

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA AUTOMATIZADA DE SIMULAÇÃO DE
UM MEIO DE CULTIVO VEGETAL

por

Jonas Luiz Monteiro

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2013



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA AUTOMATIZADA DE SIMULAÇÃO DE
UM MEIO DE CULTIVO VEGETAL

por

Jonas Luiz Monteiro

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Fabiano Disconzi Wildner

Comissão de Avaliação:

Prof. Cíntia Mazzaferro

Prof. Heraldo Amorim

Prof. Rafael Laranja

Porto Alegre, dezembro de 2013

Monteiro, J. L. **Projeto e desenvolvimento de uma câmara automatizada de simulação de um meio de cultivo vegetal**. 18 f. 2013. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Com o constante crescimento dos centros populacionais, a produção de alimentos vegetais tem se distanciado cada vez mais do consumidor final. Parte disso ocorre pela dificuldade técnica de se realizar o cultivo vegetal, pela falta de espaço físico, pela falta de tempo e pelas condições climáticas regionais. Com o objetivo de projetar e desenvolver uma câmara de cultivo vegetal (CCV) automatizada que possibilite ao usuário o cultivo de vegetais no interior de uma residência, estudou-se um meio de se controlar parâmetros ambientais necessários ao desenvolvimento sadio de diversas espécies vegetais. Através de sensores analógicos e digitais, micro ventiladores, células termoelétricas Peltier, bombas d'água, LED's de alta potência, e uma plataforma de prototipação eletrônica (Arduino) desenvolveu-se um sistema de controle de malha fechada para os parâmetros de quantidade e tempo de exposição a luz, temperatura do ar e umidade relativa do solo.

PALAVRAS-CHAVE: (Câmara de Cultivo, Automação, Arduino)

Monteiro, J. L. **Design and development of an automated camera simulation of a plant growing medium.** 18 p. 2013 Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

With the constant growth of population centers, food production plants have increasingly moved away from the end consumer. Part of this occurs, by the technical difficulty of performing vegetable cultivation, lack of space or lack of time. With the goal of designing and developing an automated plant growth chamber, enabling the user to the cultivation of vegetables inside the residence, was studied the means to control the necessary environmental parameters for healthy development of a wide range of plant species. Through digital and analog sensors , fans , thermoelectric Peltier cells , water pumps , high-power LED's , and an electronics prototyping platform (Arduino), was developed a system of closed loop control for the parameters of quantity and time of exposure to light , air temperature and humidity of the soil .

KEYWORDS: (Growth Chamber, Automation, Arduino)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. CÂMARAS DE CRESCIMENTO VEGETAL.....	1
2.1. ILUMINAÇÃO	1
2.2. VENTILAÇÃO.....	2
2.3. TEMPERATURA.....	2
2.4. UMIDADE DO AR.....	2
2.5. UMIDADE DO SOLO	2
3. FUNDAMENTAÇÃO DO PROJETO.....	3
3.1. DIMENSÃO DA CÂMARA DE CRESCIMENTO VEGETAL.....	3
3.2. DIMENSIONAMENTO DA ILUMINAÇÃO.....	3
3.3. FLUXO DE AR	5
3.4. CARGA TÉRMICA E SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR.....	5
4. CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	7
4.1. Micro Controlador	8
4.2. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO.....	10
4.3. SISTEMA DE VENTILAÇÃO E CONTROLE DE TEMPERATURA DO AR	10
4.4. SISTEMA DE CONTROLE DE UMIDADE DO SOLO.....	11
4.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	12
5. TESTE DA CCV	13
6. CONCLUSÕES	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
ANEXO A.....	16
APÊNDICE A	16
APÊNDICE B	18
APÊNDICE C	18

1. INTRODUÇÃO

O homem iniciou o cultivo de vegetais para alimentação em 10000 A.C. e essa habilidade tem sido a grande impulsionadora do desenvolvimento humano. De um início de experimentação e observação da natureza, atualmente se tem uma agricultura avançada e de alto rendimento [Vicentino, et al., 2004].

Parte desse avanço se deve ao estudo da biologia e do metabolismo vegetal, que tomou forma em 1969 com a criação, por uma comunidade de cientistas, da Sociedade Americana de Ciência e Horticultura: Câmaras de Cultivo e Ambientes Controlados (*ASHS – American Society for Horticultural Sciences: Working Group on Growth Chambers and Controlled Enviroments*) que reconheceu a capacidade da Câmara de Cultivo Vegetal (CCV) de auxiliar no entendimento dos diversos fatores que influenciam o desenvolvimento de vegetais em geral [Bailey, et al., 1972]. Dessa iniciativa, foi criado e publicado um Manual de Câmaras de Crescimento: Ambientes Controlados para Plantas (*Growth Chambers Manual: Environmental Control for Plants*, Langhans 1978), com uma posterior atualização na publicação “*History of the ASHS working Group on Growth Chambers and Controlled Enviroments, 1969 - 96: A case Study if Involvement*” [Tibbitts, et al., 1997]. Estas publicações evidenciam os parâmetros ideais que suprem as necessidades das plantas e que servirão de base para o desenvolvimento de um projeto de CCV.

A partir dessas necessidades, concebeu-se um sistema de controle básico para uma CCV, buscando a simulação de um meio ambiente ideal de propagação e crescimento de diversas espécies vegetais. Este controle, em malha fechada, é composto por diversos sensores, que fazem a aquisição de dados do meio de cultivo e um micro controlador, que recebe estes dados e os processa de acordo com uma rotina de controle desenvolvida em linguagem C. Através dessa rotina, serão controlados componentes eletromecânicos, tais como micro ventiladores e células termoelétricas do tipo Peltier, que farão a adequação do meio de cultivo conforme parâmetros definidos pelo usuário.

2. CÂMARAS DE CRESCIMENTO VEGETAL

Uma Câmara de Crescimento Vegetal (CCV) pode ser entendida como uma estrutura fechada que simula um ambiente através dos controle de luz, temperatura, umidade do ar, velocidade do ar, taxa de renovação de ar e umidade do solo. Nas CCV's existentes no mercado alguns processos e faixas de operação são muito semelhantes, visto que as necessidades básicas dos vegetais devem ser respeitadas. As informações sobre os parâmetros básicos utilizados neste trabalho, bem como sua inter-relação e metodologia para seu controle são fundamentadas a seguir.

2.1. ILUMINAÇÃO

Para um desenvolvimento sadio de vegetais, a iluminação tem forte influência, tendo em vista que é a partir da energia luminosa que acontece a fotossíntese. Segundo Sager et al., 1996, não é necessário reproduzir completamente o espectro luminoso produzido pelo sol para que aconteça o correto desenvolvimento do vegetal.

A Radiação fotossinteticamente ativa (*PAR*) é o termo utilizado para descrever a radiação gerada pelos comprimentos de onda utilizados no processo de fotossíntese, usualmente entre 400 nm e 700 nm [Mc Kree, 1972]. A energia luminosa referente a um único comprimento de onda é calculada através da expressão a seguir, onde, constante de Planck $h=6,26.10^6$ J.s, velocidade da luz $c=2,998.10^8$ m/s e w =comprimento de onda em metros [Sager, et al., 1996]:

$$E = \frac{h \times c}{w} \quad [2.1]$$

Esta equação nos retorna energia [J], mas para fins do estudo deve ser tratada como o fluxo de fótons por área [$\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}$]. Para a conversão utiliza-se a tabela contida no anexo A.

Plantas com grande necessidade a incidência luminosa (oriundas de regiões tropicais) necessitam para o correto desenvolvimento um fluxo de fótons mínimo de $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}$ por um período de 16 horas diárias, enquanto plantas foliares de desenvolvimento lento necessitam de um fluxo de energia luminosa de 10 a $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{s}$ por um período de 8 horas [Sager, et al., 1996].

2.2. VENTILAÇÃO

A velocidade do ar que circula nas proximidades das folhas tem influência direta na absorção de CO₂ pelos estômatos. São indicadas velocidades entre 0,3 e 0,7 m/s para facilitar a captação de dióxido de carbono, possibilitando o desenvolvimento vegetal adequado [Yabuki, et al., 1970]. Velocidades acima de 1 m/s não são indicadas, pois podem acelerar a taxa de transpiração, causando fechamento dos estômatos como medida de proteção da planta, inibindo assim seu desenvolvimento [ASHRAE, 2001]. Em termos de direção de escoamento de ar, este deve se dar da parte superior da planta ao solo, pois assim a distribuição de umidade e temperatura fica mais próximo do que ocorre na natureza [Morse, et al., 1962].

Durante a fotossíntese, a planta absorve CO₂ do ambiente e libera O₂. No caso de CCVs de pequenas dimensões, a taxa de renovação de ar deve ser tal que compense a taxa de CO₂ consumida. Para a maioria das câmaras, essa taxa de renovação de ar deve ser de 50% a 67% do volume total por minuto [Downs, et al., 1996].

2.3. TEMPERATURA

Define-se temperatura como a indicação da energia térmica presente no ar. Esta energia tem efeitos em muitos aspectos fisiológicos da planta e sua medição e controle são críticos em todos estudos biológicos. A faixa de operação esperada para uma CCV está entre 5° C e 40° C, com as lâmpadas ligadas no seu interior, levando em conta várias espécies vegetais a serem cultivadas [Peter, et al., 1997].

A troca térmica no interior de uma CCV é determinada, primeiramente, pela transferência de calor entre o tecido da planta e para o ambiente. Plantas trocam energia térmica através de condução e convecção, da absorção da radiação e irradiação de longos comprimentos de onda (700 à 1500 nm) [Mellor, et al., 1964] e pela evaporação de água. Em câmaras de cultivo, as fontes primárias de radiação térmica são lâmpadas e os vegetais irradiam cerca de 75% da radiação absorvida em seus tecidos para o ambiente [Gates, et al., 1963].

No controle da temperatura, a grande maioria das CCVs de grande porte utiliza chillers de água fria, que resfriam o ar através de unidades de condicionamento. No interior da câmara, a velocidade do vento deve estar entre 0,3 m/s a 1 m/s na altura da copa das plantas para garantir uma maior convecção de energia térmica. Velocidades maiores que 1 m/s aumentariam a taxa convectiva, mas não são indicadas como citado na seção 2.2.

