

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ROBERT LOUIS PAZZETO BARBOSA

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE DE BAIXO CUSTO
PARA APLICAÇÃO DE GÁS CO₂ EM CÂMARAS DE TOPO ABERTO
UTILIZADAS EM ESTUDOS DE ECOFISIOLOGIA VEGETAL**

VIÇOSA
2018

ROBERT LOUIS PAZZETO BARBOSA

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE DE BAIXO CUSTO
PARA APLICAÇÃO DE GÁS CO₂ EM CÂMARAS DE TOPO ABERTO
UTILIZADAS EM ESTUDOS DE ECOFISIOLOGIA VEGETAL**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Denílson Eduardo Rodrigues.

VIÇOSA
2018

ROBERT LOUIS PAZZETO BARBOSA

**IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE DE BAIXO
CUSTO PARA APLICAÇÃO DE GÁS CARBÔNICO EM CÂMARAS
DE TOPO ABERTO UTILIZADAS EM ESTUDOS DE
ECOFISIOLOGIA VEGETAL**

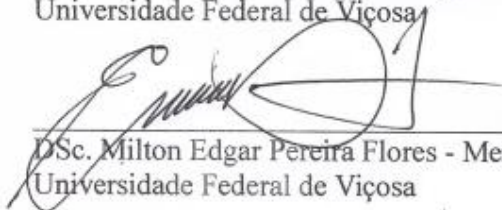
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 05 de dezembro de 2018.

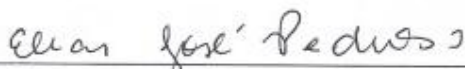
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Denilson Eduardo Rodrigues - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



DSc. Milton Edgar Pereira Flores - Membro
Universidade Federal de Viçosa



M.Sc. Elias José Pedroso - Membro
Universidade Federal de Viçosa

*“A base de toda a sabedoria é a obediência e o respeito ao Senhor.
Sim, quem conhece o Santo Deus tem a verdadeira compreensão da vida”
(Provérbios 9:10)*

A minha mãe, por seu magnífico amor.

Agradecimentos

A Deus, que por Sua graça oferece salvação gratuita a todos os que creem em Seu Filho Jesus Cristo. Ele renova Suas misericórdias sobre mim todas as manhãs, tem me sustentado, suprindo todas as minhas necessidades. Tudo neste mundo é passageiro. Trabalhem sim, porém conscientes de que os melhores tesouros estarão na eternidade.

A minha mãe, dona Maria, que trabalhando muito em sua máquina de costura conseguiu criar sozinha seus três filhos. Sua vida de luta sempre nos inspirou e os sucessos que nós temos hoje não seriam possíveis sem o seu cuidado. A Senhora, meu profundo respeito e admiração. Ao Jairo, meu padrastrô, homem generoso e trabalhador, o qual considero como pai. Ao meu irmão Wesley e a minha irmã Priscila, dois empreendedores que me enchem de orgulho. Aos sobrinhos Luís Filipe e Lavínia que vieram colorir nossa vida. Que privilégio ter cada um de vocês como minha família, amo a todos profundamente.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFV, a todos os professores que tive o prazer de conhecer e que me ajudaram compartilhando seus conhecimentos. Ao orientador Prof. Denilson, pela atenção dispensada na elaboração deste trabalho. A todos os senhores, todo meu respeito e gratidão.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola, pelos trabalhos que tenho feito por lá em quase 10 anos. Em especial ao prof. Dr. Aristides Ribeiro, um ser humano de grande coração e valor, que acredita no meu trabalho. Ao Dr. Milton Edgar Pereira Flores, o qual tenho a honra conhecer e trabalhar nos últimos anos, me incentivando a batalhar e prosperar. Ao caro Elias José Pedroso, homem de visão e esforçado em tudo o que faz, de pela disposição em participar da banca.

Aos queridos irmãos da Primeira Igreja Batista de Viçosa. Estimado pastor Sérgio e esposa Ângela, que me acompanham desde quando cheguei em Viçosa e me ajudaram em muitos momentos difíceis que passei. A querida Meire Rute e família, que sempre esteve presente na caminhada. Ao querido casal Cecílio e Fabiane, ao grande amigo Betinho e vários outros irmãos. Louvado seja nosso Deus por me dar a honra de ser igreja com vocês.

A todos vocês, muito obrigado!

Resumo

Em vista das mudanças climáticas previstas para as próximas décadas, com aumento significativo na concentração do gás carbônico (CO_2) atmosférico, torna-se necessário o estudo da resposta dos vegetais a essas mudanças. As câmaras de todo aberto (OTC, do inglês *Open-Top Chambers*) mostram-se adequadas para tais estudos, uma vez que se pode enriquecer a atmosfera interior com gás carbônico, além de poder recriar com boa fidelidade as condições naturais do habitat da planta. Entretanto, o controle da concentração de gás carbônico em OTCs normalmente é feito com a regulagem manual de registros, tornando difícil manter a concentração constante diante de distúrbios externos como rajadas de vento, mudanças de temperatura, respiração das plantas e até mesmo a destreza do operador. Este trabalho tem como objetivo apresentar um sistema de controle de CO_2 alternativo e de baixo custo, a fim de garantir a manutenção automática da concentração desse gás dentro de limites toleráveis mesmo na presença de distúrbios. Para tanto, foi construído um sistema composto basicamente por um sensor de CO_2 , uma bomba para injeção de gás e um microcontrolador, funcionando em malha fechada e usando a técnica de controle PID. O sistema foi instalado em uma OTC e ensaiado para três concentrações de CO_2 (650, 700 e 750 ppm). Comparou-se o desempenho do processo de aplicação de gás utilizando o sistema de controle proposto e o desempenho conseguido pelo controle manual da concentração de gás, através de comparação gráfica das curvas de CO_2 e velocidade do vento no interior da OTC, principal distúrbio da sobre o CO_2 . Os resultados mostram que o controlador melhorou a aplicação de gás na câmara porque manteve a concentração próxima aos níveis desejados, com variação muito menor em relação às obtidas na regulagem manual. Além disso, o sistema de controle proposto tem custo de até 98% menor, porque pode ser construído com peças equivalentes e relativamente baratas em comparação aos aparelhos de análise de CO_2 disponíveis no mercado.

Abstract

In view of the expected climatic changes for the next decades, with a significant increase in the concentration of atmospheric carbon dioxide (CO₂), it is necessary to study the response of plants to these changes. The Open-Top Chambers (OTC) chambers are suitable for such studies, since they can enrich the interior atmosphere with carbon dioxide, as well as being able to recreate with good fidelity the natural conditions of the plant's habitat. However, control of CO₂ concentration in OTCs is usually done by manually adjusting registers, making it difficult to maintain constant concentration in the face of external disturbances such as wind gusts, temperature changes, plant respiration, and even operator dexterity. This work aims to present an alternative and low cost CO₂ control system in order to ensure the automatic maintenance of the concentration of this gas within tolerable limits even in the presence of disturbances. In order to do so, a system was composed basically of a CO₂ sensor, a gas injection pump and a microcontroller, working in a closed loop and using the PID control technique. The system was OTC-listed and tested for three concentrations of CO₂ (650, 700 and 750 ppm). The performance of the gas application process was compared using the proposed control system and the performance achieved by the manual control of the gas concentration, by means of graphical comparison of the CO₂ and wind speed curves within the OTC, the main envelope disturbance or CO₂. The results show that the controller improved the gas application in the chamber because it maintained the concentration close to the desired levels, with much lower variation than those obtained in manual regulation. In addition, the proposed control system has a cost of up to 98% less, because it can be built with equivalent and actually inexpensive parts compared to the CO₂ analyzers available on the market.

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	As Mudanças Climáticas	13
1.2	A Câmara de topo aberto	14
1.2.1	Estrutura física da OTC	14
1.2.2	Sistema de injeção de gás CO ₂	15
1.3	Identificação de sistema e projeto de controlador por Ziegler-Nichols.....	16
1.3.1	Identificação de sistema em malha aberta	16
1.3.2	Sintonia do controlador PID	18
1.4	Instrumentação para um sistema de controle de gás CO ₂	19
1.4.1	IRGA – Analisador de gases por infravermelho	20
1.4.2	A bomba de injeção (injetora)	21
1.4.3	O microcontrolador	23
1.5	Objetivo	23
2	Materiais e Métodos	24
2.1	Montagem da OTC e instrumentação.....	24
2.1.1	A câmara de topo aberta utilizada	24
2.1.2	Construção do IRGA de baixo custo	24
2.1.3	O sistema de aplicação de gás	26
2.1.4	A coleta de dados.....	27
2.2	Identificação da OTC e projeto do controlador de gás CO ₂	27
2.2.1	O modelo da OTC pelo método de malha aberta	27
2.2.2	Sintonia do controlador PID para a OTC	28
3	Resultados e Discussões.....	24
3.1	Comparação entre os sistemas comercial e proposto	24
3.2	Teste de desempenho.....	30
4	Conclusões.....	34
	Referências Bibliográficas	35

