. G. (2000) *Introduction to Plant Physiology*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 512p.
- Jones, H. G. (2004) Irrigation scheduling: advantages and pitfalls on plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, London, GB, v. 55, n. 407, p. 2427-2436.
- Jones, H. G. (2013) Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. *Cambridge university press*.

- Jorge, L. A. C.; Inamasu, R. Y. (2015) Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em Agricultura de Precisão. Embrapa Instrumentação – São Carlos, SP. Disponível em:
<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1003485/1/CAP8.pdf>.
Acesso em: 27 Ago 2015.
- Létourneau, G., Caron, J., Anderson, L., Cormier, J. (2015) Matric potential-based irrigation management of field-grown strawberry: Effects on yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management* 161 102–113.
- Marouelli, W. A.; Oliveira, A. S.; Coelho, E. F., Nogueira, L. C., Sousa, V. F. (2011) Manejo da água de irrigação. In: Sousa, V. F., Marouelli, W. A.; Coelho, E. F., Pinto, J. M., Coelho F., M. A. (Org.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. 1ed. Brasília: *Embrapa Informação Tecnológica*, v. p. 157-232.
- Naime, J. M., Mattoso, L. H. C., Silva, W. T. L., Cruvinel, P. E., Neto, L. M., Crestana, S (2014) Conceitos e Aplicações da Instrumentação para o Avanço da Agricultura. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-*Embrapa Instrumentação*, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília-DF, Brasil.
- Naor, A. (1998) Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 73(4): 431-436.
- Naor, A. (2000) Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Horticulturae*, 537: 447-454.
- Oliveira, C. A. S., (1999) Determinação da Tensão de Água em Solo Agrícola Usando um Sensor de Dissipação de Calor. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.34, n.8, p.1417-1425.
- Pavez, R. G., Rodríguez, R. C. y Meza, G. R. (2011) Comparison of the Scholander type pressure chamber Pump-up model to the traditional pressure chamber in table grapes. *IDESIA* (Chile) Volume 29, Nº 2 maio-agosto. Páginas 175-179.
- Pereira, A. B., Shock, C. C.; Feibert, E. B., Lima, L., Fernandes, N. (2006) Monitoramento da irrigação por meio da tensão de água no solo. Ponta Grossa: UEPG, 20 p. (*Boletim Técnico*).
- Pereira, J. B. A. (2014) *Manual Prático de Irrigação*. EMATER-Rio.

- Pimentel, J. S., Silva, T. J. A., Junior, J. C. F. B., Folegatti, M. V., Montenegro, A. A. A. (2010) Estimativa da transpiração em cafeeiros utilizando-se sensores de dissipação térmica, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.14, n.2, p.187–195.
- PMS instrument Company. (2017) Pump-up Pressure Chamber. Disponível em <https://www.pmsinstrument.com/resources/pms-meaning-and-importance>. Acesso em 25 de mar de 2017.
- Ren, R., Liu, G., Wen, M., Horton, R., Li, B., & Si, B. (2017). The effects of probe misalignment on sap flux density measurements and in situ probe spacing correction methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 176-185.
- Rüger S., Ehrenberger W, Arend M, Geßner P, Zimmermann G, Zimmermann D, Bentrup F-W, Nadler A, Raveh E, Sukhorukov VL, Zimmermann U (2010) Comparative monitoring of temporal and spatial changes in tree water status using the non-invasive leaf patch clamp pressure probe and the pressure bomb. *Agricultural Water Management* 98:283-290.
- Sanders, D. C. (1997) Vegetable crop irrigation. Raleigh: North Carolina Cooperative Extension Service, 6 p. (Horticulture Information Leaflet, 33-E).
- Scholander, P.F., H.T. Hammel, E.D. Bradstreet, and E.A. Hemmingsen. (1965) Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148:339-346.
- Sellés, G.; Ferreira, R. y Maldonado, P. (2002) Cámara de presión: instrumento para controlar el riego a través de mediciones del estado hídrico de las plantas. *Aconex* 76: 18-26.
- Silva, L. C., Rao, T. V. R. (2006) Avaliação de métodos para estimativa de coeficientes da /cultura de amendoim. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.128-131.
- Skierucha, W. (2005) Design and performance of psychrometric soil water potential meter. *Sensors and Actuators A*, v. 118, p.86-91.
- Smar (2011), Aspectos de Instrumentação & Controle Automático de Processos. Apostila de treinamentos da fabricante Smar Automação Industrial. Acessado em 20/03/2017. Disponível em: http://www.smar.com/brasil/search_results?cx=011444786870388379001%3Ard_yrsmubus&cof=FORID%3A9&ie=UTF8&q=instrumenta%C3%A7%C3%A3o&sa=IR.

- Spanner, D.C. (1951) The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure, *Journal of Experimental Botany*, v.2, p.145-168.
- Sousa, E. F., Silva, M. G., Bernardo, S. (2009) Desenvolvimento de Sensor de Fluxo de Seiva, Calibração e Validação para Plantas de Cafeeiro Arábica, VI *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*.
- Souza, L.F. (2009) *Utilização da variação dendrométrica como indicador para o manejo da irrigação de plantas de café*. 65f. Dissertação (Mestrado). Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Waring, R. H., and B. D. Cleary. (1967) Plant moisture stress: evaluation by pressure bomb. *Science* 155: 1248-1254.
- Williams, L. y Trout, T. (2005) Relationships among vine-and soil-based measures of water status in a Thompson seedless vineyard in response high-frequency drip irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture* 56(4): 357-366.
- Torres, J. D.; Monteiro, I. O.; Santos, J. R.; Ortiz, M. S. (2015) Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados - *SCIENTIA PLENA*, Vol. 11, NUM. 2.
- Vellame, L.M. (2007) *Transpiração em plantas de laranja e manga utilizando sonda de dissipação térmica e sensor de balanço de calor caulinar*, 71f. Dissertação (Mestrado). Cruz das Almas. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.
- Yang, D., Pan, S., Tyree, M. T (2016) The impact of xylem cavitation on water potential isotherms measured by the pressure chamber technique in *Metasequoia glyptostroboides* Hu & W.C. *Cheng Journal Of Experimental Botany*, Vol. 67(15), pp.4571-4580.
- Zimmermann U, Råde H, Steudle E (1969) Kontinuierliche druckmessung in pflanzenzellen. *Naturwissenschaften* 56:634-634.
- Zimmermann, D., Reuss, R., Westhoff, M., Gessner, P., Bauer, W., Bamberg, E., Bentrup, F.W., Zimmermann, U. (2008) A novel, non-invasive, on line-monitoring, versatile and easy plant-based probe for measuring leaf water status. *J Exp. Bot*, v.59, p.3157-3167.