2.4. UMIDADE DO AR

O vapor de água na atmosfera umidade afeta diretamente o crescimento da planta por regular sua transpiração e trocas gasosas [Lange, et al., 1971] e indiretamente por modificar o balanço de energia entre planta e o ambiente, além de modificar suas propriedades fisiológicas. A maior influência se dá na transpiração da planta. Esta se eleva a medida que a umidade decai [Ford, et al., 1974] e é responsável por retirar em até 75% a energia radiante interceptada nos tecidos de plantas herbáceas sobre incidência de grandes radiações luminosas [Decker, 1965].

Altas taxas de umidade do ar aumentam o aquecimento específico do ar. Sua condensação/evaporação são acompanhadas de grandes modificações no balanço da energia latente no interior da câmara, influenciando diretamente no controle de temperatura.

Nas CCVs, o aumento da umidade de ar é realizado através da evaporação da umidade de meios sólidos, de fontes de água e de água atomizada ou por troca de ar com um ambiente externo mais úmido. Em pequenas câmaras podem ser utilizados também banhos, contendo sais específicos, que terão pontos de pressão de vapor específicos para cada umidade desejada [Wexler, et al., 1954]. A redução da umidade pode ser realizada através da condensação em resfriadores, controlando-se o ponto de orvalho no sistema de circulação de ar [Jerger, et al., 1965], com a troca de ar com ambientes mais secos e pela absorção física do vapor da água por dissecantes. Este último método apresenta a vantagem de não influenciar no controle da temperatura, mas necessita uma constante renovação do material dissecante.

2.5. UMIDADE DO SOLO

Meios de cultivo sólidos são usualmente mais usados pela simplicidade e por necessitarem de menor manutenção se comparados a meio hidropônicos. Considera-se um meio de cultivo sólido

um conjunto de partículas onde as raízes do vegetal irão crescer e absorver água, oxigênio e minerais. Meios de cultivos sólidos neste contexto de funcionalidade são análogos ao solo [Spomer, et al., 1997].

Em CCVs, a combinação de pequenos vasos com pequenas profundidades de solo implica numa menor capacidade de retenção de umidade e baixa aeração. Este problema pode ser contornado com a correta seleção do volume do vaso, do regime de irrigação e da composição do solo. Regimes de regas com mais de um reservatório são utilizados para garantir o suprimento dos diversos micro e macro nutrientes necessários às plantas.

3. FUNDAMENTAÇÃO DO PROJETO

3.1. DIMENSÃO DA CÂMARA DE CRESCIMENTO VEGETAL

No *Plant Growth Chamber Handbook*, Wade, et al. 1996, especifica que o tamanho da câmara deve ser adequado para garantir a manutenção e acesso aos seus componentes, assim como garantir espaço suficiente entre as plantas para que haja a correta circulação de ar. Definiu-se então o tamanho da CCV, através de seu projeto conceitual apresentado na Figura 3.1. As medidas externas da câmara são de 1230 mm de altura, 600 mm de largura e 470 mm de profundidade. Optou-se por este tamanho reduzido para restringir a potência necessária do sistema de condicionamento de ar e de exaustão e garantir a eficiência da câmara no cultivo de uma espécie vegetal, a fim de testar o sistema de controle, objetivo deste trabalho.

Por motivos econômicos e de facilidade de aquisição, utilizou-se chapas de MDF de 15mm de espessura para a montagem da câmara de cultivo vegetal. Estas chapas são revestidas por uma resina fenólica de cor branca, que terá a função de proteger a madeira contra a umidade do meio e aumentar a refletividade da luz. Na parte inferior da câmara se reservou espaço para os reservatórios de água/nutrientes, enquanto que, na parte superior foram alocados os sistemas elétricos e de controle.



Figura 3.1 – Design conceitual da CCV.

3.2. DIMENSIONAMENTO DA ILUMINAÇÃO

Pela influência direta no equilíbrio térmico da CCV, a iluminação foi uma grande preocupação do projeto. Aconselha-se a utilização de apenas lâmpadas de espectro branco (como fluorescentes com temperatura de cor de 6500 K) para um crescimento padrão da maioria das espécies, mas para um espectro mais abrangente utiliza-se ainda lâmpadas incandescentes (de 10 a 20% da radiação total utilizado na câmara) [ASHRAE, 2001]. Estes dois tipos de lâmpadas, se comparadas a fontes luminosas à base de tecnologia LED, apresentam baixa eficiência energética, ou seja, parte da energia elétrica fornecida às lâmpadas é perdida somente em forma de energia calorífica. Além disso, elas possuem uma reduzida vida útil.

Optou-se no projeto pela utilização de LEDs para a iluminação, apoiado em novos estudos que revelam alta eficiência na fotossíntese vegetal utilizando a combinação de luz de espectro azul (435 nm à 465 nm) e de espectro vermelho (640 nm à 665 nm), visto que estes comprimentos de onda tem maior influência sobre as clorofilas A e B [Massa, et al., 2008], conforme ilustrado na Figura 3.2. Os demais comprimentos de onda que influenciam a morfologia foliar e o sistema imunológico da planta [Clark, et al., 1995] serão supridos por LEDs que emitem luz branca de temperatura de cor de 3000K.

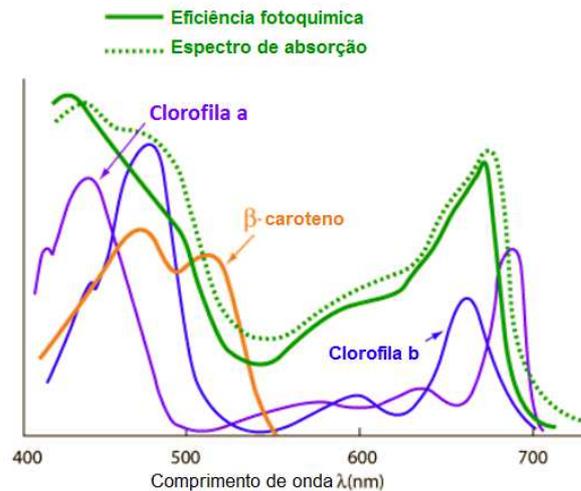


Figura 3.1 - Influência do comprimento da onda luminosa na realização da fotossíntese adaptado de *Botany* [Clark, et al., 1995].

A luminária que será utilizada na CCV, apresentada na Figura 3.3 é composta por uma bandeja em aço inox escovado, que fará o papel de refletor e dissipador de calor. Nesta, os LEDs estão fixados por meio de uma cola com alta condutividade térmica, facilitando a remoção de calor. Para a composição do espectro luminoso a ser utilizado, os quatro LEDs brancos operaram com uma potência total de 35 W ($V=12\text{ V}$, $I=720\text{ mA}$), gerando uma luminosidade total de 4000 lumens. Os LEDs azuis e vermelhos estão agrupados em um módulo único. Este módulo opera a uma potência total de 24 W ($V=24\text{ V}$, $I=1\text{ A}$) e contém dois LEDs azuis (460 nm) e 8 LEDs vermelhos (660nm), gerando em conjunto 1000 lumens.



Figura 3.3 – Luminária montada, ao centro localiza-se o módulo contendo os LEDs vermelhos e azuis, e distribuídos ao longo das arestas do refletor os LEDs brancos.

Dados precisos sobre a eficiência luminosa em termos de radiação efetiva à fotossíntese (*PAR*), necessitam ser obtidos por meio de medição da luminosidade por um espectrorradiômetro, a fim de saber a contribuição de cada comprimento de onda. Um valor aproximado da *PAR* pode ser obtido através dos dados de área de base de cultivo e lumens gerados pelas lâmpadas e valores de conversão da tabela contida no Anexo A e é apresentada na Tabela 3.1 [Sager, et al., 1996]. A alimentação dos LEDs será realizada por uma fonte de tensão variável, entre 12V e 24V, permitindo ajuste, se necessário, na potência da luminária construída.

Tabela 3.1: Rendimento em [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] aproximado esperado para a luminária concebida.

Rendimento aproximado (variando-se os índices de conversão da tabela do Anexo A)									Photons [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$]	
Tipo	Quantidade	Tensão [V]	Corrente [I]	Potencia [W]	Comprimento de Onda [nm]	Lumens [lm]	Área base de cultivo [m ³]	Lux [lm/m ²]	Mínima	Máxima
Azul	2	2,2	1	4,4	460	139,24	0,2451	568,10	5,11	17,04
Vermelho	8	3,4	1	27,2	660	860,76	0,2451	3511,87	31,61	105,36
Branco	4	12	0,72	34,56	3500k	4000	0,2451	16319,87	146,88	489,60
TOTAL:								20399,84	183,60	612,00

Sabendo-se que existe um gradiente vertical da *PAR* disponível efetivamente a fotossíntese, segundo a definição que a radiação de uma fonte luminosa a qualquer distância é inversamente proporcional ao quadrado da distância desta fonte [Sager, et al., 1996], a luminária será fixada na parede do interior da CCV por meio de uma estreita fita metálica, presa à parede, e um imã permanente fixo junto ao suporte da luminária, como detalhado na Figura 3.4, garantido um fácil ajuste da fonte de luz em relação à posição mais próxima possível das plantas.



Figura 3.4 – Detalhes do sistema de fixação da luminária.

3.3. FLUXO DE AR

Com base nas dimensões da câmara, selecionou-se um micro ventilador que suprisse as necessidades de renovação de ar da CCV, de 50% a 67% do volume do ambiente de cultivo por minuto. O ventilador selecionado tem capacidade de extração de 26,7 CFM, cerca de 0,75 m³/min de ar. O perfil de velocidades do escoamento de ar no interior da câmara foi obtido através de simulações no software SolidWorks. O software utiliza as equações de Navier-Stokes juntamente com o método de volume finito para obtenção analítica do escoamento de fluidos. Para a simulação foi definido o volume da área de cultivo, fixou-se a condição de entrada de ar a pressão atmosférica e foram variadas as condições de fluxo de extração de ar entre o mínimo necessário para a correta renovação de gases necessários à fotossíntese no interior da câmara (Figura A1), 0,536 m³/min, (Figura A2) um valor intermediário 0,64 m³/min e o valor máximo de capacidade de extração do ventilador 0,75 m³/min (Figura A3). Em todos eles as velocidades dos escoamentos de ar estão dentro da faixa de operação necessárias no interior da câmara (entre 0,3 m/s e 1 m/s). Detalhes visuais das simulações podem ser visualizados nas Figuras A1, A2 e A3 do Apêndice A.