Lista de Figuras

Figura 1 - Resposta à excitação degrau unitário de um sistema integrativo em malha aberta..	17
Figura 2 - Resposta à excitação degrau unitário de um sistema não integrativo em malha aberta.....	18
Figura 3 - Estrutura de um controlador PID.	18
Figura 4 - Diagrama do sistema de controle construído. As setas amarelas são mangueiras do sub-sistema de aplicação de gás e as vermelhas do sub-sistema de leitura do CO ₂ . As setas pontilhadas são conexões elétricas.....	19
Figura 5 - Desenho de um sensor de CO ₂ para analisadores de gás IRGA (Imagem original: F. Horváth, B. Wodala - Preliminary photosynthesis measurements of selected wheat cultivars prior to inoculation).....	21
Figura 6 - (a) Vista interna de um analisador IRGA, modelo LI-850, da LI-COR. (b) Módulo sensor de CO ₂ por difusão, modelo MH-Z14A, da TMOEC.....	22
Figura 7 - Mini bomba de diafragma para injeção de gás CO ₂ , marca KEYUKANG. 12 Volts DC, 8 l/min.....	23
Figura 8 - A câmara de topo abero utilizada nos testes. 1) Um dos dois ventiladores externos; 2) Campânula para proteger da chuva; 3) Coletor circular de gás.....	25
Figura 9 - Sistema de controle protótipo utilizado nos testes. 1) Sensor de CO ₂ Veris; 2) Microcontrolador Arduino; 3) Bomba de injeção; 4) Bomba de amostragem; 5) Sensor de temperatura e umidade; 6) Coletor circular; 7) Tubo PVC perfurado; 8) Cabo USB para coleta de dados.	26
Figura 10 - Resposta do sistema à excitação degrau operando em malha aberta.....	28
Figura 11 - Analisador de CO ₂ por infravermelho SBA-5, com invólucro AGA407, o qual é substituído pelo sensor de CO ₂ e pela bomba amostradora no sistema de controle alternativo.	30
Figura 12 - Montagem feita para os testes. 1) Ventilador no topo para simular entrada de vento na OTC; 2) Notebook para coleta de dados; 3) Anemômetro ultrassônico para medir a turbulência na altura do coletor; 4) Coletor circular de amostra de ar; 5) União do tubo perfurado com o ventilaor externo.	31
Figura 13 - Comparação entre as curvas de CO ₂ e velocidade do vento para o sistema funcionando em malha aberta (sem controle), com calibração inicial em 700 ppm.....	32
Figura 14 - Comparação entre as curvas de CO ₂ e velocidade do vento para o sistema controlado, em set point de 700 ppm, usando os parâmetros calculados por Ziegler-Nichols pelo teste de malha aberta.....	33
Figura 15 - Comparação entre as curvas de CO ₂ e velocidade do vento para o sistema controlado, em set point de 650 ppm, com os parâmetros PID ajustados para se obter o melhor desempenho.	33
Figura 16 - Comparação da planta em três níveis de CO ₂ , com parâmetros PID ajustados para obter o melhor desempenho nesses níveis, e também o desempenho inicial da planta sem contole.....	34

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Regas de sintonia Ziegler-Nichols para PID de sistema integrativo	19
Tabela 2 - Regas de sintonia Ziegler-Nichols para PID de sistema não integrativo.	19
Tabela 3 – Material básico para construção de um sistema de controle de gás CO ₂	29

1 Introdução

1.1 As Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas têm se mostrado reais ao longo dos anos através da observação dos fenômenos naturais em todo planeta. O Painel Intergovernamental das Alterações Climáticas (IPCC, 2013) indica que a temperatura da atmosfera e do oceano aumentou, as quantidades de neve e de gelo diminuíram, o nível do mar subiu e as concentrações de gases de efeito estufa aumentaram [01]. O dióxido de carbono (CO₂), ou simplesmente gás carbônico, é um dos gases que eleva o efeito estufa e sua liberação a nível prejudicial ocorre por conta de diversas atividades humanas e econômicas, entre elas o transporte, o desmatamento, a agricultura e a pecuária.

Segundo boletim da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) divulgado em outubro de 2016, a concentração de gás carbônico ([CO₂]) na atmosfera aumentou 45% em relação a era pré-industrial. Até os anos de 1750, a concentração que oscilava em torno de 280 ppm (partes por milhão) chegou a 403,3 ppm em 2016, nível recorde em 800 mil anos. Os cenários simulados pelo IPCC apontam níveis de CO₂ atmosférico em torno de 500 ppm para 2050 e 650 ppm até 2100. Conseqüentemente, a temperatura média do planeta Terra poderá aumentar até 2 graus em 2050 e até 6 graus em 2100 [01] [02]

Sabe-se que a concentração de CO₂ na atmosfera tem influência direta sobre a dinâmica dos ecossistemas terrestres, principalmente através de seu efeito sobre a fisiologia das plantas. Esse gás é o substrato primário da fotossíntese, portanto fator limitante para a produção de açúcares pela planta e, conseqüentemente, biomassa. Nessa expectativa, as respostas fisiológicas dos vegetais aos níveis elevados de CO₂ atmosférico previstos para as próximas décadas têm sido amplamente estudadas nos últimos 25 anos [03] [04].

1.2 A Câmara de topo aberto

Uma das formas de analisar o efeito do aumento da [CO₂] sobre as plantas é através das Câmaras de Topo Aberto (OTC, do inglês Open-Top Chambers). Embora não seja possível reproduzir perfeitamente um ambiente natural, no interior da OTC é possível recriar com boa fidelidade as condições ambientais de um local [5]. Além disso, permite manipular essas condições e até acrescentar outras, como a injeção de gases ou outros nutrientes. Dessa forma, a OTC torna-se uma ferramenta adequada para estudos de ecofisiologia relacionados a enriquecimento atmosférico com gás carbônico sobre vegetais.

1.2.1 Estrutura física da OTC

A OTC típica é uma estrutura metálica, circular, envolvida por filme plástico, com abertura no topo. As OTCs circulares encontradas na literatura possuem diâmetro variando de 1,5m a 4,5m e altura variando nessa mesma faixa. O formato cônico do topo tem a função de dificultar a entrada indesejada de vento externo no interior câmara, porque prejudica o gradiente de temperatura e a manutenção da [CO₂] na atmosfera interna [05].

Um exemplo de OTC retangular foi construída por Silva, com 1,4m de largura, 1,8m de comprimento e 2,5m de altura, sendo a altura dividida em módulos de 50cm cada. Silva concluiu que a OTC, quando modular, reduz o consumo de CO₂, diminuindo o custo experimental quando se deseja obter uma atmosfera com alta concentração de CO₂. Os módulos são acrescentados ao longo do experimento conforme o crescimento das plantas [06].

Uma campânula pode ser instalada no topo da OTC para impedir a entrada de chuva nos casos em que a umidade do solo precisar ser controlada. No entanto, o uso dessa cobertura na OTC e até mesmo o formato cônico do topo devem ser utilizados com cautela, porque reduzem a radiação solar interna da câmara [05] [06].

O processo de troca de ar com o meio externo é realizado por ventilação forçada aplicada na base da câmara e há pelo menos duas formas para isso. Na primeira, um ventilador externo injeta o ar em um colchão circular (também chamado de “plenun”), cuja camada interna é de plástico perfurado com furos igualmente espaçados. De outra forma, o ventilador é acoplado a um tubo de PVC perfurado que contorna o perímetro interno da base da câmara [06].

Sensores de temperatura/umidade relativa do ar podem ser instalados para monitorar o microclima interno, assim também sensores de radiação solar, concentração de gases, entre outros, dependendo das variáveis envolvidas no estudo em questão.

1.2.2 Sistema de injeção de gás CO₂

A maioria dos experimentos que utilizam OTCs com dióxido de carbono enfrentam a grande dificuldade na manutenção da [CO₂] ao longo do dia, isso por causa de variações na temperatura e umidade relativa do ar que alteram a difusão e a mistura do gás. Além do mais o aumento da temperatura causa dilatação dos orifícios de passagem, alterando o fluxo de CO₂ nos reguladores de pressão e registros de calibração. A entrada de rajadas de vento no topo da OTC é outro problema, porque dilui o CO₂ interno e faz a concentração diminuir consideravelmente. A presença de ventos é o que mais atrapalha a manutenção do CO₂. Por outro lado, equipamentos para realizar a automatização da aplicação de gás normalmente são caros e difíceis de encontrar, e não existe um aparelho *plug-and-play* para tal finalidade. Alguns obstáculos para implantar um sistema automatizado são: o alto custo do analisador de gás, o qual faz as leituras da concentração do CO₂ na OTC; a dificuldade em liberar o gás de forma linear; e como efetuar a leitura do CO₂ sem grandes variações/ruídos que dificultem a ação de um controlador.

O sistema de gás não automatizado normalmente é composto por um cilindro de CO₂ com um regulador de pressão ligado na saída da válvula do cilindro. Uma mangueira faz a ligação entre a saída do regulador e um registro de ajuste fino, para que se possa regular com maior precisão a quantidade de gás liberada. Em alguns casos acrescenta uma válvula solenoide elétrica entre o regulador de pressão e o registro de ajuste fino, para que um timer ligue e desligue o gás em horários programados. Uma mangueira ligada na saída do registro de ajuste fino leva o gás até a saída de ar do ventilador, de forma que o ar entre na OTC enriquecido com CO₂. A quantidade de gás injetada depende da concentração que se deseja obter na atmosfera interna e também da presença de perturbações externas, como a presença dos ventos e as mudanças na temperatura e umidade do ar.

A verificação da concentração interna de CO₂ pode ser feita utilizando-se um sensor de CO₂ portátil colocado diretamente no interior da OTC na altura da vegetação, ou pode ser feita com o uso de um analisador IRGA (Subseção 1.4.1) externo a câmara. Na calibração manual, a abertura do registro de ajuste fino (quantidade de gás injetada) é cuidadosamente

feita até que a leitura de CO_2 se estabilize na concentração desejada. Esse tipo de regulação manual é demorada porque precisa-se aguardar a estabilização da mistura de gás em cada grau de abertura, além de ser pouco duradora por conta das perturbações externas que vão desregulando a calibração inicial ao passar das horas, exigindo novas regulações ao longo do dia a fim de manter a concentração de CO_2 em níveis satisfatórios. Um método automático de injeção de gás facilitaria a operação do sistema e garantiria a manutenção da concentração de CO_2 ao longo do tempo, ou pelo menos variando em uma faixa aceitável e não prejudicial as plantas.