3.4. CARGA TÉRMICA E SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

Por se tratar de uma CCV que opera no interior de uma residência, considerou-se que a temperatura do ambiente não ultrapassa 35°C e que a umidade relativa do ar se encontra próxima da faixa do conforto, entre 50% e 70%. Sendo assim, assume-se que a carga térmica total é a soma das parcelas Q_L (calor gerado pelas lâmpadas), Q_V (carga térmica gerada pelo fluxo de renovação de ar no interior da câmara) e Q_D (parcela de carga térmica do interior da CCV dissipada pelas paredes da mesma) [Beyer, 2013].

A parcela Q_L , é calculada a partir da corrente e da tensão de operação da luminária, utilizando-se a equação 3.4.1 [Beyer, 2013].

$$Q_L = I \times V = 12 \times 5 = 60 [W] \quad [3.4.1]$$

Segundo os conceitos psicrométricos, quando o ar úmido é resfriado e as linhas de saturação do vapor d'água na carta psicrométrica não são atingidas, a troca térmica ocorre apenas na forma sensível. A carta psicrométrica contida no Apêndice B ilustra a faixa de resfriamento, da linha vermelha à linha azul, mantendo-se constante a razão massa de vapor de H₂O por massa de ar seco.

Para o cálculo deste calor sensível, utilizou-se a equação 3.4.2 [Beyer, 2013]. Onde, a vazão mínima para a renovação de ar $\dot{V} = 0,00219$ m/s, o calor específico do ar $C_p = 1004$ J/Kg.K, a temperatura ambiente no exterior da câmara $T_{amb} = 35^\circ\text{C}$, e temperatura no interior da CCV $T_i = 30^\circ\text{C}$.

$$Q_V = \rho \times \dot{V} \times C_p \times (T_{amb} - T_i) = 13,2 W \quad [3.4.2]$$

A soma destas duas parcelas de carga térmica, Q_L e Q_V , foram inseridas como carga térmica ativa juntamente com as dimensões do volume destinado ao cultivo e o coeficiente de condução do MDF, $K_{MDF} = 0,14 \text{ W/Km}$, [NBR 15220 -2/2005] no software AZTEC, apresentado no Apêndice C. Desenvolvido pela empresa de manufatura de células termoelétricas Peltier Laird Technologies, o software nos indica a potência, $Q_{peltier} = 141,21 \text{ W}$ das células Peltier necessárias para atender a condição de funcionamento, considerando a perda de calor das paredes da CCV.

Para atingir a potência necessária de resfriamento, projetou-se uma unidade de Ar Condicionado (AC) composta por três módulos Peltier do modelo TEC1-12706. Cada um desses módulos Peltier terá uma capacidade de resfriamento máxima nas condições de funcionamento ideais de 50 W. Estas estarão ligadas individualmente a fontes de alimentação com capacidade de corrente de 7 A com uma diferença de potencial de 12 V. Por estarem conectadas a fontes diferentes, o módulo de AC poderá ter sua potência ajustada em três níveis (33% com uma célula ligada, 66% quando duas células estão ligadas e 100% quando as 3 células estão ligadas), evitando a necessidade de uso de pontes “H” para regular a tensão enviada ao sistema de AC e com isso regular a potência do sistema de condicionamento de ar como um todo.

As células estão com seu lado quente em contato com dissipadores aletados resfriados por micro ventiladores na tubulação de retirada de ar da CCV, que garantem uma alta eficiência de retirada de calor na face fria. A face fria de cada célula está fixa a uma placa de alumínio que tem sua face oposta em contato com espaço interno da câmara. Para auxiliar a troca térmica com o ar no interior da câmara de cultivo e assim realizar seu controle de temperatura, micro ventiladores circularam o ar por dissipadores de calor e o soprarão de cima para baixo dentro da CCV, contra o fluxo de ar causado pela exaustão.

A Figura 3.4.3 ilustra o esquema de funcionamento e montagem do AC. Na parte (A) da figura são ilustradas as trocas térmicas no AC. As setas e os dissipadores vermelhos representam onde está sendo dissipado o calor da face quente da Peltier e as setas e os dissipadores azuis representam onde está sendo resfriado o ar do interior da câmara. Na parte da figura (B) as setas pretas simbolizam o escoamento de ar fornecido pelo sistema de exaustão, que por já ter sido resfriado na passagem pelo interior da CCV realiza um trabalho mais eficiente de retirada de calor da face quente das células. Nas partes (C) e (D) se tem uma ilustração do Sistema de AC como um todo e o sistema apresentado com uma vista em corte, respectivamente.

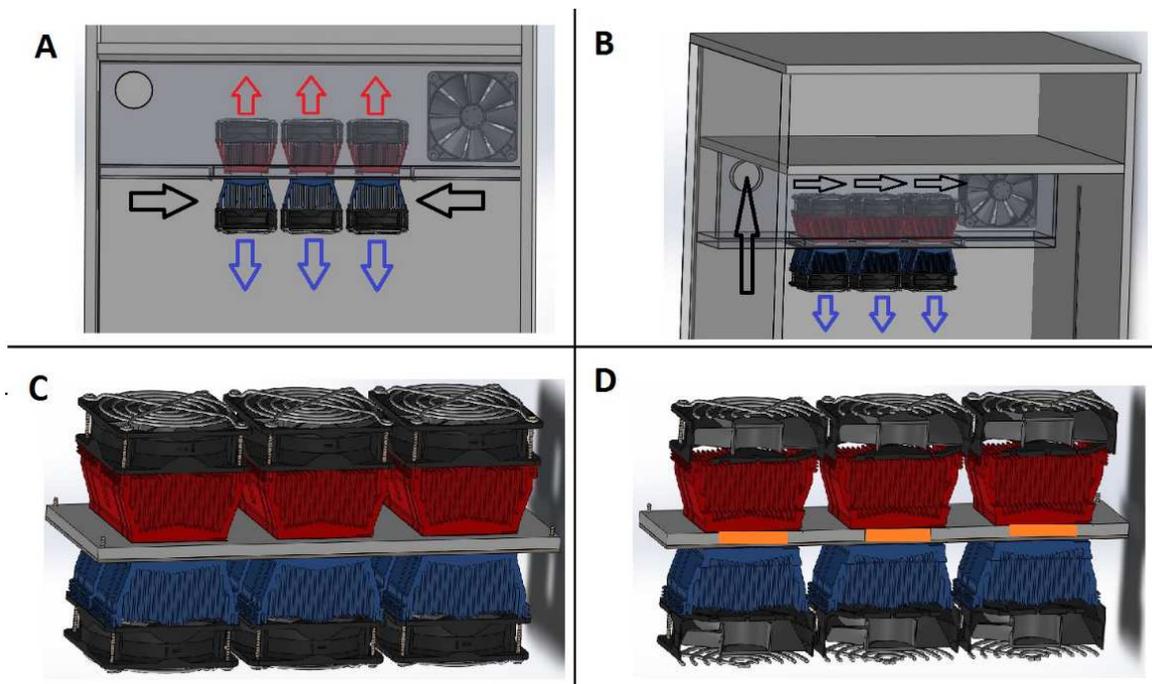


Figura 3.4.3 – (A) e (B) Esquema da troca térmica no interior da CV. (C) Desenho Conceitual do Sistema de AC e (D) Corte no Sistema de AC, revelando as interfaces entre as células Peltier (em laranja), isolamento térmico, placa de alumínio, dissipadores de calor e micro ventiladores.

O comportamento do sistema de condicionamento de ar pode ser conhecido modelando-se o comportamento físico do sistema térmico matematicamente, considerando-o um sistema físico linear a parâmetros concentrados e constantes [Perondi, 2010]. Através de analogias comportamentais deste sistema físico com o sistema físico elétrico podem ser obtidas equações diferenciais específicas (EDLONHCC – equações diferenciais lineares ordinárias não homogêneas a coeficientes constantes) que o descrevem.

Na modelagem, representada na figura 3.4.4, tratou-se a CCV um trocador de calor, onde o sistema de condicionamento de ar retira calor da câmara ($Q_{peltier}$) enquanto há uma carga térmica ativa (Q_L) no seu interior. No sistema elétrico análogo considerou-se uma capacitância térmica (C_t) e uma resistência equivalente (R^*) do trocador de calor, conforme a equação [3.4.3] [Perondi, 2010].

$$R^* = \frac{2 R_t}{1+2\rho \dot{V} C_p R_t} = 0,1026 [W^{-1}] \quad ; \quad C_t = \rho \dot{V} C_p = 200,38 [\frac{J}{K}] \quad [3.4.3]$$

A parcela (R_t) é definida no conceito de coeficiente global de transferência de calor, conforme a equação 3.4.4 [Incropera, et al., 2008], onde $A=2,09 \text{ m}^2$ e representa o somatório das áreas das paredes do interior da CCV, $x=15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ que é o valor da espessura das chapas de MDF, e $h=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ quantificando o coeficiente de transferência calorífica por convecção da câmara para o ambiente.

$$R_t = \frac{1}{h A} + \frac{x}{K_{MDF} A} = 0,07039 [\frac{K}{W}] \quad [3.4.4]$$

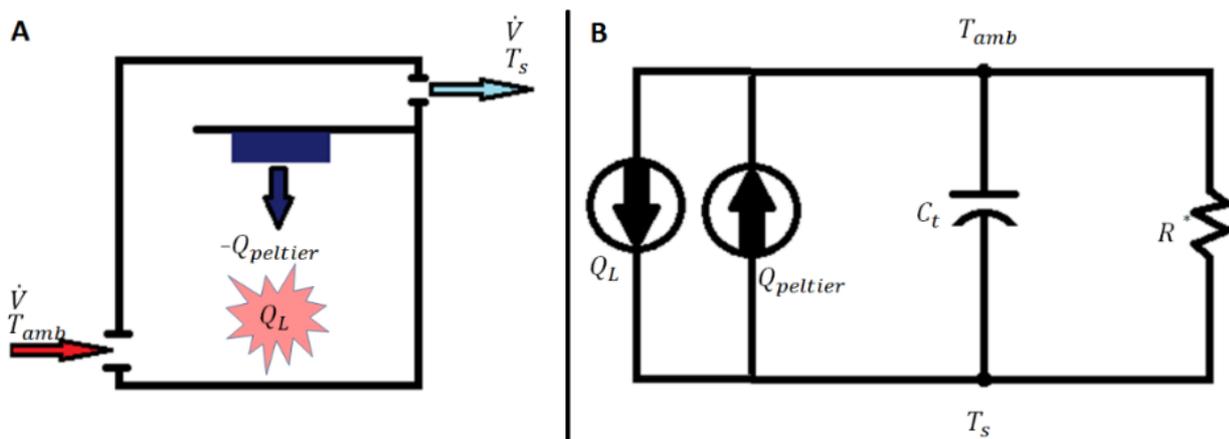


Figura 3.4.4 – (A) Desenho esquemático da CCV como um trocador de calor; (B) Circuito elétrico análogo ao sistema térmico esquematizado em (A).

A comportamento do sistema térmico como um todo fica expresso de acordo com equação 3.4.5, onde \dot{T} indica a variação da temperatura em relação ao tempo

$$Q_{peltier} - Q_L = C_t \dot{T} + (T_{amb} - T_s)(R^*)^{-1} \quad [3.4.5]$$

4. CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Concebeu-se o projeto do controlador em conjunto com a montagem de um protótipo eletrônico do sistema (Figura 4.1). Nele, LEDs representam a potência sendo enviada pelo micro controlador (via pulso PWM) para o ventilador que faz a exaustão e para o sistema de condicionamento de ar, que quanto maior o brilho, maior é a potência. O sensor de umidade de solo está introduzido em água, o sensor de luminosidade faz a leitura do ambiente, assim como o sensor de temperatura e umidade do ar. Por fim, acoplado ao sistema há um gravador de dados (cartão SD). O loop de repetição das diversas dinâmicas do sistema é ilustrado na Figura 4.2.

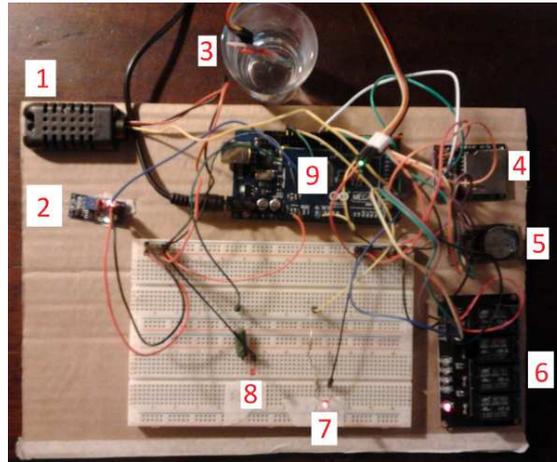


Figura 4.1 - (1) Sensor de temperatura e umidade do ar, (2) sensor de luminosidade, (3) sensor de umidade do solo (mergulhado em água), (4) gravador de dados (cartão de memória SD), (5) RTC (real time clock), (6) conjunto de relés, (7) Led simulando a potência do ventilador exaustor, (8) Led simulando a potência do condicionamento de ar, (9) micro controlador Arduino.

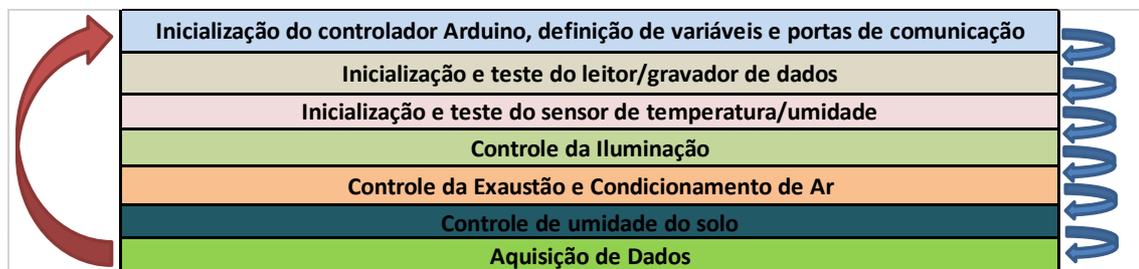


Figura 4.2 – Loop de repetição da lógica de controle. As setas azuis indicam os passos entre as diferentes rotinas de controle, a seta vermelha indica o fim do loop e reinício do mesmo.

4.1. Micro Controlador

O processamento do controle é realizado por uma plataforma de prototipação eletrônica, o Arduino, constituído basicamente de uma placa microcontroladora, uma linguagem de programação típica de um ambiente de desenvolvimento e suporte à entrada e saída de dados e sinais. Foi criado justamente com o intuito de servir de base para projetos de baixo custo [Vasiljevic', 2013].

O modelo de Arduino usado tem como microcontrolador o chip ATmega1280. Este possui 54 saídas/entradas digitais, dos quais 14 podem ser usados como saídas com função PWM, 4 portas seriais UARTs, um cristal oscilador de 16 MHz, uma conexão USB [Arduino.cc].

No Arduino é inserido o código de controle, escrito em linguagem de programação C, que irá comandar o comportamento do sistema e de seus componentes. Durante a inicialização do micro controlador, primeiramente, são definidos valores iniciais para as variáveis de controle, evidenciadas na tabela 4.1.1:

Tabela 4.1.1: Variáveis de controle estabelecidas pelo usuário.

Variável	Valor Inicial	Descrição
HoraOn	08:00:00	Horário definido pelo usuário para ligar o sistema de iluminação.
HoraOff	20:00:00	Horário definido pelo usuário para desligar o sistema de iluminação.
Tempmax	30	Temperatura máxima no interior da CV, definido pelo usuário.
Svmin	60	Velocidade mínima do Ventilador de exaustão (de 0 à 255), de acordo com as características do ventilador e a velocidade máxima do ar no interior da CV.
Svmax	255	Velocidade máxima do Ventilador de exaustão (de 0 à 255) de acordo com as características do ventilador e a velocidade máxima do ar no interior da CV.
Xv	35	Ganho/decréscimo de potência do ventilador (de 0 à 255).
Xp	1	Ganho/decréscimo de potência do sistema de AC (de 1 à 3).
Solomin	200	Limite mínimo do sinal vindo do sensor de umidade do solo (de 0 à 1000) para ativação do sistema de rega.
pausarega	5000	Intervalo em que o sistema de rega fica acionado (5000 ms = 5 segundos).
pausalooop	2000	Intervalo de pausa entre a realização do loop de controle (2000 ms = 2 segundos).

Após a definição das variáveis, são realizados testes para verificar o correto funcionamento dos sensores, do “real time clock” (RTC) e do sistema de gravação de dados. A figura 4.1.1 ilustra o loop de inicialização do sistema, definição das variáveis iniciais de controle, checagem do RTC, do gravador de dados SD e do sensor de Temperatura e Umidade (DHT).

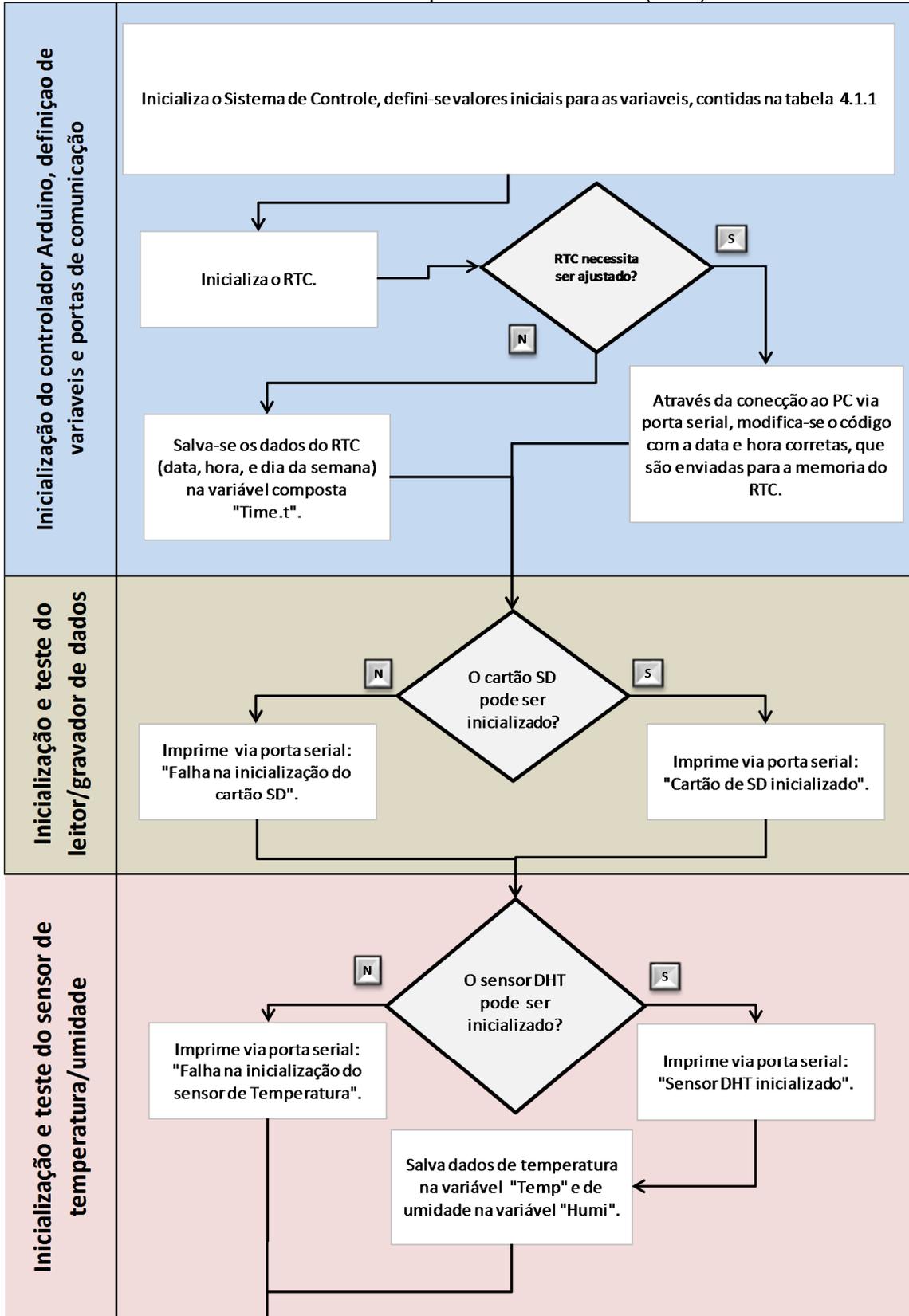


Figura 4.1.1 - Diagrama de blocos ilustrando a rotina de inicialização do sistema, definição das variáveis de controle e verificação dos sensores de temperatura e sistema de gravação de dados.