1.3 Identificação de sistema e projeto de controlador por Ziegler-Nichols

A modelagem do sistema físico que se deseja controlar é a tarefa inicial que antecede o projeto do controlador. Na etapa da modelagem, deve-se relacionar o comportamento físico do sistema a um conjunto de equações matemáticas que o descrevem. Embora o procedimento adequado seja determinar analiticamente tais equações, muitas vezes tal tarefa é impossível de ser realizada, seja por causa da complexidade do processo em questão ou devido a relações pouco conhecidas entre as variáveis que o compõem. Dessa forma, métodos alternativos devem ser aplicados para obtenção de um modelo satisfatório. Uma delas é a observação da relação entre a excitação aplicada à entrada e a resposta obtida na saída com o sistema em malha aberta (MA), de onde se pode inferir uma função de transferência (FT) para o processo que se deseja controlar. Esse método, denominado “modelagem não paramétrica de sistema dinâmico”, normalmente baseia-se na curva de resposta ao degrau unitário para sistemas dinâmicos operando em malha aberta, cuja FT é aproximada a de sistemas de primeira ordem. Os mesmos dados obtidos para modelagem da planta também são usados para sintonizar um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) incorporado à malha, através do método de sintonia Ziegler-Nichols, desenvolvido por John G. Ziegler e Nathaniel B. Nichols (1942) [07] [08].

1.3.1 Identificação de sistema em malha aberta

Tendo em vista a modelagem experimental de uma planta, cujo modelo é aproximado a função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte, a aplicação de uma excitação degrau fornece como resposta uma curva de reação para operação em MA. O

formato da curva de reação pode ser de dois tipos, mostrando um sistema com componente integrativo ou sem componente integrativo. A Figura 1 ilustra o comportamento característico de um sistema integrativo, a qual cresce indefinidamente sem estabilizar em torno de um valor [09].

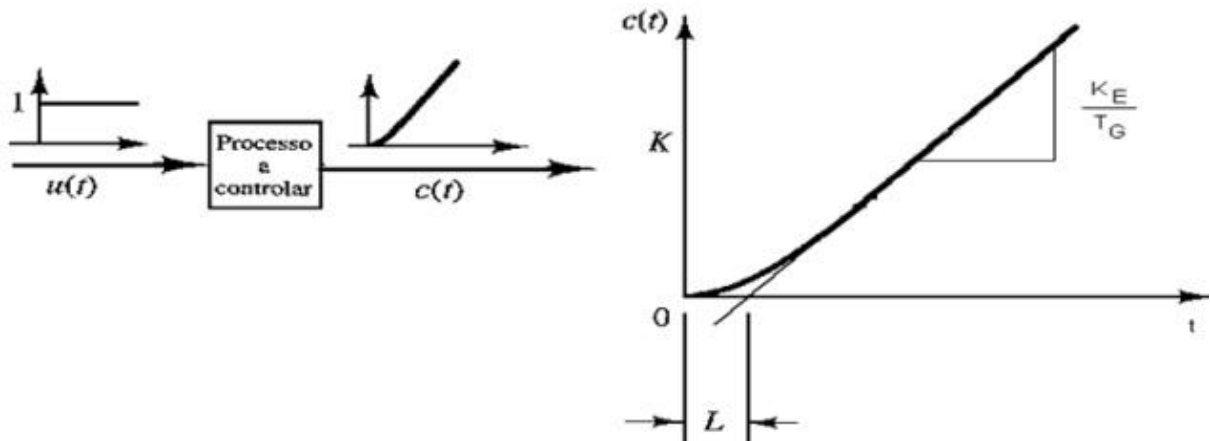


Figura 1 – Resposta à excitação degrau unitário de um sistema integrativo em malha aberta.

Neste caso, Ziegler-Nichols sugere uma função de transferência do sistema aproximada por

$$G_P(s) = e^{-Ls} \cdot \frac{K}{T_S} \quad (1.1)$$

A Figura 2 ilustra um sistema de comportamento não integrativo onde a principal característica é a curva em “S”, com L sendo o atraso de transporte, T é a constante de tempo e K_E é o ganho da planta em malha aberta, ou seja $K_E = Y(s)/U(s) = K_E/U(s)$. O trabalho de Ziegler e Nichols conclui que a FT pode ser aproximada pela equação 1.2 [09]

$$G_P(s) = e^{-Ls} \cdot \frac{K}{1 + Ts} \quad (1.2)$$

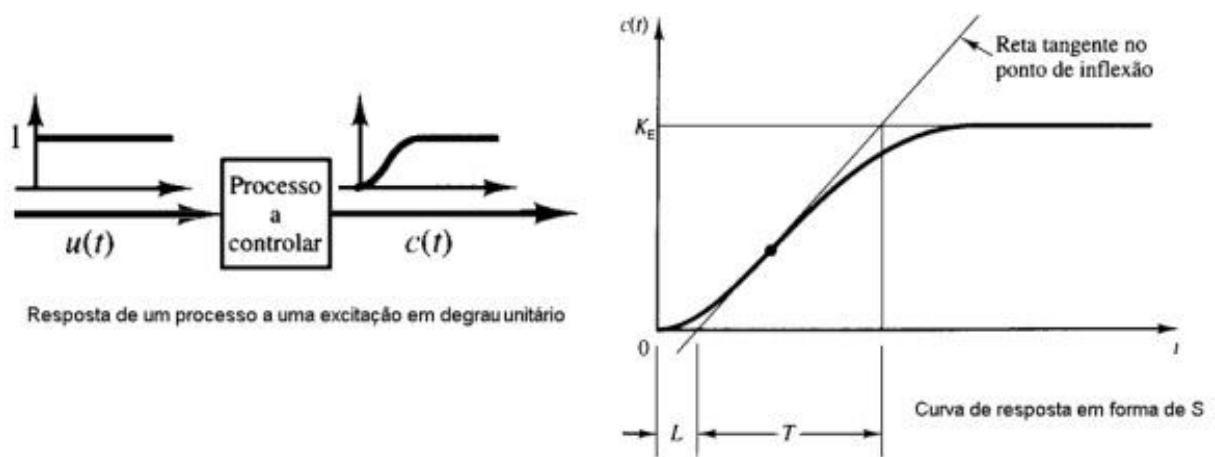


Figura 2 – Resposta à excitação degrau unitário de um sistema não integrativo em malha aberta.

1.3.2 Sintonia do controlador PID

Por causa de sua simplicidade, facilidade de sintonia dos parâmetros e atendimento satisfatório das especificações do processo, o controlador PID tem grande aceitação na indústria. A estrutura de um controlador PID é mostrada na Figura 3. Este é formado por um controlador proporcional (P), um controlador integral (I) e um controlador derivativo (D). A função de transferência do PID é dada por

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.3)$$

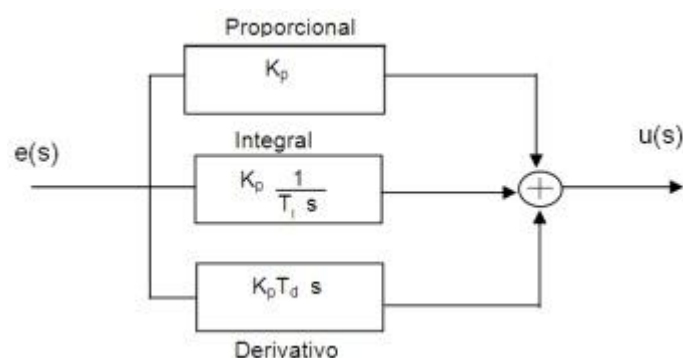


Figura 3 – Estrutura de um controlador PID.

Considerando os dados experimentais de malha aberta do processo identificados na subseção 1.3.1, as regras de Ziegler-Nichols sugerem os parâmetros da Tabela 1 para o a

sintonia do controlador do sistema integrativo e os parâmetros da Tabela 2 para sistema não integrativo [08] [09].

Tipo de controlador	Função de transferência	K_p	T_i	T_d
<i>P</i>	K_p	$\frac{1}{\frac{KL}{T_G}}$	máximo	0
<i>PI</i>	$K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$	$\frac{0,9}{\frac{KL}{T_G}}$	$\frac{L}{0,3}$	0
<i>PID</i>	$K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$	$\frac{1,2}{\frac{KL}{T_G}}$	$2L$	$0,5L$

Tabela 1 – Regas de sintonia Ziegler-Nichols para PID de sistema integrativo.

Tipo de controlador	Função de transferência	K_p	T_i	T_d
<i>P</i>	K_p	$\frac{T}{KL}$	máximo	0
<i>PI</i>	$K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$	$\frac{0,9T}{KL}$	$\frac{L}{0,3}$	0
<i>PID</i>	$K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$	$\frac{1,2T}{KL}$	$2L$	$0,5L$

Tabela 2 – Regas de sintonia Ziegler-Nichols para PID de sistema não integrativo.

1.4 Instrumentação para um sistema de controle de gás CO₂

O sistema de controle da aplicação de gás CO₂ é composto por alguns dispositivos essenciais que são: o aparelho que faz a leitura da concentração de CO₂ na câmara (IRGA), o atuador que age abrindo e fechando o gás e o dispositivo que contém o algoritmo controlador. Em resumo, o controlador faz a leitura do sensor e, baseado em seu algoritmo, envia um sinal para liberar mais ou menos gás no atuador. Itens como reguladores de pressão, válvulas, fontes e dispositivos de interface elétrica, entre outras, também somam no conjunto, porém são acrescentadas conforme o método e material adotados em cada experimento. Muitas vezes algumas peças são desenvolvidas para atender uma demanda específica, como ocorreu no experimento deste estudo. A Figura 4 apresenta o diagrama do sistema de controle construído para este trabalho.