4.2. SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

O controle da radiação luminosa tem início com a leitura da luminosidade ambiente através de um módulo foto resistivo (alimentado pelo Arduino com 5 V), que através de uma conexão analógica informa qual a incidência luminosa no interior da câmara, armazenando esse sinal na variável "Lux". Faz-se, então, a comparação entre a variável auxiliar "bufh", que contém a hora lida do RTC anteriormente configurado e testado, com as variáveis "HoraOn" e "HoraOff", definidas pelo usuário do sistema. Se a hora no momento "bufh" estiver entre "HoraOn" e "HoraOff", significa que as plantas deveriam estar recebendo radiação luminosa e é, então, enviado então um sinal "1" para o relé que controla a alimentação da luminária, ligando-a. Caso contrário, o sinal enviado ao relé será "0", tornando a luminária inativa. A Figura 4.2.1 ilustra a rotina de controle da iluminação na CCV.

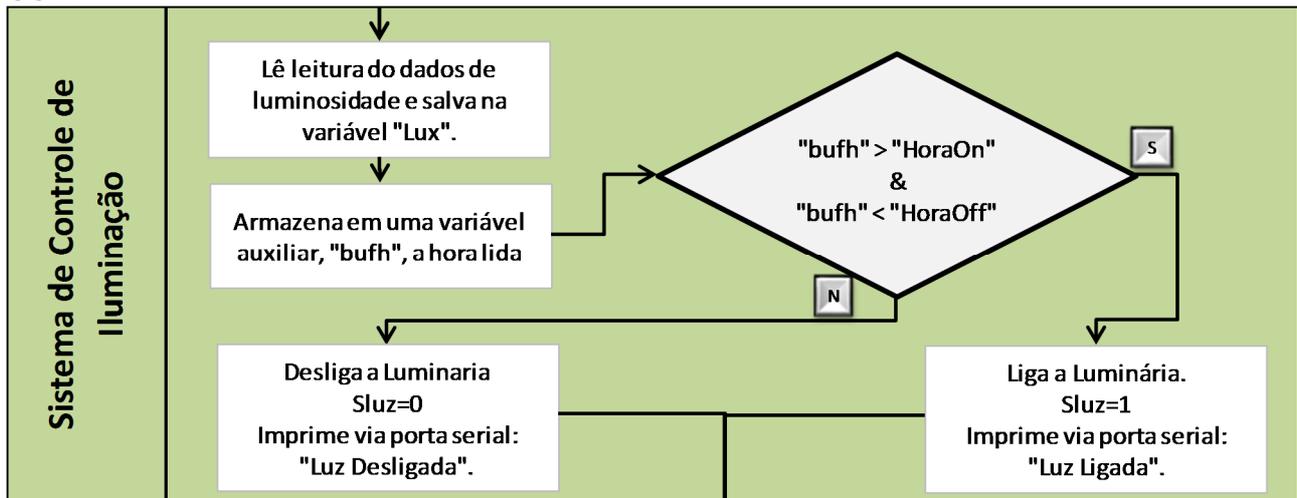


Figura 4.2.1 - Diagrama de blocos ilustrando a rotina de controle da Iluminação.

4.3. SISTEMA DE VENTILAÇÃO E CONTROLE DE TEMPERATURA DO AR

Inicia-se o processo de controle da ventilação, comparando-se a variável referente a temperatura no interior da câmara, "Temp", obtida a partir do sinal do sensor do tipo DHT21, o qual é um sensor capacitivo digital, que através de uma alimentação de 5V nos retorna valores de temperatura (de -40,0 à 80,0°C, com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$) e umidade (de 0 à 100% de UR, com precisão de $\pm 3\%$ UR) com a variável "Tempmax", pré-determinada pelo usuário como a máxima temperatura permitida no interior da CV. Se a temperatura for menor que o limite máximo definido em "Tempmax", verifica-se se o sinal de potência enviado ao ventilador (Sv) é maior que o mínimo necessário para garantir a taxa de renovação do ar no interior da CCV (Svmin). Se o resultado desta verificação for positiva, o sinal de potência do ventilador sofre um decréscimo (Xv) e o ventilador de dissipação interna do AC é desligado (Svpe=0). Se o resultado desta verificação for negativa, o sinal de potência do ventilador é definido como o mínimo (Svmin).

Caso a temperatura no interior da CCV (Temp) seja maior que o limite (Tempmax), verifica-se se o sinal de potência do ventilador (Sv) é igual ou maior que a potência máxima do ventilador (Svmax). Se a comparação for negativa, incrementa-se a potência do ventilador (Sv em Xv). Se a comparação for positiva, faz-se uma nova comparação, que verifica se a potência do AC (Sp) é menor que a potência máxima do AC (Spmax). Caso a mesma retorne positiva, realiza-se um incremento (Xp) na potência do AC (Sp). Liga-se o ventilador de dissipação interna do AC (Svpe=1) e ao mesmo tempo diminui-se a potência do ventilador de exaustão ao mínimo, com o intuito de diminuir a vazão de ar do exterior para o interior, impactando como um todo na redução da carga térmica da CCV.

A Figura 4.3.1 mostra a partir de um diagrama de blocos, o funcionamento do lógica de controle.

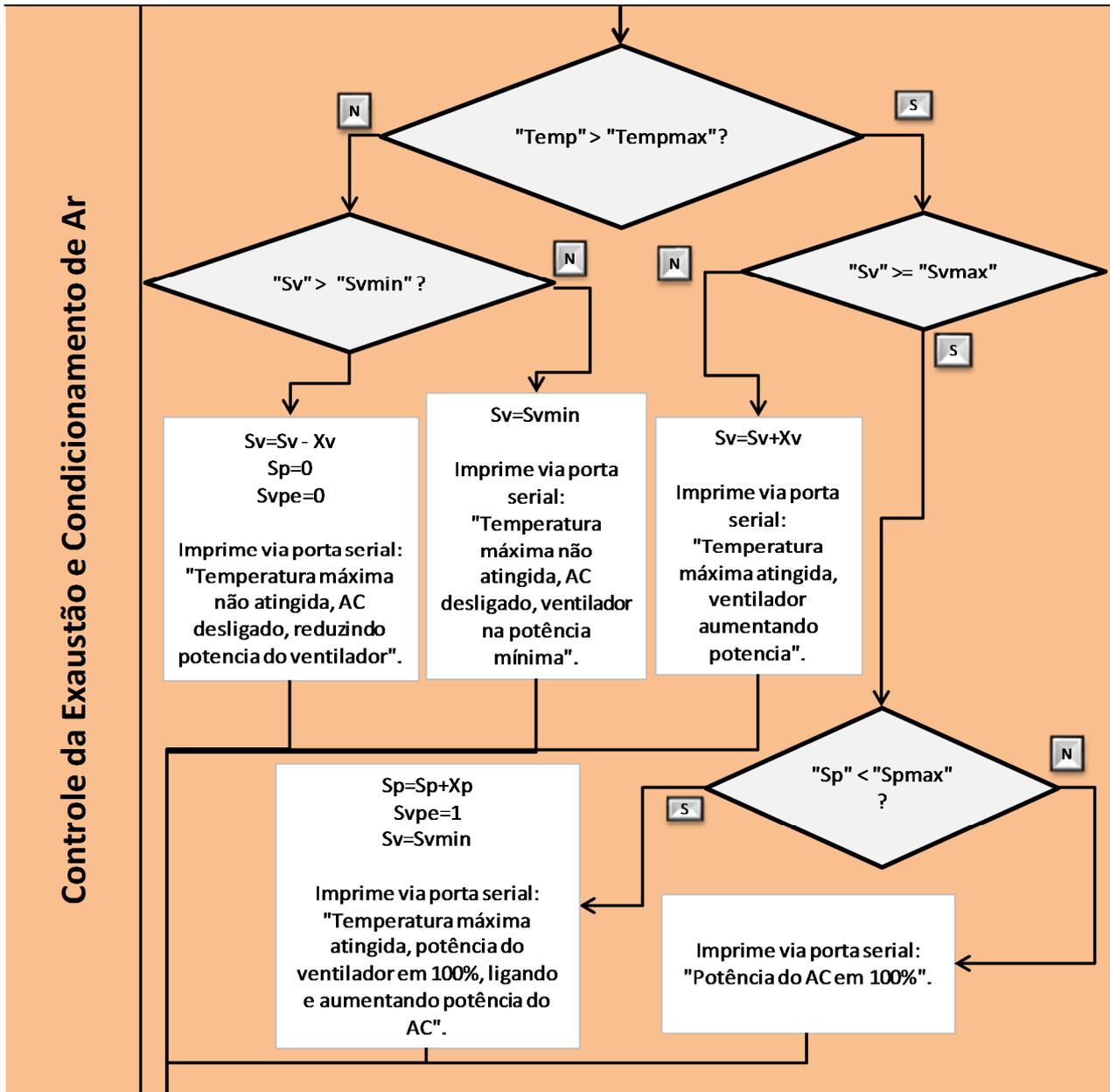


Figura 4.3.1 - Diagrama de blocos ilustrando a rotina de controle do sistema de Ventilação e Temperatura do Ar.

4.4. SISTEMA DE CONTROLE DE UMIDADE DO SOLO

Para a parte de verificação de umidade do solo será usado um sensor “KEYES Soil Moisture” com saída analógica de conceito de funcionamento baseado na condutividade do solo. Os dois eletrodos do sensor estão em contato com o solo e medem a condutividade elétrica do mesmo. Quanto menor for o sinal da condutividade, menor é o teor de umidade do solo. O sinal que é recebido por uma porta analógica do Arduino, varia de 0 à 300 (UA)* para um solo seco, de 300 à 700 (UA)* em contato com um solo húmido e de 700 à 950 (UA)* quando imerso em água. Este sinal é armazenado na variável “Ss” que se menor ou igual a variável “Solomin”, preestabelecida pelo usuário (de acordo com as necessidades básicas da espécie vegetal a ser cultivada), tem como resposta o acionamento do relé referente a bomba d’água, localizada imersa nos tanques de rega na parte inferior da CV, conforme ilustrado na figura 4.4.1. Esta bomba é alimentada por uma fonte 12V e possui corrente de 0,8A durante o funcionamento, garantindo uma vazão de 2L/min para a tubulação de rega. Após acionado, o relé ficará ligado por um período igual a variável “pausarega” que dependerá da quantidade, da dimensão e do número de vasos sendo cultivados na CV que deve ser definido pelo usuário.

* (UA) = Unidade Arbitrária

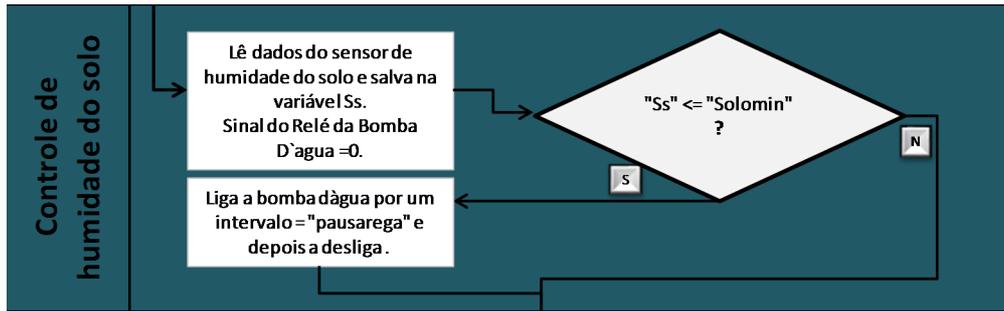


Figura 4.4.1 – Ilustração esquemática do diagramas de blocos referente ao controle da umidade do solo.

4.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A última rotina do controle do sistema tem como objetivo a aquisição de dados lidos pelos sensores, de acordo com o horário e data fornecidos pelo RTC. A gravação desses dados é feita no cartão SD e acontece uma vez a cada minuto, gerando ao final de um dia de aquisição de dados um arquivo de texto com 92 kB. Por utilizar um cartão de memória de 8 GB, o sistema de aquisição de dados tem capacidade de armazenar aproximadamente vinte e um mil dias de dados.

Os dados são salvos em texto no formato "Data; hora; dia da semana; temperatura do ar; umidade do ar; umidade do solo; luminosidade; potência do ventilador; potência do Peltier; Status da Luz (1=ligado;0=desligado); Status da bomba de rega (1=ligado;0=desligado)". Este formato é lido facilmente no Excel gerando a tabela a seguir.

Tabela 4.5.1: Amostra dos dados do arquivo de texto lidos no Excel.

Data	Hora	Dia da Semana	Temperatura (°C)	Umidade (UR)	Umidade do solo (UA)*	Luminosidade (UA)*	Potência Vent (%)	Potência AC (%)	Status Luz	Status REGA
28/10/2013	20:14:02	Segunda	23,5	46,4	662	344	23,53	0	0	0
28/10/2013	20:15:00	Segunda	23,4	45,2	676	447	23,53	0	0	0
28/10/2013	20:16:00	Segunda	23,5	45,6	670	452	23,53	0	0	0
28/10/2013	20:17:01	Segunda	23,4	45,2	667	473	23,53	0	0	0
28/10/2013	20:18:02	Segunda	23,5	48,4	664	475	23,53	0	0	0
28/10/2013	20:19:00	Segunda	23	46,4	664	478	23,53	0	0	0
28/10/2013	20:20:01	Segunda	23,3	45,4	664	480	23,53	0	0	0
28/10/2013	20:21:01	Segunda	23,2	46,7	663	479	23,53	0	0	0

*(UA) = Unidade Arbitrária

A partir dessa tabela é possível ordenar os dados em gráficos que demonstram as diversas variações nos parâmetros controlados que ocorreram durante o uso da CCV. Na figura 4.5.1 encontra-se gráficos referentes ao teste de gravação de dados obtidos pela leitura dos sensores de um quarto habitacional durante 24h.

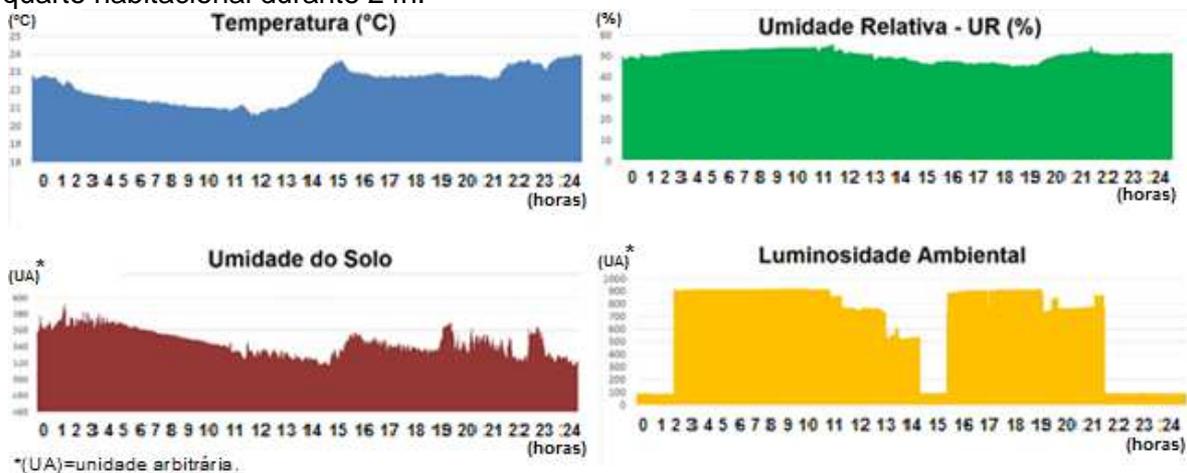


Figura 4.5.1 – Gráficos referentes a um dia de testes de leituras dos sensores de um quarto habitacional.

5. TESTE DA CCV

Para realização o teste da CCV, fixou-se seus componentes eletrônicos (micro controlador, protoboard, relés, fontes de alimentação) a uma chapa de madeira alocada na parte superior da câmara. Instalou-se plugues nas fiações para facilitar a remoção do sistema de controle, juntamente com fios, que realizam a conexão dos sensores de temperatura, umidade do ar, luminosidade e umidade do solo, os quais estão localizados no interior da CCV com o micro controlador e com a luminária e seu relé de acionamento.

Instalou-se na parte inferior da CCV o reservatório de água para rega, juntamente com seu sistema de bombeamento, onde mangueiras levam o fluxo de água para três diferentes vasos, contendo três pés de rúcula (*Eruca sativa*), um pé de tomate cereja (*Solanum lycopersicum var. cerasiforme*) e três pés de alface (*Lactuca sativa*). Escolheu-se alface e rúcula para o teste por apresentarem um rápido desenvolvimento e o tomateiro por não ser uma planta foliar como as duas espécies anteriormente citadas.

Os testes tiveram duração de sete dias. A figura 5.1 ilustra a alocação dos diversos componentes na CCV e a condição de desenvolvimento das plantas no início do teste.



Figura 5.1 – (A) Alocação dos componentes eletrônicos na CCV, (B) componentes eletrônicos e fontes de alimentação, (C) luminária no interior da CCV, (D) Reservatório de rega, (E) Sensores de Luminosidade e de Temperatura/Umidade, (F) Sensor de umidade do solo, (G) pés de rúcula, (H) pé de tomate cereja, (I) pés de alface.

A figura 5.2 ilustra o desenvolvimento das três espécies de vegetais em diferentes intervalos de tempo durante os sete dias. Em (A) temos a imagem dos vegetais logo após o transplante, em (B) temos os espécimes no terceiro dia de teste, em (C) temos o quinto dia e em (D) o sétimo e último dia de testes.



Figura 2.2 – Espécies vegetais no (A) primeiro, (B) terceiro, (C) quinto e (D) sétimo dia de testes.

Dados gerais a respeito da temperatura e umidade do ar, assim como umidade do solo e índices luminosos são demonstrados graficamente na figura 5.3 de acordo com a leitura dos dados que foram adquiridos durante o teste e gravados no cartão SD.

Analisando as imagens referentes ao desenvolvimento dos espécimes testados e os dados adquiridos experimentalmente, comprovou-se que a CCV projetada e desenvolvida cumpre seu papel em sustentar e promover o desenvolvimento sadio de vegetais. Testes com maior tempo de duração devem ser desenvolvidos para resolução de não conformidades no controle da CCV, apresentados na forma de um descompasso na atualização da hora no sistema de controle que ocasiona falha no controle da iluminação (conforme verificado nas leituras de intensidade luminosa ambiental na figura 5.3).

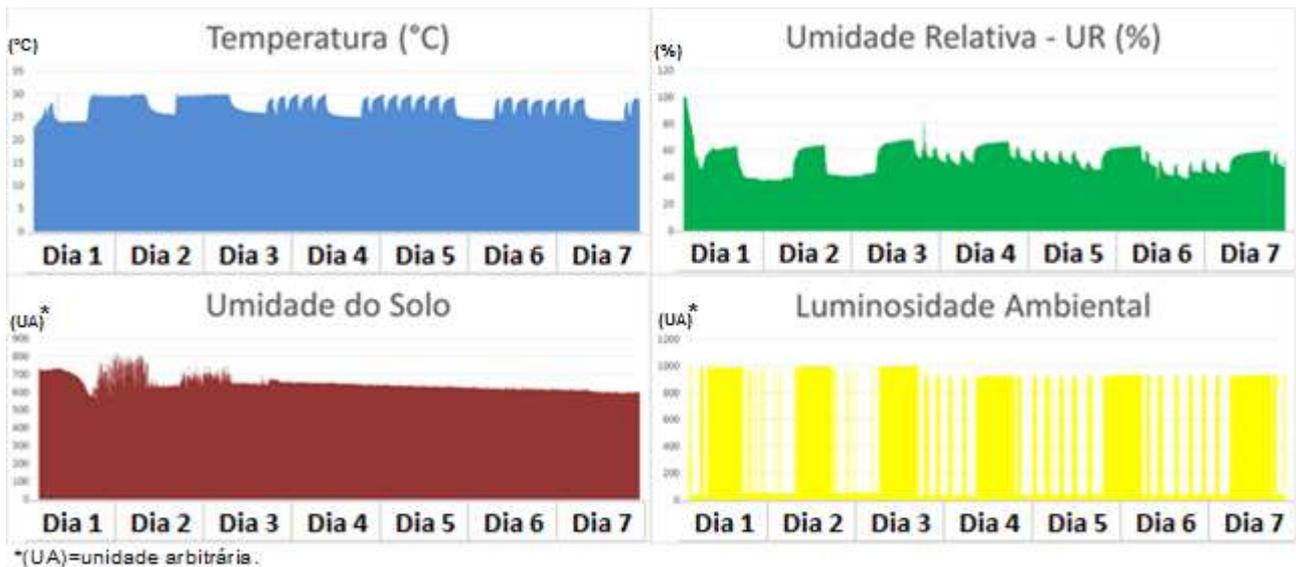


Figura 3.3 – Gráficos referentes a um dia de testes de leituras dos sensores durante os sete dias de testes da CCV.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do trabalho revelou a complexidade e o caráter multidisciplinar do processo de desenvolvimento de um sistema de controle de um meio ambiente para o cultivo de plantas, onde a complexidade desse controle fica evidente pela quantidade de parâmetros essenciais ao desenvolvimento de vegetais.