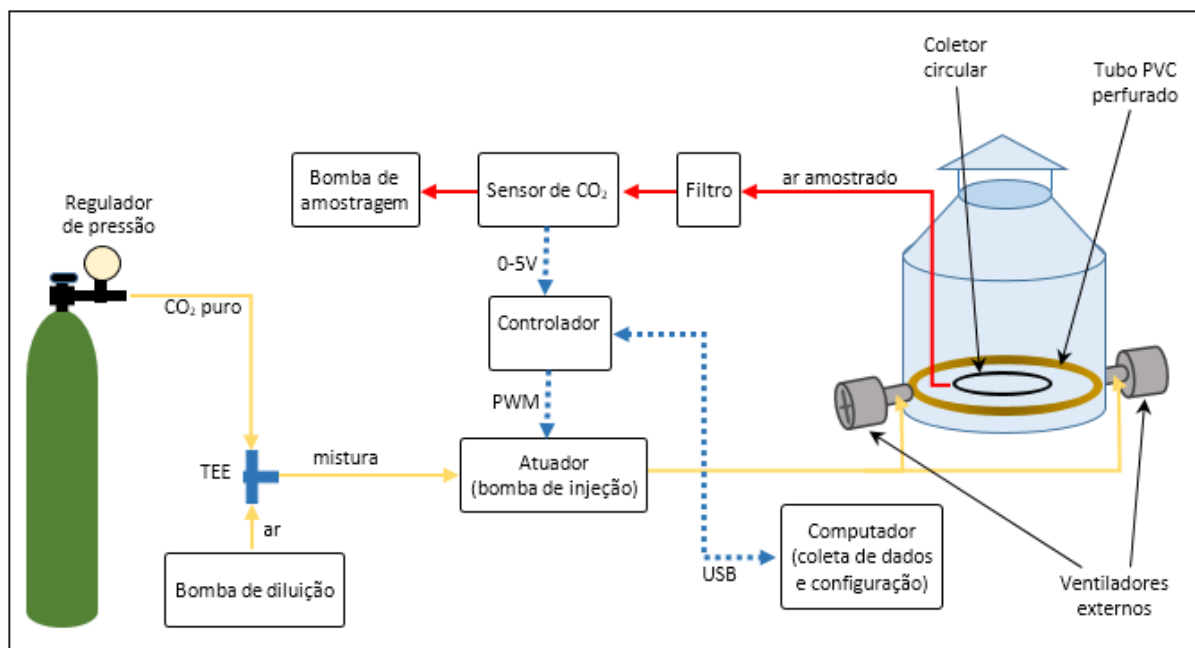


Figura 4 – Diagrama do sistema de controle construído. As setas amarelas são mangueiras do sub-sistema de aplicação de gás e as vermelhas do sub-sistema de leitura do CO₂. As setas pontilhadas são conexões elétricas.

1.4.1 IRGA – Analisador de gases por infravermelho

A tecnologia IRGA (do inglês, *Infra Red Gas Analyser*) faz medições da concentração de CO₂ no ar. Há outras formas de se medir a concentração de CO₂ no ar, como absorção química, condutividade térmica, cromatografia gasosa etc, mas a espectroscopia de infravermelho do IRGA é a mais indicada para análise contínua e em tempo real do ar, e sua aplicação em estudos com OTCs é unânime [05]. O princípio de funcionamento do IRGA baseia-se no fato de que os gases compostos por moléculas diatômicas heterogêneas absorvem luz na banda infravermelha do espectro. No caso do CO₂, este é sensível ao comprimento de onda λ em torno de 4,25 μm .

Um IRGA é composto basicamente por um emissor de infravermelho, uma célula de medição, um filtro óptico e um detector (Figura 5). A presença de moléculas de CO₂ na célula diminui a intensidade da luz que chega no detector, cujo sinal elétrico da saída é processado e entregue como concentração do gás. Instrumentos que funcionam dessa forma também são chamados no mercado de analisadores NDIR (do inglês, non-dispersive infra red). Como a molécula de H₂O sobrepõe a do CO₂ no mesmo comprimento de onda, um filtro hidrofóbico deve ser instalado para garantir que apenas moléculas de CO₂ entrem na célula. O filtro óptico

deixa passar apenas a luz do comprimento de onda referente ao CO₂, mas pode ser substituído para outro λ caso o gás analisado for diferente. Algumas mudanças na tecnologia desses analisadores vêm trazendo melhor desempenho e miniaturização, como a troca do emissor de infravermelho de filamento por diodo emissor de luz, e o detector de termopilha por fototransistores [05] [11].

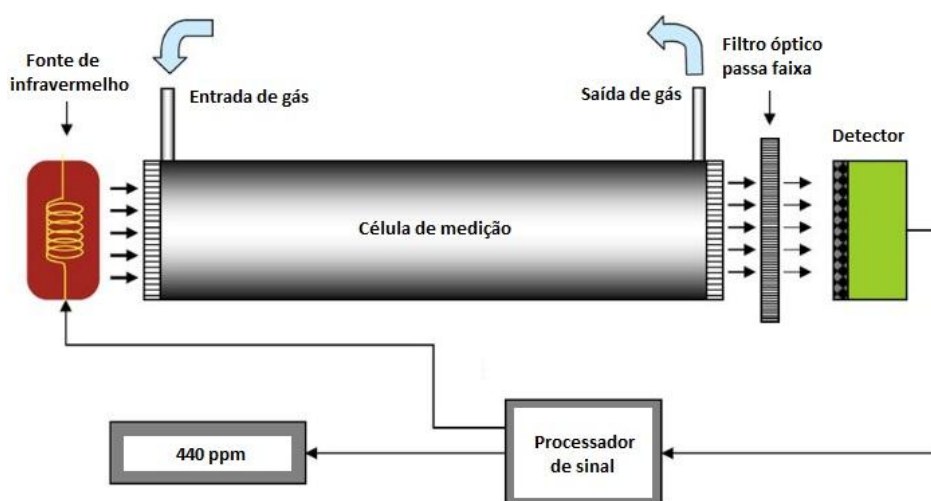


Figura 5 – Desenho de um sensor de CO₂ para analisadores de gás IRGA (Imagem original: F. Horváth, B. Wodala - Preliminary photosynthesis measurements of selected wheat cultivars prior to inoculation).

A entrada do gás na célula de medição pode ocorrer de duas formas: 1) Por difusão, quando a uma das laterais da célula é aberta mas protegida por uma membrana hidrofóbica impermeável ao vapor de água, assim o ar entra na célula naturalmente por difusão e seco. Sensores desse tipo levam pelo menos 20 segundos para estabilizar a leitura, tempo médio que leva para homogeneizar o gás na célula. 2) Por bombeamento. Quando uma bomba amostradora suga o ar ambiente e entrega na entrada da célula. Neste caso, o filtro hidrofóbico é instalado antes da célula. Este método faz que a troca gasosa seja rápida e a análise da concentração seja quase instantânea [10]. A Figura 6 mostra dois modelos comerciais. O sensor utilizado neste trabalho foi do tipo difusão mas adaptado a uma bomba de amostragem.

1.4.2 A bomba de injeção (injetora)

A maioria dos experimentos com OTCs utiliza um registro de ajuste fino para regular manualmente a quantidade de gás que é liberada nas câmaras, as vezes tendo alguma válvula elétrica apenas para ligar ou desligar a liberação de gás durante a noite. Em alguns casos, uma válvula solenoide elétrica é instalada junto a um controlador on-off para tentar alguma

regulagem automática da concentração de gás. Em outros mais sofisticados, uma válvula proporcional é instalada junto ao controlador na tentativa de regular de forma fina a liberação de gás. Todavia, embora a válvula tenha funcionamento linear, quando a abertura é pequena a pressão interna na tubulação de gás aumenta, forçando ainda mais a saída de gás, perdendo assim a linearidade da injeção. Portanto, um sistema de estabilização de pressão deve ser instalado antes da válvula proporcional. Além disso, válvulas proporcionais de baixa vazão são difíceis de encontrar no mercado.

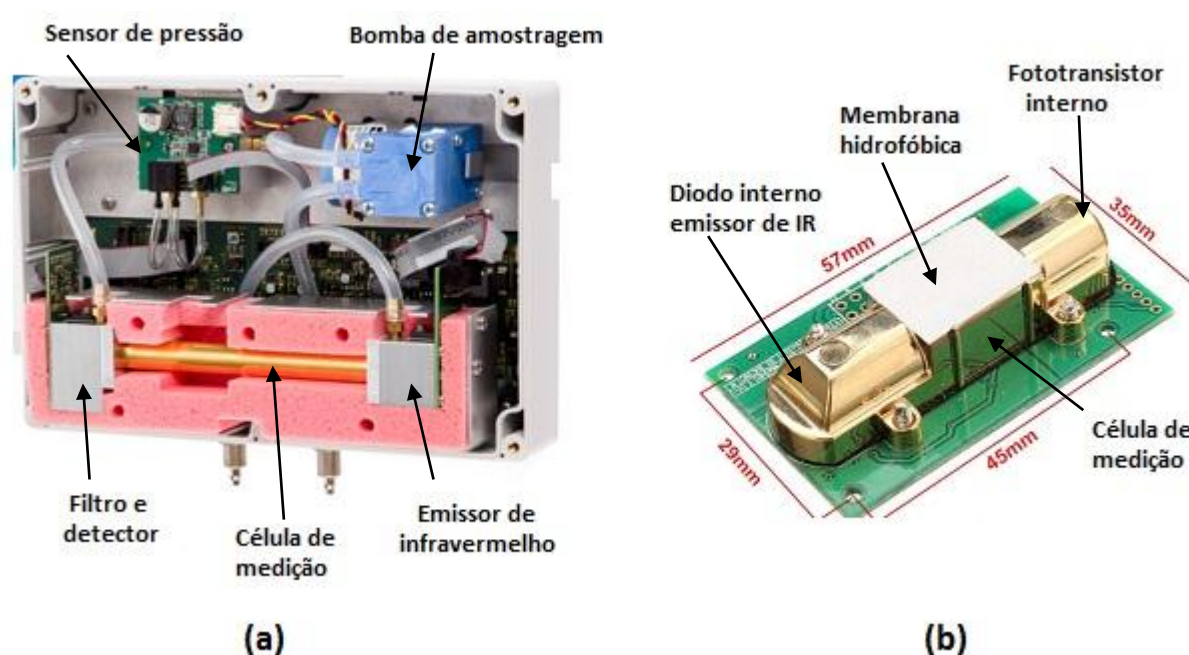


Figura 6 – (a) Vista interna de um analisador IRGA, modelo LI-850, da LI-COR. (b) Módulo sensor de CO₂ por difusão, modelo MH-Z14A, da TMOEC.