Apesar de complexo, realizou-se o controle de meios de cultivos e a construção de CCV's automatizadas é possível e viável utilizando-se o Arduino, um micro controlador de baixo custo e de interface de uso e programação amigáveis. Tendo uma maior capacidade de controlar as diferentes variáveis ambientais, teremos a capacidade de melhorar taxas de aproveitamento de solo, produtividade e qualidade, além de possibilitar a criação de pequenos espaços de cultivo em ambientes fechados, realizando aproximação dessa produção alimentícia do consumidor final e diminuindo os desperdícios decorrentes do transporte.

Sugere-se, como trabalhos futuros, um maior aprofundamento do sistema de condicionamento de ar, envolvendo o aquecimento e controle da umidade relativa do ar. Para um controle total do desenvolvimento do vegetal, sugere-se ainda um estudo no controle, envolvendo um sistema de cultivo sem solo, nos conceitos de aero ou hidroponia, onde seriam controlados os índices de nutrientes (através da medição da condutividade) e da acidez do meio aquoso.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arduino, **"Arduino Mega"**, <http://www.arduino.cc>. Acessado em 20/07/2013
- ASHRAE. **"ASHRAE Handbook, Fundamentals"**, Chapter 10. 2001.
- Bailey, W.A., Klueter H.H., D.T. Krizek, e R.C. Liu. **"The "Phyto-Engineering" Laboratory"**. 1972.
- Beyer, Paulo Otto. **"Apostila de Climatização, Ventilação, Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado"**. 2013.
- Clark, W. D., K. R. Stern, D. Vodopich, e R. Moore. **"Botany"**. January 1995.
- Decker, W. L. **"Atmospheric humidity and the energy buget of plants canopies. New York: humidity and Moisture: Measurement and Control in Cience and Industry"**, 1965.
- Downs, R. J., e D. T. Krizek. **"Plant Growth Chamber Handbook, Air Movement."** 1996.
- Ford, M. A., e G. N. Thorne. **"Effects of atmospheric humidity on plant growth"**. Ann. Bot, 38: 441-452, 1974.
- Gates, B. M., e C. M. Benedict. **"Convection phenomena from plants in still air"**. Am. Bot. 50: 567-573, 1963.
- Incropera, F. P., e D. P. Dewitt. **"Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa."** Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2008.
- Jerger, E. W., e F. L. Coonan. **"An experimental study of the effect of surface condensation on the performance of compact heat exchangers"**. Reinhold, NY., 1965.
- LairdTechnologies. **"Aztec"** <http://www.lairdtech.com/>. Acessado em 15/10/2013.
- Lange, O. L., E. D. Schulze, e L. Kappen. **"Responses of stomata to changes in humidity"**. Planta 100; 76-86, 1971.
- Massa, G. D., H. H. Kim, e C. A. Mitchell. **"Plant Productivity Response to LED Ligthing"**. HortScience Vol. 43(7), 2008.
- Mc Kree, K. J. **"The actium Spectrum, Absorptance and quantum yield photosynthesis in crop plants"**:. Agr. Meteorol. 9 : 191-216, 1972.
- Mellor, R. S., F. B. Salisbury, e K. Raschke. **"Leaf temperatures in controlled enviroments"**. Planta 61: 56-72., 1964.
- Morse, R. N., e L. T. Evans. **"Design and development of CERES"**. 1962.
- Perondi, Eduardo André. **"Introdução ao Controle de Sistemas Mecânicos"**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- Peter, R. Hicklenton, e D. Heins Royal. **"Plant Growth Chamber Handbook, Chapter 2 – Temperature"**. 1997.
- Sager, J. C., e C. M. Farlane. **"Plant Growth Chamber Handbook, Chapter 1, Radiation"**. 1996.
- Spomer, A. L., W. L. Berry, e T. W. Tibbitts. **"Plant Growth Chamber Handbook - Ch 7 - Plant Culture in Solid Media"**. 1997.
- Tibbitts, T.W., e D.T. Kriezek. **"History of the ASHS working Group on Growth Chambers and Controlled Enviroments"**, 1969 - 96: A case Study if Involvement. Vol. 32(1). HortScience, February 1997.
- Vasiljevic', Gabriel. **"Apostila de Arduino."** 2013.
- Vicentino, C, e G Dorigo. **"História para o ensino médio."** São Paulo: Scipione, 2004.
- Wade, William M., William A. Bayley, e Herschel H. Klueter. **"Plant Growth Chamber Handbook, Chapter 14, Writing Chamber Specifications."** 1996.
- Wexler, A., e S. Hasegawa. **"Relative humidity-temperature relationships of some saturated salt solutions in the temperature range of 0-50C"**. 1954.
- Yabuki, K., e H. Miyagawa. **"Studies on the effect of wind speed upon the photosynthesis"**. 1970.

ANEXO A

Tabela contendo valores de conversão aproximados, adaptados de *Plant Growth Chamber Handbook, Chapter 1, Radiation* [Sager, et al., 1996].

Conversões aproximadas para valores de radiação luminosa entre comprimentos de onda entre 400nm e 700nm, provindos de diferentes tipos de fonte

Fontes de Radiação	Multiplicar pelo valor indicado					
	Fotons para W/m ²	W/m ² para Fotons	Fotons para Lux ^b	Lux ^b para Fotons	W/m ² para Lux ^b	Lux ^b para W/m ²
Luz do Sol	0,219	4,57	54	0,019	0,249	4,02
Lâmpadas FLC Branca	0,218	4,59	74	0,014	0,341	2,93
FLC "Plant Growth"	0,208	4,8	33	0,030	0,158	6,34
Vapor alta pressão de Sódio (HPS)	0,201	4,98	82	0,012	0,408	2,45
Alta pressão Metal Halide	0,218	4,59	71	0,014	0,328	3,05
Vapor baixa pressão de Sódio (LPS)	0,203	4,9	106	0,009	0,521	1,92
Incandecente	0,2	5	50	0,020	0,251	3,99

APÊNDICE A

Perfis de escoamento de ar no interior da CCV. Em ambas condições a pressão na entrada de ar foi mantida constante: em (A1) a taxa de remoção de ar é de 0,0089 m³/s, em (A2) é de 0,011 m³/s e em (A3) é de 0,012 m³/s.

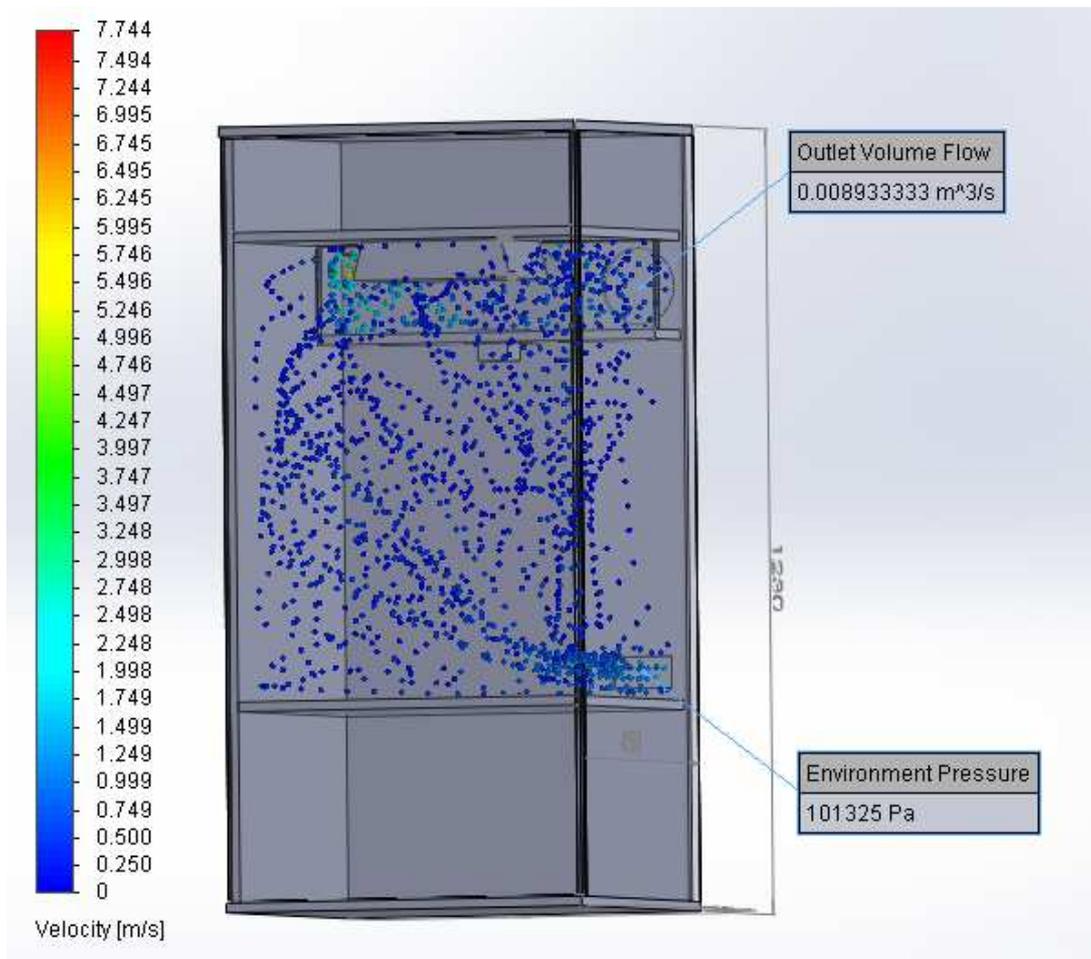


Figura A1 – Simulação com a taxa de remoção de ar de 0,0089 m³/s.

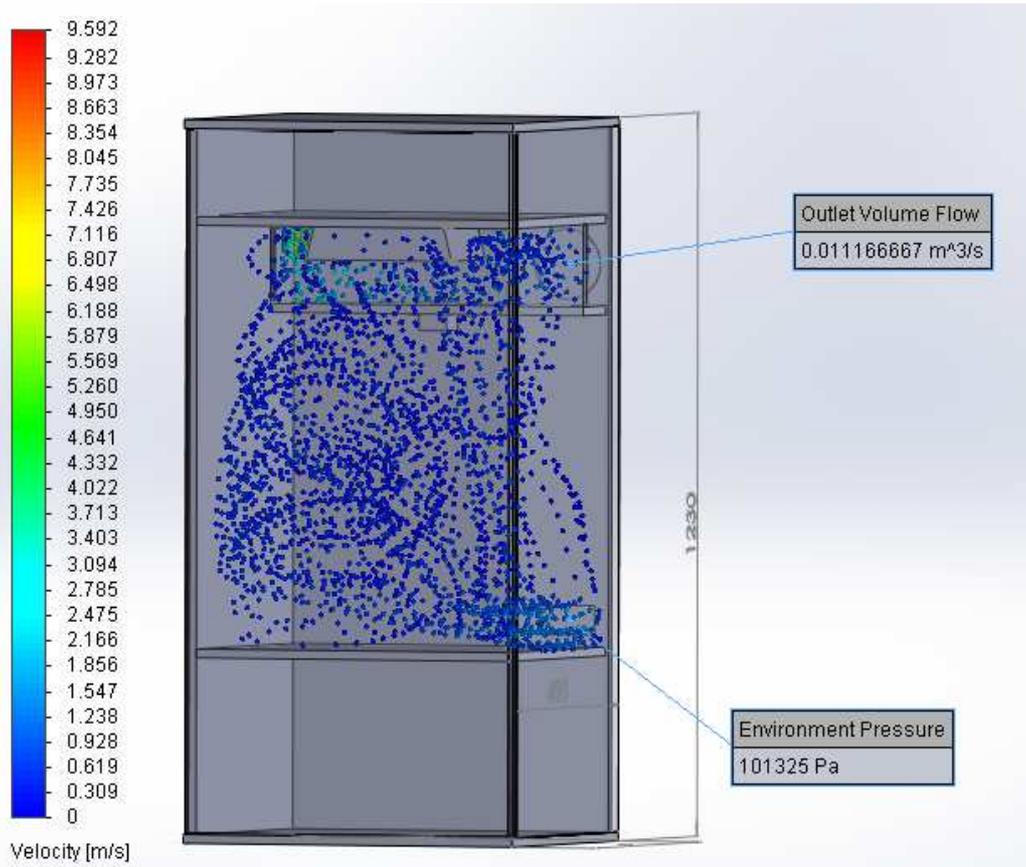


Figura A2 – Simulação com a taxa de remoção de ar de 0,011 m³/s.

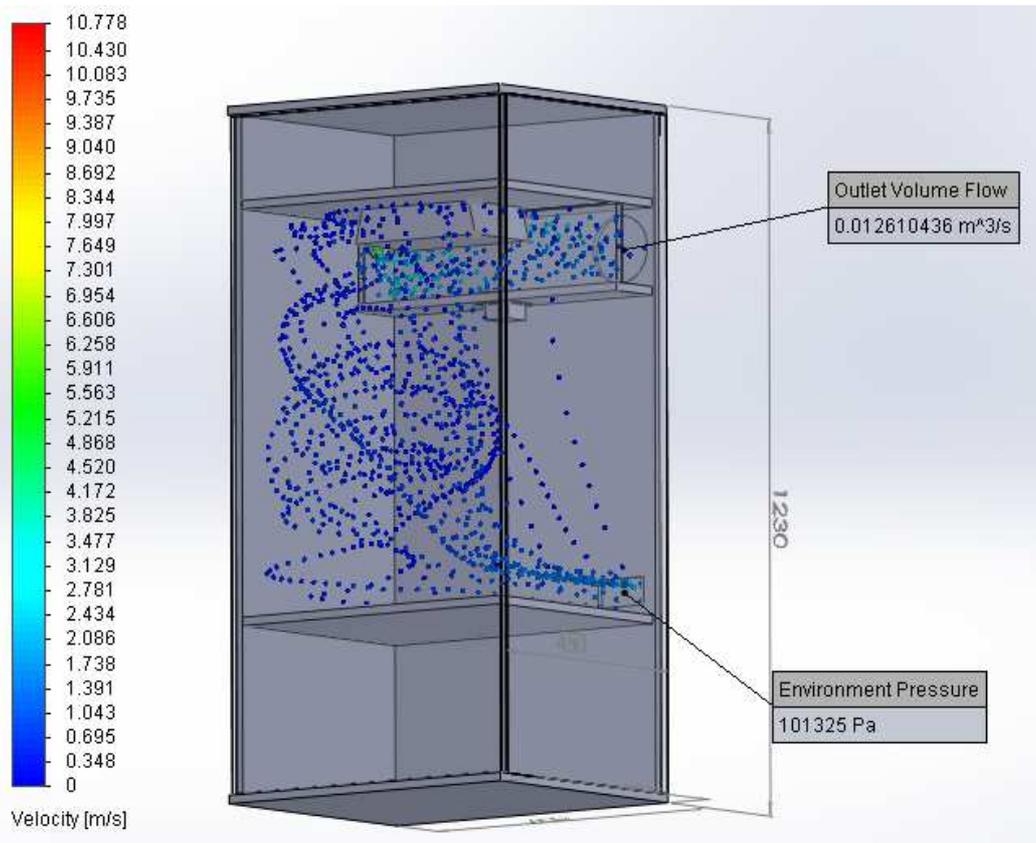


Figura A3 – Simulação com a taxa de remoção de ar de 0,012 m³/s.

APÊNDICE B

Carta psicrométrica indicando a faixa de operação de resfriamento da CCV.

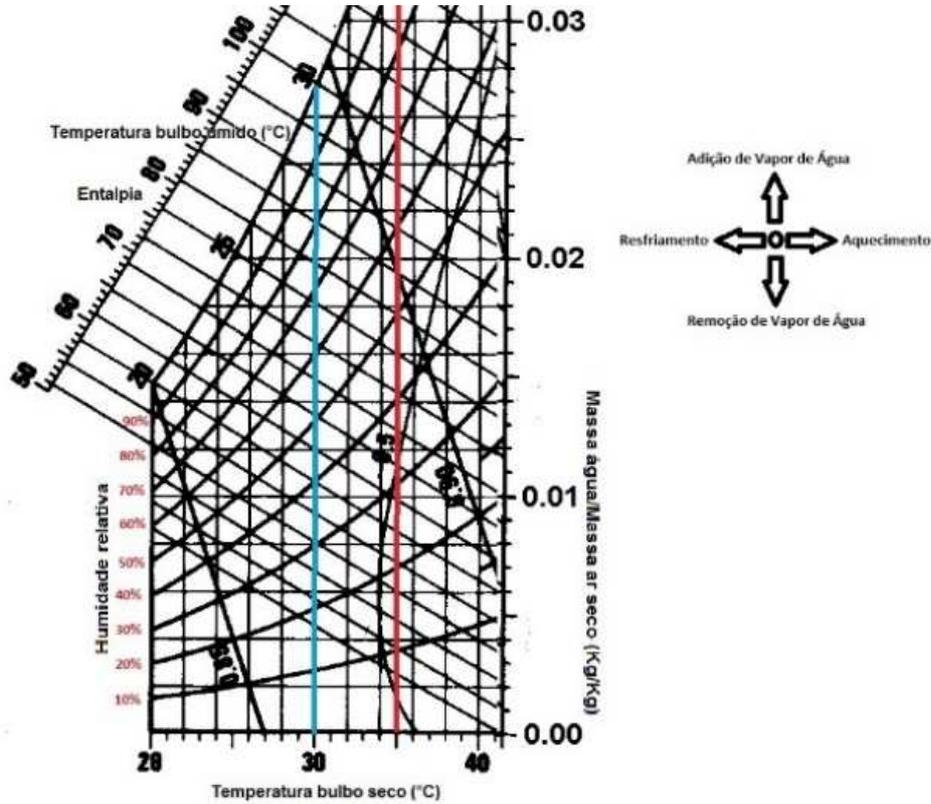


Figura B – Carta psicrométrica indicando entre as linhas vermelha e azul a faixa de operação da câmara.

APÊNDICE C

Resultados obtidos através do software AZTEC.

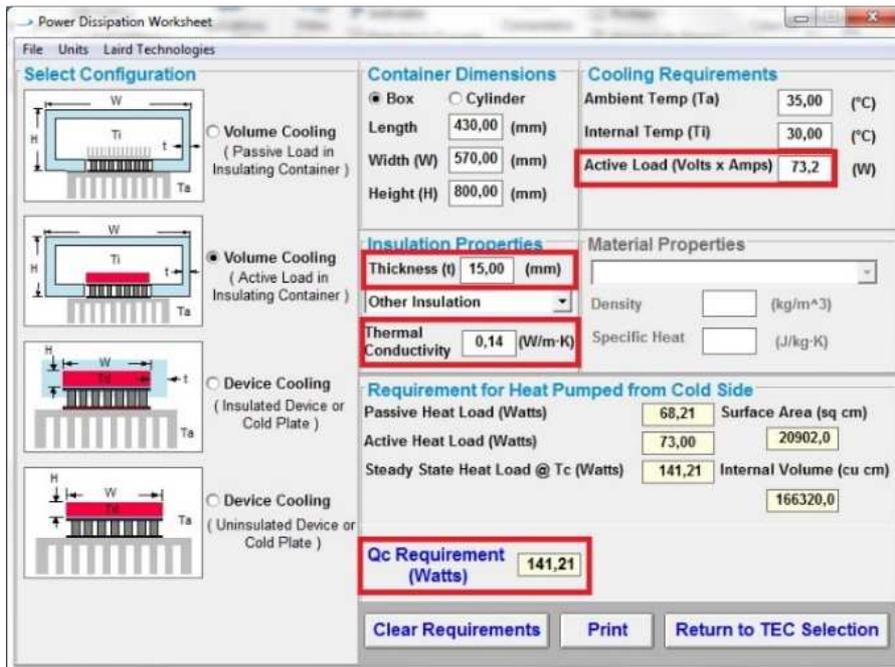


Figura C – Software AZTEC com os dados de cálculo indicados.