Uma maneira diferente para injeção de gás adotada neste trabalho é empregar uma mini bomba de ar com controle de velocidade, tal como a bomba de gasolina do sistema de injeção eletrônica injeta combustível no motor de um veículo. Como a mini bomba deve sugar o gás por um orifício e liberar por outro (sistema fechado), com baixa vazão e alta pressão e ainda suportar longo período de funcionamento contínuo, o modelo mais adequado é a bomba de diafragma (Figura 7) quando comparada as mini bombas de pistão ou centrífugas.

Para controlar a velocidade do motor, e conseqüentemente o volume de gás bombeado, a técnica de modulação PWM (do inglês, Pulse Width Modulation) aplicada na tensão de alimentação do é apropriada.



Figura 7 – Mini bomba de diafragma para injeção de gás CO₂, marca KEYUKANG. 12 Volts DC, 8 l/min.

1.4.3 O microcontrolador

Neste estudo foi utilizado um Arduino UNO R3. O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar. É destinado a qualquer pessoa que faça projetos interativos. O componente principal da placa Arduino é o microcontrolador ATMEL ATMEGA328, um dispositivo de 8 bits da família AVR com arquitetura RISC avançada. Pode operar a até 20 MHz, porém na placa Arduino UNO opera em 16 MHz.

1.5 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo a construção de um sistema automatizado protótipo com peças de baixo custo, para aplicação de gás carbônico em câmaras de topo aberto utilizadas em estudos de ecofisiologia vegetal. Para tanto, um sensor de CO₂ ambiente será adaptado para funcionar com fluxo de ar forçado; O tradicional registro de regulagem manual de gás será substituído por uma bomba de injeção e o analisador de gás IRGA, de custo elevado, será trocado por outro construído com peças relativamente baratas.

2 *Materiais e Métodos*

2.1 *Montagem da OTC e instrumentação*

O experimento foi executado na área Experimental de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais (20° 45' S, 42° 45' W). A concentração de CO₂ ambiente obtida com os medidores durante os ensaios esteve em torno de 420 ppm.

2.1.1 A câmara de topo aberta utilizada

Para o desenvolvimento desse trabalho foi utilizada uma câmara de topo aberto circular, composta por dois segmentos retos e o segmento do topo, com 50 cm de altura cada. A câmara possui diâmetro interno de 180 cm e campânula no topo, com a saída de ar interna em tubo PVC circular, com furos de 3/16", espaçados em 5cm e direcionados para o centro da câmara. Também foram acoplados dois ventiladores externos. A câmara foi revestida com plástico transparente de 150 micras. Os testes foram feitos com a OTC vazia e chão de terra (Figura 8)

2.1.2 Construção do IRGA de baixo custo

A maior redução de custo do sistema de controle apresentado neste trabalho se dá pela substituição do IRGA comercial por outro analisador barato, que execute a mesma tarefa e atenda a necessidade. Este foi composto por um sensor de CO₂, uma bomba de amostragem e um filtro de partículas (os quais são componentes internos de um IRGA). O sensor, da marca *Veris Instruments*, modelo CWLSXTA, funciona por difusão, foi configurado para leituras de 0 a 2000 ppm (partes por milhão) e utiliza saída analógica de 0 a 5 volts para ligação com o Arduino. Este medidor de CO₂ é originalmente projetado para funcionar instalado em parede de edifícios para fazer leitura ambiente em salas, portanto foi preciso adaptar uma mangueira de silicone e um duto perfurado em cima da célula de medição, depois envolver a célula com filme de PVC. Essa adaptação permite que o ar bombeado passe forçadamente através da membrana hidrofóbica para diminuir o tempo de resposta do sensor.



Figura 8 – A câmara de topo abero utilizada nos testes. 1) Um dos dois ventiladores externos; 2) Campânula para proteger da chuva; 3) Coletor circular de gás.

Para a bomba amostragem utilizou-se um compressor de ar de aquário, da marca Sevem Star, modelo S6000 de duas saídas, de 3,5 l/min (litros por minuto). Adaptou-se uma mangueirinha no orifício interno de coleta de ar em uma das saídas. Em todas as conexões usou-se mangueira de aquário do tipo silicone, com 3,5 mm de diâmetro.

Na sucção de ar do interior da OTC, foi desenvolvido um coletor cíclico de 90 cm de diâmetro, feito de tubo PU (Poliuretano) azul de 6 mm, perfurado com agulha quente a cada 15 cm, com as pontas unidas por conector TEE 6 mm, com ponta da mangueira de sucção ligada na saída do meio do conector. Sendo o tupo PU muito flexível, o mesmo foi fixado em um outro círculo de mangueira rígida de polietileno preta de meia polegada (Figura 9).

O filtro de partículas, cuja principal finalidade é proteção da membrana hidrofóbica do sensor contra poeira e umidade, foi contruído com um pote acrílico redondo (30x65 mm diâm/altura), com algodão e sílica gel, que é trocada após saturação (mudança de cor de azul para rosa).

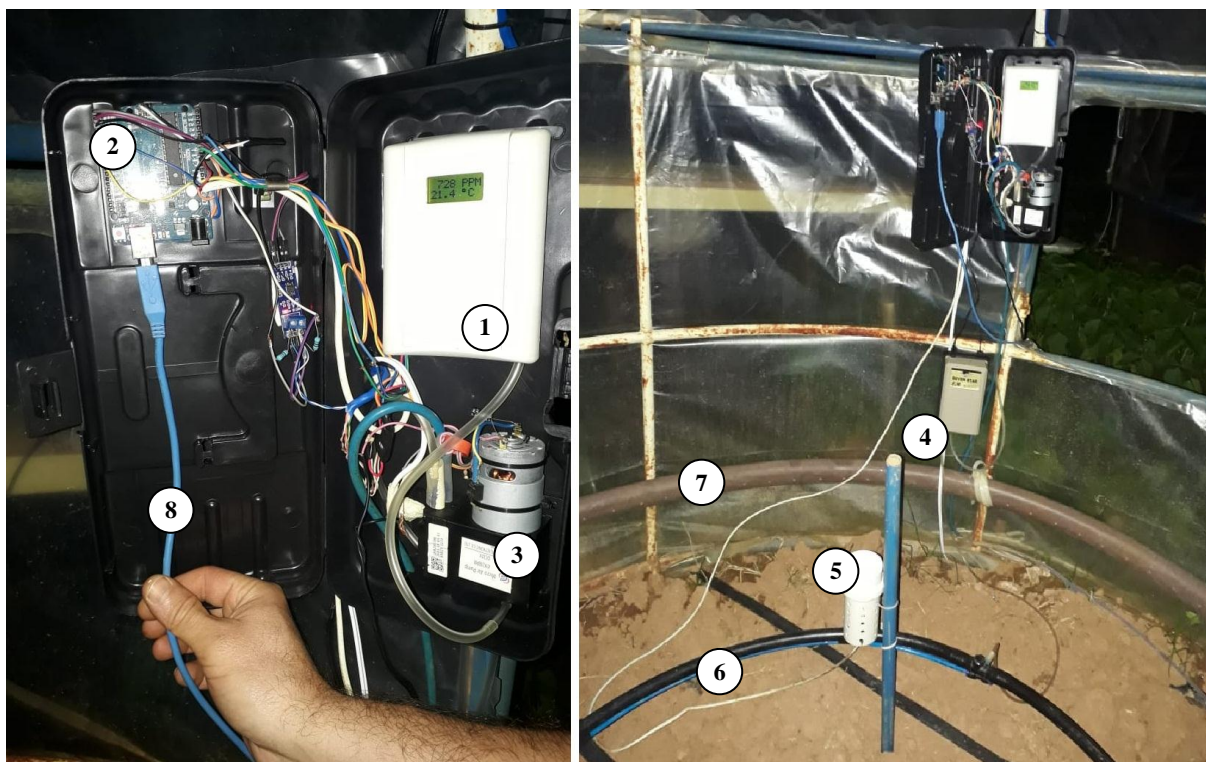


Figura 9 – Sistema de controle protótipo utilizado nos testes. 1) Sensor de CO₂ Veris; 2) Microcontrolador Arduino; 3) Bomba de injeção; 4) Bomba de amostragem; 5) Sensor de temperatura e umidade; 6) Coletor circular; 7) Tubo PVC perfurado; 8) Cabo USB para coleta de dados.

2.1.3 O sistema de aplicação de gás

Os componentes principais sistema de gás são: um cilindro com capacidade 23 kg de CO₂ (White Martins); um regulador de pressão para gás CO₂ (Farmabrás, modelo FRGC-150N); duas mini bombas de diafragma (KEYUKANG, modelo KYK50BPM, potência 20W e 8 l/min (uma bomba para funcionar como injetora e outra para diluir o CO₂), (Figura 7); conectores e mangueiras diversas.

O regulador de pressão foi instalado no cilindro, liberando o gás em baixa pressão e vazão constante em torno de 5 l/min. Como não é possível ligar diretamente a entrada da mini bomba na saída do regulador de pressão, por causa da alta pressão que acumula no regulador quando a mini bomba trabalha em baixa rotação, foi feita uma adaptação para fornecer o gás à injetora em fluxo homogêneo e pressão constante. Para isso, utilizou-se um conector TEE ligando a saída do regulador de pressão e a saída da bomba de diluição, a fim de obter uma mistura final ar/CO₂ na proporção aproximada 10:1. O motivo de usar o CO₂ diluído é devido a vazão da inetora que, mesmo em baixa rotação, libera mais gás do que o necessário caso fosse bombeado CO₂ puro. Uma mangueira cristal 5/16” ligada na saída do TEE levou a

mistura até a OTC, mas a mangueirinha de sucção da injetora (de diâmetro menor) foi colocada sem vedação 10 cm dentro da mangueira cristal, de forma a deixar escapar a vazão excedente.

2.1.4 A coleta de dados

Nesta etapa, utilizou-se um programa de aquisição de dados que faz interface entre a porta serial do Arduino e o Excel, o *Parallax Microcontroller Data Acquisition for Excel*. As leituras de CO₂ e outros dados eram inseridos numa tabela do Excel e apresentados em gráfico em tempo real, facilitando o acompanhamento da operação do sistema e o armazenamento dos dados. A taxa de amostragem, inserida no algoritmo do Arduino, foi de uma leitura a cada 1 segundo (tempo mínimo de atualização do sensor *Veris*)

2.2 Identificação da OTC e projeto do controlador de gás CO₂

2.2.1 O modelo da OTC pelo método de malha aberta

A obtenção analítica de um modelo que represente uma câmara de topo aberto é inviável e, mesmo um modelo inferido para uma OTC pode não representar uma outra, por causa de variações na dimensão, potência do ventilador, diferenças nas peças de aplicação de gás, clima da região etc. Portanto um modelo para esse estudo no formato de função de transferência foi obtido pelo método de malha aberta de Ziegler-Nichols. Nesse ponto as propriedades vistas na teoria ganham significado físico prático, como por exemplo, a variável de entrada é a intensidade do sinal PWM mandado para a injetora e a variável de saída é a concentração de CO₂. Considerou-se como degrau unitário o valor de 100% do PWM aplicado à injetora (vazão máxima). A planta (ou processo) é o conjunto dado pela OTC mais os dois subsistemas, de injeção de gás e de leitura de CO₂. O gráfico da Figura 10 mostra a variação da concentração em 10 minutos de funcionamento, aproveitando-se um momento de calmaria do vento para que este não interferisse nos dados. A concentração ambiente de CO₂ fora da câmara é em torno de 420 ppm.



Figura 10 – Resposta do sistema à excitação degrau operando em malha aberta.

A curva do gráfico (Figura 10) não tem o aspecto de um sistema integrativo porque a concentração não tende ao infinito, porém tem formato de S mesmo com bastante oscilação. Tomando como referência a média móvel para desconsiderar os ruídos, esperava-se uma estabilização da $[CO_2]$ em torno de um valor, no entanto ela varia bastante entre 1180 a 1680 ppm, logo tomamos a média 1430 ppm para o ganho K_E de malha aberta. Sendo assim, $G_P(\infty) = 1430$ ppm. A concentração inicial do ambiente é $G_P(0) = 430$ ppm, logo o ganho $K' = G_P(\infty) - G_P(0) = 1000$ ppm. Observando os primeiros segundos da leitura real do sensor (curva cinza) o atraso de transporte $L = 5$ s. Uma possível reta tangente tocando K_E em 170s fornece o tempo de subida $T = 165$ s. Esses valores inseridos na Equação 1.2 infere a seguinte FT para a planta

$$G_P(s) = e^{-5s} \cdot \frac{10}{1 + 165s} \quad (1.4)$$

onde $K = Y(s)/U(s) = K'/100$ (100% do PWM, e conseqüentemente da vazão também).

2.2.2 Sintonia do controlador PID para a OTC

Por se tratar de um processo sem componente integrador, os parâmetros da Tabela 2 serão considerados, resultando na Equação 1.5 para o controlador PID sintonizado.

$$G_{PID}(s) = 3,96 \left(1 + \frac{1}{10 \cdot s} + 2,50s \right) \quad (1.5)$$

É usual encontrar os parâmetros K_p , K_i e K_d nos controladores comerciais e nos algoritmos PID, como é o caso da biblioteca PID inserida no código do Arduino. Portanto nos

testes adotamos $K_p = 3,96$, $K_i = K_p/T_i = 0,39$ e $K_d = K_p * T_d = 9,90$ na sintonia inicial. Embora estes parâmetros tenham sido determinados no domínio contínuo “s” e as interfaces de leitura e controle sejam digitais, os valores são os mesmos para o tempo discreto, pois a frequência de amostragem escolhida é 1 Hz, a mesma frequência de atualização do sensor.

3 *Resultados e Discussões*

3.1 Comparação entre os sistemas comercial e proposto

Normalmente experimentos de ecofisiologia com OTC utilizam várias câmaras, em tratamentos com concentrações diferentes ou repetições, tornando economicamente inviável um sistema de controle em cada OTC. Como deseja-se reduzir o custo com sistemas de controle, sem todavia prejudicar a qualidade do funcionamento, é proposto um controlador construído com material relativamente acessível. A Tabela 3 é uma lista dos componentes compatíveis para montagem de uma unidade do sistema de controle completo, com valores orçados pela internet.

Ao considerar apenas o material (Tabela 3) verifica-se que é possível construir um sistema de controle com aproximadamente R\$500,00. Um analisador IRGA de melhor custo/benefício que atenderia este projeto, o qual substitui o sensor de CO₂ e a bomba amostradora da Tabela 3 é o módulo SBA-5 da PP Systems (Figura 11), cujo preço orçado é R\$ 2600,00. Neste caso, exceto pelo sensor, filtro e amostradora, o restante do material da Tabela 3 ainda seria necessário, elevando o custo para R\$ 26274,50. Portanto o sistema de controle alternativo proposto é quase 98% mais econômico em relação ao sistema comercial encontrado no mercado (dado pela diferença de preço entre os IRGAs), tornando viável sua instalação quando há dificuldades de recursos, principalmente se o experimento precisar de várias OTCs a serem automatizadas.

Item	Quant	Descrição	Valor aprox.
1	1 unid.	Sensor de CO ₂ Veris CWLSXTA ou equivalente	150,00 (equiv.)
2	1 unid.	Bomba de ar KEYUKANG. 12V/8 l/min (injetora)	85,00
3	1 unid.	Compressor de ar para aquário (amostradora), vazão 2 l/min.	45,00

4	1 unid.	Microcontrolador Arduino UNO R3 com cabo USB	30,00
5	1 unid.	Fonte eletrônica CC 5V/1A (Arduino e sensor)	12,00
6	1 unid.	Fonte eletrônica CC 12V/2A (injetora)	23,00
7	1 unid.	Drive PWM para controle de carga CC via Arduino	17,00
8	1 unid.	Conector TEE para tubo PU 6 mm	6,00
9	1 unid.	Caixa de montagem PVC retangular 15x20x10 (LxAxP)	41,00
10	1 unid.	Filtro de ar com sílica gel	20,00
11	1 unid.	Conector TEE para tubo PU 6 mm	6,50
12	3 m	Manguerira silicone aquário 3 mm	9,00
13	5 m	Tubo PU (poliuretano) 6 mm	25,00
14	Unid.	Cola, abraçadeira, fita adesiva, parafusos, fios etc	20,00
		Total >>>	489,50

Tabela 1 – Material básico para construção de um sistema de controle de gás CO₂.



Figura 11 – Analisador de CO₂ por infravermelho SBA-5, com invólucro AGA407, o qual é substituído pelo sensor de CO₂ e pela bomba amostradora no sistema de controle alternativo.

O custo da mão de obra da montagem não está sendo considerado porque tanto o sistema de controle feito com IRGA comercial como o alternativo precisam da mesma mão de obra técnica para a montagem.

3.2 Teste de desempenho

Para mostrar que o controlador construído com material não tão caro (Tabela 1) funciona e tem potencial de aplicação em trabalhos com OTCs, o experimento tentou provar que o sistema automatizado de aplicação de gás tem melhor performance do que o sistema regulado manualmente. A sequência de testes aconteceu da seguinte maneira: o primeiro passo consistiu em obter experimentalmente os parâmetros do controlador PID através do

teste em malha aberta, ou seja, liberar o gás na vazão máxima e registrar a curva de resposta (Seção 2.2.1 e 2.2.2). No segundo passo se testou o desempenho do sistema sem qualquer ação de controle, ou seja, quando se tem o gás liberado por um registro de ajuste fino e regulado manualmente para obtenção de 700 ppm na OTC e deixado assim ao longo do dia. Para isso o sinal PWM foi fixado em 58% e a bomba injetora liberou uma vazão constante de gás. Por fim se testou o sistema controlado, em *set points* de 650 e 700 ppm, a fim de comparar a performance entre as plantas com e sem controle. Para simular as rajadas de vento que costumam entrar na OTC, um ventilador foi instalado no topo (Figura 12) forçando a entrada de vento e um anemômetro ultrassônico (marca Gill, modelo WindSonic Option 4) colocado na altura do círculo coletor, para registrar a velocidade do vento no espaço de maior interesse. Potanto foi conseguido curvas de CO₂ e velocidade do vento à 20 cm do solo no interior da OTC.

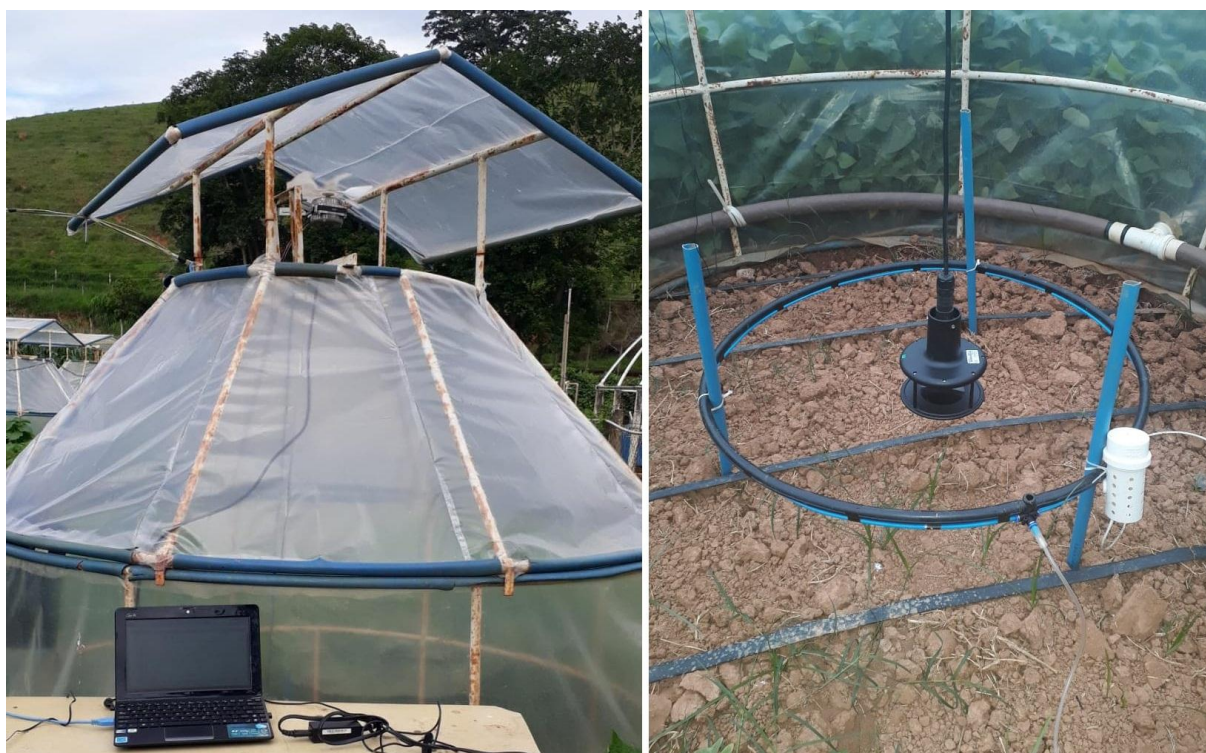


Figura 12 – Montagem feita para os testes. 1) Ventilador no topo para simular entrada de vento na OTC; 2) Notebook para coleta de dados; 3) Anemômetro ultrassônico para medir a turbulência na altura do coletor; 4) Coletor circular de amostra de ar; 5) União do tubo perfurado com o ventilador externo.

Inicialmente é necessário apresentar o desempenho do sistema quando este é calibrado manualmente em uma concentração desejada e depois deixado sem qualquer ação de controle. Para isso, depois de alguns testes, o sinal PWM ficou ajustado em 58% para se obter 700 ppm de CO₂ na câmara, onde se pôde simular a liberação de gás feita por um registro de ajuste

fino. A temperatura média durante esse ensaio era 26 graus Celsius e tempo estava nublado. Verificou-se que o nível de CO₂ (Figura 13), calibrado em 700 ppm com ventos por volta de 0,4 m/s, subiu para quase 1600 ppm com a queda do vento para 0,1 m/s, e depois retornou para os 700 ppm com aumento da velocidade do vento. Logo é notável a influencia do vento na manutenção do CO₂ e, como aconteceu neste teste, um longo período de alto CO₂ poderá prejudicar as plantas se houver episódios recorrentes. Em contrapartida, se a calibração for realizada na ausência de vento, o CO₂ tenderá à concentração ambiente de 420 ppm na ocorrência de vento. É impossível calibrar para uma situação e esperar que ela atenda outras ao longo do dia.

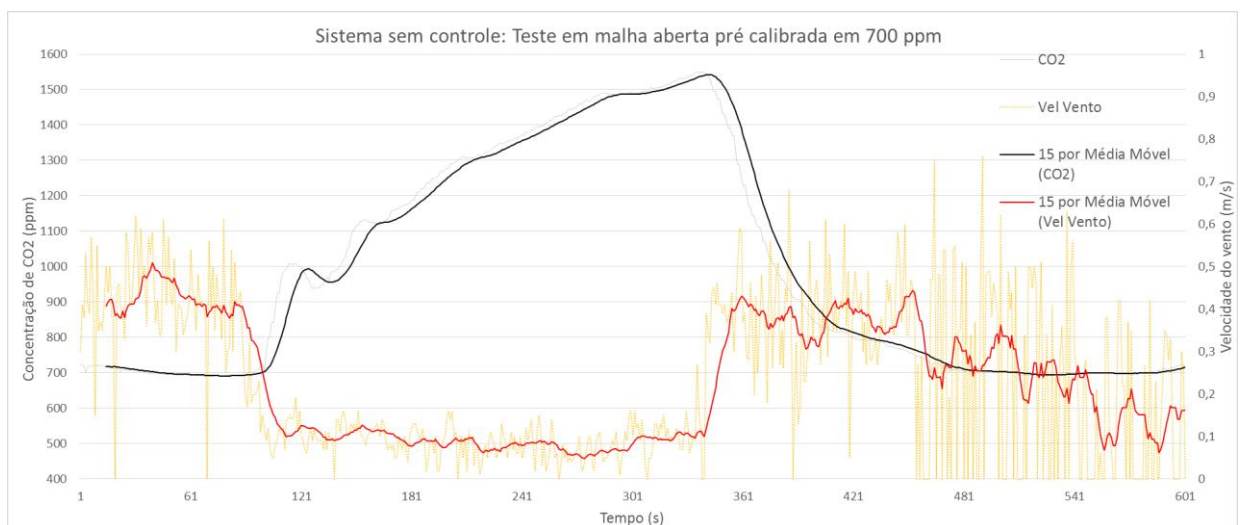


Figura 13 – Comparação entre as curvas de CO₂ e velocidade do vento para o sistema funcionando em malha aberta (sem controle), com calibração inicial em 700 ppm.

As concentrações mais comuns em experimentos com OTC são 650, 700 e 750 ppm, com ênfase nas duas primeiras. A Figura 14 mostra a planta operando em malha fechada usando os parâmetros PID calculados na seção 2.2.2, onde se nota uma proximidade da curva de CO₂ ao *set point* de 700 ppm e com vento relativamente alto em torno de 0,20 m/s. Já na Figura 15, a curva tende ao *set point* de 650 ppm, entretanto o sistema apresentou-se instável para os parâmetros calculados e tiveram de ser reajustados. O importante nesses dois testes é o fato da concentração de CO₂ não ter subido muito quando o vento esteve baixo (por volta de 0,10 m/s), quando comparado ao desempenho da planta sem controle (Figura 13). Dessa forma se verifica que o controlador atuou satisfatoriamente para limitar os altos níveis de CO₂ na presença/ausência de vento, embora não tenha conseguido estabilizar tanto as concentrações em torno dos níveis desejados. O controle conseguiria proteger a vegetação dos níveis prejudiciais de CO₂.

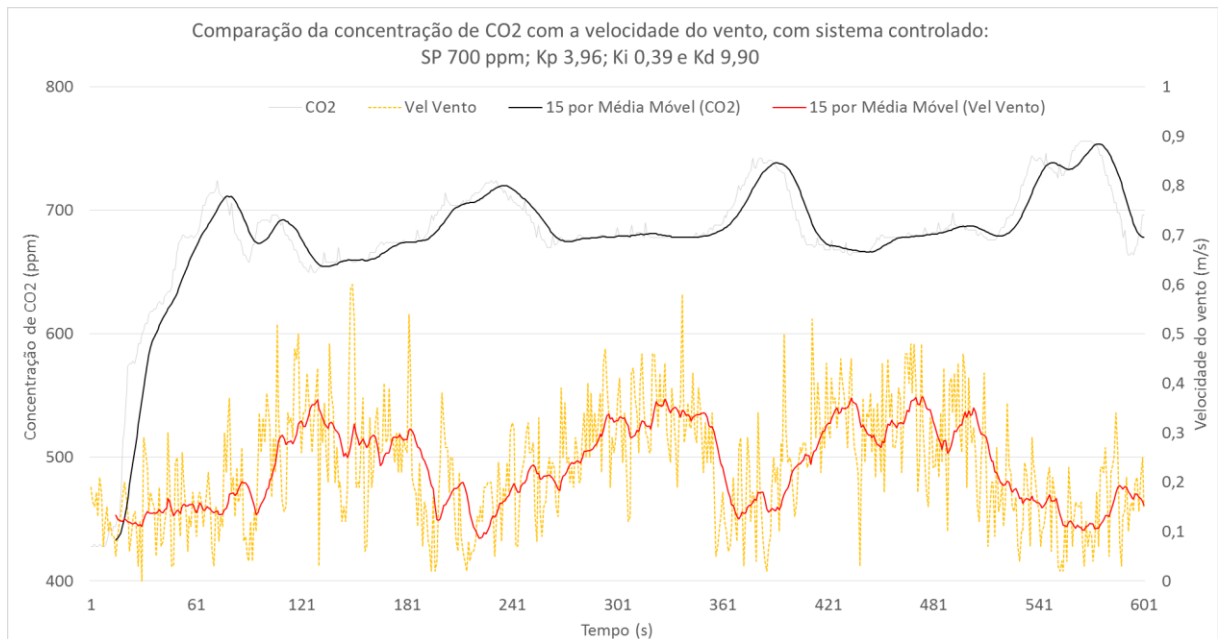


Figura 14 – Comparação entre as curvas de CO₂ e velocidade do vento para o sistema controlado, em *set point* de 700 ppm, usando os parâmetros calculados por Ziegler-Nichols pelo teste de malha aberta.

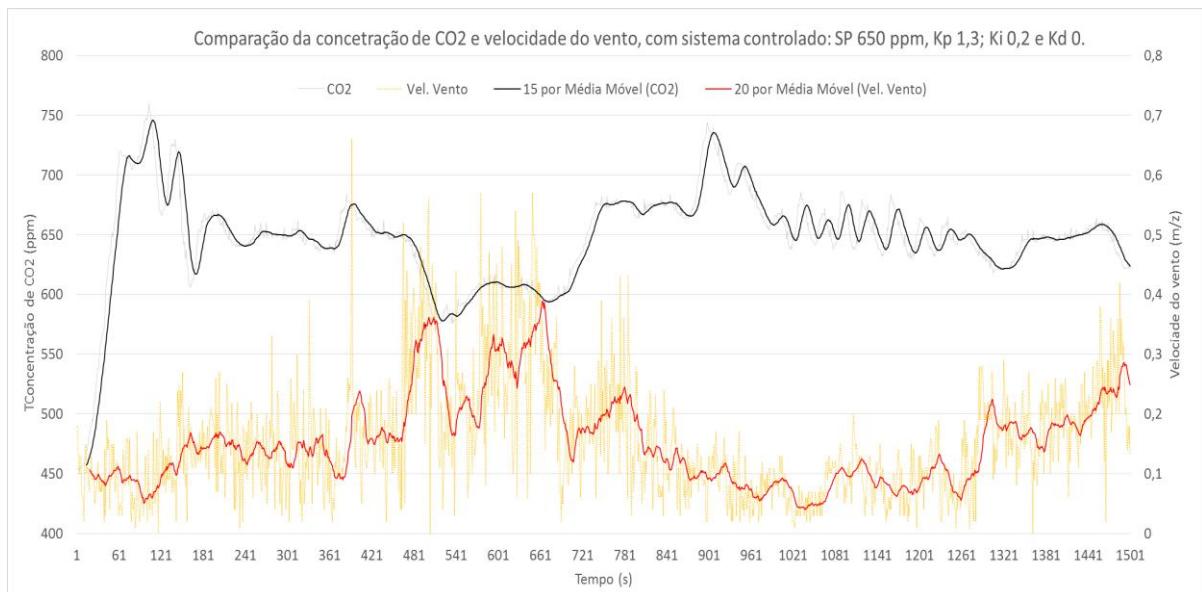


Figura 15 – Comparação entre as curvas de CO₂ e velocidade do vento para o sistema controlado, em *set point* de 650 ppm, com os parâmetros PID ajustados para se obter o melhor desempenho.

Com muitas horas de ensaios outros quatro resultados foram conseguidos, para mostrar que o controlador desenvolvido pode atender mais melhor a questão de estabilidade nas três concentrações estudadas. Como mostra a Figura 16, uma das curvas mostra o comportamento da planta no início da liberação do gás, para o sistema sem controle e

previamente calibrado em 700 ppm. As demais curvas são para os níveis desejados e com a planta controlada. Com um ajuste mais cuidadoso dos parâmetros PID diminuiu-se o erro em regime permanente ao considerar a concentração média ao longo dos minutos. Além disso, a oscilação da curva sem controle é relativamente maior. A média móvel auxilia na suavização dos ruídos inevitáveis que aparecem. A velocidade do vento nestes ensaios esteve em torno de 0,10 m/s.

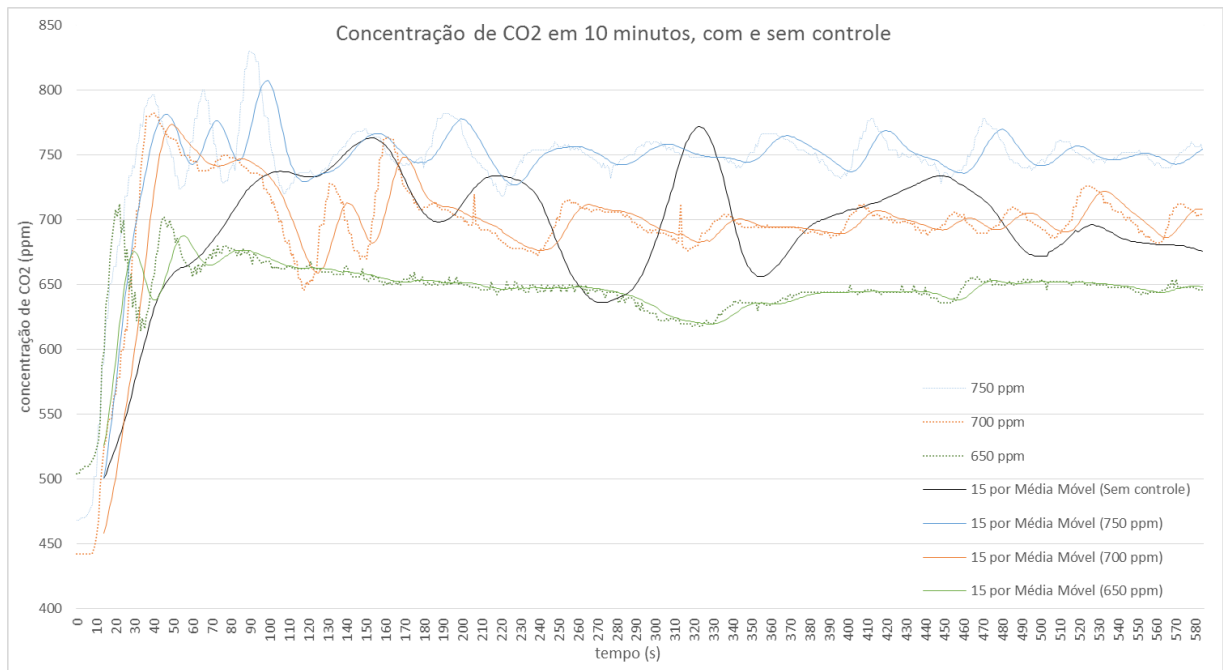


Figura 16 – Comparação da planta em três níveis de CO₂, com parâmetros PID ajustados para obter o melhor desempenho nesses níveis, e também o desempenho inicial da planta sem controle.

4 Conclusões

As curvas obtidas nos ensaios demonstram que o sistema de controle proposto é funcional e atende parte das expectativas de controle para uma OTC automatizada. Mesmo com relativa oscilação, as concentrações conseguidas (Figura 16) apontam que melhores desempenhos podem ser conseguidos com algumas melhorias no sistema, como novo ajuste dos parâmetros PID do controlador e até a adoção de outra técnica de controle mais complexa no algoritmo. Novos ensaios que considerem a temperatura e a umidade além da velocidade

do vento poderão ser realizados com dados coletados ao longo de um dia inteiro, no intuito de verificar a ação dessas variáveis sobre a concentração de CO₂.

A bomba de injeção atendeu as expectativas, pois liberou o gás de forma bastante regulada de acordo com o sinal PWM recebido do controlador, todavia uma bomba de menor vazão possa atender melhor o sistema, para não ser necessário diluir o gás carbônico antes da injeção. O IRGA alternativo teve bom funcionamento durante os testes, verificado por suas leituras rápidas e coerentes da [CO₂]. Isto melhora a resposta do sistema às variações porque diminui o atraso de transporte, que em vários testes esteve entre 5 a 10 segundos.

Por fim, este trabalho apresentou um sistema de controle de potencial aplicação em experimentos com OTCs, por ser economicamente viável e com desempenho superior quando comparado a método manual de regulagem e controle. O custo do sistema de controle reduzido em quase 98% torna possível o uso de várias OTCs automatizadas em experimentos maiores.

Referências Bibliográficas

CASOS

[01] Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. Mudança do clima 2013: A Base das Ciências Físicas. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Paris, 2013.

[02] Boletim da Organização Meteorológica Mundial (OMM) sobre os gases de efeito estufa, No. 13, de 30 de outubro de 2017.

[03] Silva, R. de C. B. da; Lopes, A. P.; Silva, K. K. de A.; Silva, T. C. F. dos S.; Aragão, C. A.; Dantas, B. F.; Angelotti, F. Crescimento inicial de plântulas de melancia submetidas ao aumento da temperatura e concentrações de CO₂. Artigo em Periódico Indexado. Revista Magistra, Cruz das Almas, v. 27, n. 1, p. 33-43, jan./mar. 2015.

[04] Bortolin, Livia Haik Guedes de Camargo (2016). Simulação do clima de 2050 em campo e seus efeitos sobre o crescimento de forrageiras. Tese de Doutorado. Ecologia e Recursos Naturais – Universidade Federal de São Carlos, 2016.

[05] Romano, R. A. Modelagem e controle de CO₂ em câmaras de topo aberto utilizadas em estudos de fisiologia de plantas. São Paulo, 2006. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 2006.

[06] Silva, J. B. L. da; Ferreira, P. A.; Martins, V. S.; Pires, L. C.; Justino, F. B. Desenvolvimento de estrutura experimental para estudos de mudanças climáticas em culturas agrícolas. Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de Julho de 2011, Guarapari – ES.

[07] Gasparini, G. (2008) Ferramenta de identificação de processos e sintonia de controladores PID aplicada a uma planta didática. Trabalho de conclusão de curso. Engenharia de Controle e Automação - UNIVATES, Lajeado, RS, 2008.

[08] OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000, 813p.

[09] Paulo Roberto B. de Campos. Sintonia do compensador PID. Notas de aula. Disciplina Controle I. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Acessado dia 04 nov. 2018, disponível em <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/brero/control_e_1>

[10] LI-830 and LI-850 Gas Analyzer Instruction Manual. Manual. Manual de instruções dos analisadores de gás LI-830 e LI-850. Set. 2018. Li-Cor. Disponível em <<https://www.licor.com/env/support/LI-850/manuals.html>>

[11] GSS Sensor User's Manual. Manual de Sensores de CO2 da linha COZIR, SprintIR, MISIR e MinIR. Ago. 2015, Ver. 1. CO2Meter. Disponível em <<http://www.co2meters.com/Documentation/Manuals>>